

I.H.T.

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

**ΕΝΑΤΟ ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ
ΓΙΑ ΤΙΣ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΓΕΡΟΣΚΗΠΟΥ, ΠΑΦΟΣ - ΚΥΠΡΟΣ 26 - 28 ΜΑΡΤΙΟΥ 2009



ΠΡΑΚΤΙΚΑ

ΔΙΟΡΓΑΝΩΣΗ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ
ΔΗΜΟΣ ΓΕΡΟΣΚΗΠΟΥ, ΠΑΦΟΣ - ΚΥΠΡΟΣ
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

Υπό την αιγίδα του

ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΥΛΙΚΩΝ του ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΚΥΠΡΟΥ (ΤΕΠΑΚ)

IHT

I.H.T.
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

**ΕΝΑΤΟ ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ
ΓΙΑ ΤΙΣ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

*ΓΕΡΟΣΚΗΠΟΥ, ΠΑΦΟΣ - ΚΥΠΡΟΣ
26 - 28 ΜΑΡΤΙΟΥ 2009*



ΠΡΑΚΤΙΚΑ

**ΔΙΟΡΓΑΝΩΣΗ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ
ΔΗΜΟΣ ΓΕΡΟΣΚΗΠΟΥ, ΠΑΦΟΣ
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΚΥΠΡΟΥ**

Υπό την αιγίδα του
**ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΥΛΙΚΩΝ του
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΚΥΠΡΟΥ (ΤΕΠΑΚ)**

9ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΤΟΥ Ι.Η.Τ. ΓΙΑ ΤΙΣ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ISSN 1108 - 3603

Επιμέλεια έκδοσης: Γ. Τσιλιγκιρίδης, Α. Τσιτσιμπίκου

Έκδοση: *Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής*
Τ.Θ. 487, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
541 24 Θεσσαλονίκη
τηλ. 2310 996087, 2310 996083, 2310 996084, fax 2310 996087
<http://eng.auth.gr/IHT>, e-mail: IHT@eng.auth.gr

Εκτύπωση-Βιβλιοδεσία: Εκδόσεις "ΓΙΑΧΟΥΔΗ"



Κ.Μελενίκου 15
546 35 Θεσσαλονίκη
τηλ. 2310 216779, 2310 245333
e-mail: giah-giap@the.forthnet.gr

ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ

Δύο μόλις χρόνια μετά την ίδρυσή του, το 1982, το ΙΗΤ διοργάνωσε το «1^ο Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας». Από τότε, το Συνέδριο αυτό έχει καθιερωθεί και αποτελεί πλέον θεσμό για τους ελληνόφωνους που ασχολούνται με το ευρύτατο αντικείμενο των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Η διοργάνωση, αφού πέρασε από όλες σχεδόν τις πόλεις που φιλοξενούν ΑΕΙ με Πολυτεχνικές Σχολές, φέτος, για πρώτη, βγήκε εκτός συνόρων και ήλθε στην Κύπρο για την 9^η διοργάνωση, κάνοντας έτσι το πρώτο βήμα για τη διεθνοποίησή του.

Το «9^ο Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας» διήρκησε δύο ημέρες, και έδωσε τη δυνατότητα, σε δύο παράλληλες συνεδριάσεις, παρουσίασης συνολικά 94 ανακοινώσεων.

Ο αναγκαστικά περιορισμένος συνολικός αριθμός ανακοινώσεων έκανε ιδιαίτερα δύσκολο το έργο της Επιστημονικής Επιτροπής του Συνεδρίου, καθώς έπρεπε να επιλέξει από ένα σύνολο 165 περιλήψεων που υποβλήθηκαν. Στις απαιτήσεις αυτού του έργου η Επιστημονική Επιτροπή ανταποκρίθηκε πλήρως, όπως τουλάχιστον προκύπτει από τα σχόλια των Συνέδρων για την επιστημονική στάθμη των ανακοινώσεων που επελέγησαν. Αναπόφευκτα, υπήρξαν και κάποιες διαμαρτυρίες, ορισμένες από τις οποίες ίσως ήταν βάσιμες, δυστυχώς όμως «ουδείς αλάνθαστος». Από τη θέση αυτή, το Διοικητικό Συμβούλιο του ΙΗΤ και ο υπογράφων προσωπικά εκφράζουν τις ιδιαίτερες ευχαριστίες τους τόσο σ' αυτούς που τίμησαν το Συνέδριο υποβάλλοντας την εργασία τους όσο και στα μέλη της Επιστημονικής Επιτροπής. Ο καθένας από τη πλευρά του συνέβαλλε στην επιτυχία του. Ζητάμε την κατανόηση των λίγων που θεωρούν ότι αδικήθηκαν, δηλώνοντας ότι προφανώς δεν υπήρχε καμία πρόθεση.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται επίσης στα μέλη της Οργανωτικής Επιτροπής και της Γραμματείας, για την επιτυχημένη διοργάνωση. Κάποιες οργανωτικές αδυναμίες ελπίζω ότι δεν αλλοιώνουν τη γενική εικόνα – άλλωστε επιλέχθηκε συνειδητά να μην εμπλακούν επαγγελματίες, ώστε να κρατηθεί το κόστος στο ελάχιστο δυνατό για να δοθεί η δυνατότητα συμμετοχής σε περισσότερους. Και φαίνεται ότι ο σκοπός αυτός επιτεύχθηκε, αφού, παρά την απόσταση, ο αριθμός των συνέδρων έφτασε τους 150.

Σημαντική για την επιτυχία του Συνεδρίου υπήρξε η οικονομική συνδρομή της Αρχής Ηλεκτρισμού Κύπρου και του οικοδεσπότη του, του Δήμου Γεροσκήπου, προς τους οποίους από τη θέση αυτή εκφράζονται θερμές ευχαριστίες.

Κλείνοντας το μικρό αυτό σημείωμα ανανεώνουμε από τώρα το ραντεβού μας για μετά από τρία χρόνια.

Θεσσαλονίκη, Μάιος 2009

Ο Πρόεδρος του ΙΗΤ

Ν. Α. Κυριάκης, καθηγητής ΑΠΘ

ΟΡΓΑΝΩΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Σωτήρης Καλογήρου	ΤΕΠΑΚ, Πρόεδρος
Νίκος Παλιός	Δήμος Γεροσκήπου
Κώστας Αναστασιάδης	Δήμος Γεροσκήπου
Χρίστος Μαξούλης	ΕΤΕΚ
Ηλίας Παπανικολάου	ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος
Γιώργος Τσιλιγκιρίδης	ΑΠΘ/ΙΗΤ

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Ν. Κυριάκης	ΑΠΘ/ΔΣ ΙΗΤ Πρόεδρος
Ν. Ανδρίτσος	Παν. Θεσσαλίας
Κ. Αξαρχή	ΑΠΘ
Δ. Ασημακόπουλος	ΕΜΠ
Γ. Γεωργίου	Παν. Κύπρου
Π. Γιανούλης	Παν. Πατρών
Χ. Δημουλιάς	ΑΠΘ
Δ. Διακουλάκη	ΕΜΠ
Α. Ζαμπανιώτου	ΑΠΘ
Σ. Καλογήρου	ΤΕΠΑΚ
Δ. Κανελλόπουλος	ΔΕΗ
Ι. Καούρης	Παν. Πατρών
Α. Καραγιαννίδης	ΑΠΘ
Κ. Κίττας	Παν. Θεσσαλίας
Α. Κοκκινάκη-Δανιήλ	ΑΠΘ
Α. Κωνσταντόπουλος	ΑΠΘ
Π. Λιανός	Παν. Πατρών
Σ. Λογοθετίδης	ΑΠΘ
Γ. Λυμπεράτος	Παν. Πατρών
Μ. Μαθιουλάκης	ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος
Δ. Μάργαρης	Παν. Πατρών
Ν. Μαρχάτος	ΕΜΠ
Ι. Μιχαηλίδης	ΤΕΠΑΚ
Γ. Μπάκος	Δ.Π. Θράκης
Κ. Μπαλαράς	Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών
Β. Μπελεσιώτης	ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος
Α. Παπαδόπουλος	ΑΠΘ
Κ. Παπακώστας	ΑΠΘ
Η. Παπανικολάου	ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος
Σ. Παισιαρδής	Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου
Ε. Σταπουντζής	Παν. Θεσσαλίας
Ι. Τρυπαναγνωστόπουλος	Παν. Πατρών
Γ. Τσιλιγκιρίδης	ΑΠΘ
Γ. Φλωρίδης	ΤΕΠΑΚ
Μ. Φυτίκας	ΑΠΘ
Γ. Χατζηγιάννης	ΙΓΜΕ
Χ. Χριστοδούλου	Frederic University
Κ. Χριστοφίδης	Παν. Κύπρου

ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ

Θεσσαλονίκη: Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής
ΤΘ 487, Πανεπιστημιούπολη ΑΠΘ, GR-541 24 Θεσσαλονίκη, Ελλάδα
Τηλ: +302310-996087, 996083, 996084, fax: +302310-996087
e-mail: IHT@eng.auth.gr

Οι πληροφορίες για το Συνέδριο βρίσκονται και στο δικτυακό τόπο του ΙΗΤ: <http://eng.auth.gr/IHT/>

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΧΑΙΡΕΤΙΣΜΟΣ

ΕΝΑΡΚΤΗΡΙΑ ΟΜΙΛΙΑ ΤΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΤΟΥ 9 ^{ου} Εθνικού Συνεδρίου <i>N. Α. Κυριάκης</i>	3
---	---

ΕΝΕΡΓΕΙΑ & ΚΤΙΡΙΟ

ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΤΗΝ ΤΥΠΟΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΧΟΛΙΚΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ <i>A. Μιχαήλ, Μ. Φωκάς</i>	7
Η ΣΟΦΙΑ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ Η ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ <i>Δ. Σεργίδη</i>	15
ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥΣ <i>N. Παπαμανώλης</i>	23
ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΑΠΟΘΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΟΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ <i>I. Θεοδωρίδου, Π. Αραβαντινού-Τζε, Α. Μ. Παπαδόπουλος</i>	29
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΑΠΟΘΕΜΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΤΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟ ΕΡΓΟ DATAMINE <i>E. Δασκαλάκη, Π. Δρούτσα, Α. Γαγλία, Σ. Κοντογιαννίδης και Κ. Μπαλαράς</i>	37
ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΑΠΟΘΕΜΑ, ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΙΩΣΗ ΡΥΠΩΝ ΣΤΟΝ ΟΙΚΙΑΚΟ ΚΑΙ ΤΡΙΤΟΓΕΝΗ ΤΟΜΕΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ - ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ <i>A. Γαγλία, Κ. Μπαλαράς, Σ. Μοιρασγεντής, Ε. Γεωργοπούλου, I. Σαραφίδης, Δ. Λάλας</i>	45
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΓΡΑΦΕΙΩΝ ΤΟΥ ΔΗΜΟΣΙΟΥ ΤΟΜΕΑ <i>Χ. Κωνσταντινίδου, Α. Δημούδη, Π. Κοσμόπουλος</i>	53
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΞΕΝΟΔΟΧΕΙΑΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ <i>Σ. Μπόεμη, Α. Μ. Παπαδόπουλος, Π. Μιχαλακάκου</i>	59
ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΜΙΑΣ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗΣ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥΣ ΜΕ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ <i>Χ. Κωστοπούλου, Δ. Αραβαντινός</i>	69
ΜΕΛΕΤΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ <i>Μ. Μ. Καρτέρης, Σ. Οξυζίδης, Μ. Μανταδάκης, Α. Μ. Παπαδόπουλος</i>	77

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΜΕ ΦΥΤΕΜΕΝΗ ΟΡΟΦΗ <i>Α. Μπαξεβάνου, Δ. Φεΐδαρος, Θ. Μπαρτζάνας, Κ. Κίττας</i>	85
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΘΗΤΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΜΕ ΦΥΤΑ <i>Α. Μπαξεβάνου, Δ. Φεΐδαρος, Α. Τζαχάνης</i>	93
Η ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΦΥΤΕΜΕΝΩΝ ΔΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΦΥΤΕΜΕΝΩΝ ΟΨΕΩΝ ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΝΗΣΟΥ ΣΤΗ Β' ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ <i>Ε. Αλεξανδρή</i>	101
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕ ΑΝΑΡΡΙΧΩΜΕΝΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ <i>Α. Ευμορφοπούλου, Κ. Κοντολέων</i>	109
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΙΟΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕ ΠΕΡΣΙΔΕΣ: ΕΠΙΡΡΟΗ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΓΡΑΦΕΙΑΚΩΝ ΧΩΡΩΝ <i>Κ. Αξαρχή, Κ. Τσικαλουνδάκη και Χ. Βαϊτση</i>	117
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗΣ ΔΩΜΑΤΟΣ <i>Α. Ανδροντσόπουλος, Ε. Κορωνάκη</i>	125
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΓΡΑΣΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΡΟΣΙΣΜΟΥ ΣΤΗ ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΛΕΜΕΣΟΥ. <i>Δ. Μπίκας, Κ. Τσικαλουνδάκη, Χ. Γιαρμά</i>	135
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΘΑΛΑΜΟ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΘΕΡΙΝΗ ΚΑΙ ΤΗ ΧΕΙΜΕΡΙΝΗ ΠΕΡΙΟΔΟ <i>Μ. Βραχόπουλος, Μ. Κούκου, Δ. Στανλάς, Β. Σταματόπουλος, Α. Γονίδης</i>	143
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΨΕΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΕΣ ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ <i>Δ. Μπίκας, Κ. Τσικαλουνδάκη, Ο. Σπύρογλου, Χρ. Γιαρμά, Μ. Παπαλεξάνδρου, Κ. Κοντολέων</i>	151
ΧΡΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΧΑΜΗΛΟΥ Η/ΚΑΙ ΜΗΔΕΝΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΩΣ ΜΕΣΟ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗΣ ΣΕ ΔΙ-ΕΠΟΧΙΑΚΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΕΙΣ <i>Δ. Χασάπης, Α. Ανδροντσόπουλος, Α. Αηδόνης</i>	159
ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΟΛΥΜΒΗΤΗΡΙΟΥ ΑΜΠΕΛΟΚΗΠΩΝ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ: ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΚΙΑΣΜΟΥ- ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ - ΟΠΤΙΚΗΣ ΑΝΕΣΗΣ <i>Κ. Αξαρχή, Α. Μερέση</i>	167
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ EN ISO 13790 ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΓΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ <i>Κ. Λάσκος, Κ. Αξαρχή</i>	175

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΒΑΘΜΟΗΜΕΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ <i>Α. Κωστούλας, Α. Τζαχάνης, Κ. Μενάγιας.....</i>	185
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ ΓΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ <i>Κ. Παπακώστας, Δ. Μπιλαδέρης, Θ. Μαυρομιμάτης, Ν. Κυριάκης</i>	193
ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΣΧΟΛΙΚΟ ΚΤΙΡΙΟ ΣΤΟ ΚΕΡΑΤΣΙΝΙ <i>Ε. Αλεξανδρή, Ν. Πανάγου, Ε. Τζανακάκη.....</i>	201
ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΚΤΙΡΙΟ ΤΟΥ ΕΘΝΙΚΟΥ ΘΕΑΤΡΟΥ ΣΤΗ ΡΟΔΟ <i>Μ. Κίκηρα, Ε. Αλεξανδρή, Α. Λαμπροπούλου, Ε. Τσελεπής, Α. Παρασκευοπούλου, Κ. Μάγος</i>	209
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΝΟΣ ΟΡΕΙΒΑΤΙΚΟΥ ΚΑΤΑΦΥΓΙΟΥ <i>Γ. Βαλσαμάκης, Β. Καραμήτσιου, Δ. Αραβαντινός.....</i>	217
Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΚΑΙΝΙΣΗΣ ΤΩΝ ΟΨΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΓΡΑΦΕΙΩΝ ΣΕ ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ <i>Χ. Κοϊνάκης, Ι. Σακελλάρης</i>	225
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ. ΠΟΛΥΚΑΤΟΙΚΙΑ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ, ΕΡΓΟ ΝΕΟΠΤΟΛΕΜΟΥ ΜΙΧΑΗΛΙΔΗ, 1959 <i>Α. Μιχαήλ, Β. Ιερείδης</i>	233

ΚΛΙΜΑ - ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΠΕ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΝΟΣ ΑΕΡΙΖΟΜΕΝΟΥ ΑΨΙΔΩΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΜΙΑΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΜΕΡΑΣ <i>Α. Μπαξεβάνου, Δ. Φεΐδαρος, Θ. Μπαρτζάνας, Κ. Κίττας.....</i>	243
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΣΤΙΚΑ ΦΑΡΑΓΓΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΟΥ ΚΑΙ ΝΕΟΔΗΜΤΟΥ ΟΙΚΙΣΜΟΥ ΜΕΣΩ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΘΕΡΙΝΗ ΠΕΡΙΟΔΟ <i>Ε. Ανδρέου, Κ. Αξαρή.....</i>	251
ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΟΜΗΜΕΝΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΑΣΤΙΚΟΥ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΟΣ <i>Π. Φωκαΐδης, Μ. Νεοφύτου</i>	259
ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΟΛΙΚΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ – ΕΞΑΓΩΓΗ ΝΕΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ <i>Ε. Μέγληρη, Π. Ζέρβας, Χ. Σαράμβης, Ι. Παλυβός, Ν. Μαρκάτος</i>	269

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ - ΑΠΕ - ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΕΙΦΟΡΟ ΤΟΥΡΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΤΑ ΝΗΣΙΑ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ

Ε. Μιγάλανα, Ι. Τρουπαναγνώστοπουλος 279

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΕΦΙΚΤΟΥ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΩΝ ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΟΙΚΙΑΚΟ ΤΟΜΕΑ

Γ. Μαρτινόπουλος, Γ. Τσιλιγκιρίδης 287

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΟΔΗΓΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΡΙΟΥ ΠΡΟΟΔΟΥ ΕΡΓΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

Σ. Ν. Μποέμη, Σ. Κοντογιάννη, Α. Καραγιαννίδης, Α. Μ. Παπαδόπουλος 295

ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ

Θ. Ζαχαριάδης 303

ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΑΠΕ ΣΤΟΝ ΟΙΚΙΑΚΟ - ΞΕΝΟΔΟΧΕΙΑΚΟ ΤΟΜΕΑ ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ

*Χ. Σιδηρόπουλος, Γ. Τσιλιγκιρίδης, Α. Πενταλιώτης, Χ. Ευρυπίδου, Κ. Παπασταύρος,
Θ. Μεσημέρης, Μ. Παπασταύρου* 311

ΑΥΞΗΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΑΠΕ ΣΕ ΝΗΣΙΩΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΣΩ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ

*Ε. Σταματάκης, Α. Τσικαλακης, Γ. Τζαμαλής, Ε. Ζουlias, Ε. Βαρθακακια, Γ. Καραλής, Π.
Κορωγιαννάκης, Ν. Χατζηαργυρίου, S. Suárez Garcíad, D. Henriquezd, M. -E. Delenta* 317

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΜΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΝΗΣΙΑ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ. ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Δ. Παπαχρήστου, Κ. Παπασταμούλος Γ. Παναγιώτου, Π. Αξιάδης 325

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ-ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Α. Αγγελής-Δημάκης, Γ. Αραμπατζής, Δ. Ασημακόπουλος 333

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ-ΟΦΕΛΟΥΣ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΛΑΔΑΣ ΚΑΙ ΚΥΠΡΟΥ

Χ. Τουρκολιάς, Δ. Διακουλάκη 341

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥΣ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΑ ΝΗΣΙΑ ΤΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ

Γ. Βικάτος, Ι. Στεφανάκης, Ι. Καλδέλλης 349

ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΣΤΕΡΕΑ ΑΦΥΓΡΑΝΤΙΚΑ ΜΕΣΑ

Γ. Πανάρας, Ε. Μαθιονιάκης, Β. Μπελεσιώτης, Ν. Κυριάκης 359

ΞΗΡΑΝΣΗ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ ΣΕ ΗΛΙΑΚΑ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΑ ΑΜΕΣΟΥ ΚΑΙ ΕΜΜΕΣΟΥ ΤΥΠΟΥ ΣΤΑ ΧΑΝΙΑ ΚΡΗΤΗΣ <i>Γ. Βουρδουμπάς, Α. Νούκα, Ε. Καρλάκη, Α. Λιαράκος, Ε. Γκρατσά</i>	367
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ/ΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΞΗΡΑΝΣΗ ΜΕ ΣΥΝΑΓΩΓΗ ΠΟΡΩΔΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΗΛΙΑΚΟ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟ <i>Χρ. Λαμνάντου, Η. Παπανικολάου, Β. Μπελεσιώτης, Ν. Κυριάκης</i>	379
ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΗΛΙΑΚΟ ΠΥΡΓΟ ΣΤΗ ΓΕΡΜΑΝΙΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΥΠΡΟ <i>Σ. Αλεξόπουλος, Μ. Χόφσμιτ</i>	387
ΠΡΟΤΑΣΗ ΓΙΑ ΣΧΕΔΙΟ ΠΡΟΤΥΠΟΥ - ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕΓΑΛΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ <i>Κ. Βορόπουλος, Ε. Μαθιουλάκης, Β. Μπελεσιώτης</i>	393
ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΗΛΙΑΚΟ ΟΙΚΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΑΙΣΘΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΒΑΡΥΝΣΗΣ <i>Ε. Μαθιουλάκης, Β. Μπελεσιώτης</i>	401
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ INPUT-OUTPUT ΣΕ ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ <i>Ε. Καλούδης, Ι. Καούρης, Ε. Μαθιουλάκης, Β. Μπελεσιώτης</i>	409
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΑΣ ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ / ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ <i>Μ. Σουλιώτης, Ι. Τρουπαναγνωστόπουλος, Σ. Καλογήρου, Γ. Φλωρίδης, Μ. Ekhrawat, Δ.Τσιπάς</i>	417
ΗΛΙΑΚΑ ΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΥΠΡΟ <i>Σ. Καλογήρου</i>	423
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ <i>Γ. Μαρτινόπουλος, Γ. Τσιλιγκιρίδης, Ν. Κυριάκης</i>	431
ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΑΕΡΑ <i>Χ. Τσιοντής, Σ. Καλογήρου</i>	439
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΜΕΓΑΛΟΥ ΚΥΒΙΣΜΟΥ <i>Ε. Καλούδης, Η. Παπανικολάου, Β. Μπελεσιώτης, Θ. Πανίδης</i>	447
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΡΟΗΣ, ΔΙΠΛΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ <i>Ι. Καούρης, Ν. Συρίμπης, Κ. Γκέτζος</i>	457
ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ	
ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕ ΧΙΟΝΟΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΙΣΧΥΡΟ ΠΑΓΕΤΟ. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ <i>Κ. Γκαράκης, Γ. Λαζάρου, Κ. Λουκίδης</i>	467

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕ ΜΕΓΑΛΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ (ΑΝΩ 1500Μ ASL) ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ <i>Δ. Σεργίδη Κ. Γκαράκης, Κ. Κατώπης, Κ. Λουκίδης, Μ. Λαζάρου</i>	475
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΘΟΥΥΒΟΥ ΣΕ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ <i>Κ. Γκαράκης, Ι. Καλδέλλης</i>	483
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΥΡΒΗΣ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΡΟΦΕΙΩΝ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ <i>Ν. Τάχος, Α. Φιλίος, Δ. Μάργαρης</i>	491
ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗ ΜΗΛΟ <i>Γ. Ρελάκης και Χ. Περάκης</i>	499
ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ - ΥΔΡΟΪΣΧΥΣ	
ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΑ ΧΑΝΙΑ ΚΡΗΤΗΣ <i>Γ. Βουρδουμπάς, Κ. Μαλακός, Ι. Σπανουδάκη</i>	509
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ <i>Ε. Μαθιουλάκης, Γ. Πανάρας, Β. Μπελεσιώτης</i>	515
ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ	
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ ΓΙΑ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ <i>Π. Πουλoupάτης, Γ. Φλωρίδης, Σ. Τάσσο</i>	525
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΟΜΑΤΑΣ ΜΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ <i>Μ. Κώστογλου, Ν. Χρυσάφης, Ν. Ανδρίτσος</i>	533
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ <i>Ν. Ανδρίτσος, Α. Αρβανίτης, Μ. Παπαχρήστου, Μ. Φυτίκας</i>	541
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ <i>Μ. Βραχόπουλος, Μ. Κούκου</i>	549
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΨΥΚΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ (VRV) ΜΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΓΕΩΕΝΑΛΛΑΚΤΗ <i>Α. Χριστοφορίδης, Σ. Ξανθόπουλος, Σ. Σπύρου</i>	557
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ ΜΕ ΖΩΝΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΟΤΗΤΑΣ <i>Κ. Τσελεπίδου, Κ. Κατσιφαράκης</i>	565

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΓΕΩΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ <i>Α. Μιχόπουλος, Ν. Κυριάκης</i>	573
---	-----

ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΙΘΑΝΟΛΗΣ ΑΠΟ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ <i>Π. Ζόλκον, Θ. Τσούτσος, Β. Γκέκας</i>	583
--	-----

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ- ΝΤΙΖΕΛ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ <i>Γ. Φονταράς, Μ. Κουνουλίδου, Ζ. Σαμαράς</i>	591
--	-----

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ ΣΤΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ <i>Β. Κουλουμπής, Θ. Τσούτσος, Θ. Ζαφείρης, Σ. Φωτεινής</i>	599
--	-----

ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΑ ΑΓΡΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ <i>Ε. Κανταρέλης, Β. Σκουλού, Α. Ζαμπανιώτου</i>	609
--	-----

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΟΞΥΛΟΥ – ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ <i>Γ. Κουφοδήμος, Β. Σκουλού, Δ. Μερτζής, Ε. Κανταρέλης, Α. Ζαμπανιώτου, Ζ. Σαμαράς</i>	615
--	-----

ΒΙΟΜΑΖΑ - ΝΕΑ ΥΛΙΚΑ

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ Η΄ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΕ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΕΣ ΧΩΡΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ <i>Α. Μαλαμάκης, Α. Καραγιαννίδης</i>	625
---	-----

ΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ, CASE STUDY Χ.Υ.Τ.Α. ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ <i>Κ. Αλιβάνης, Ι. Χατζηιορδάνη, Γ. Χατζούδης</i>	633
---	-----

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΝΕΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΛΕΚΤΙΚΗ ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΠΙΣΣΑΣ (ΠΡΟΪΟΝ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ) ΣΕ ΥΔΡΟΓΟΝΟ <i>Δ. Κωνσταντίνου, Α. Ευσταθίου</i>	639
--	-----

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCMs) – ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ & ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ PCM <i>Μ. Βραχόπουλος, Μ. Κούκου, Δ. Στανλάς, Β. Σταματόπουλος, Α. Γονίδης</i>	647
--	-----

ΥΔΡΟΓΟΝΟ - ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

ΜΕΛΕΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ <i>Π. Ζέρβας, Χ. Σαρίμβης, Ι. Παλυβός, Ν. Μαρκάτος</i>	657
---	-----

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ
ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ**

*Δ. Ιφάκης, Γ. Βεζυράκης, Κ. Κωνσταντίνου, Γ. Γιαννακούδης, Α. Ι. Παπαδόπουλος,
Χ. Ζιώγου, Σ. Βουτετάκης, Π. Σεφερλής* 665

**ΦΩΤΟΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ
ΦΩΤΟΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Μ. Αντωνιάδου, Ν. Στρατάκη, Π. Λιανός 673

**ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ
ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC)**

Ι. Χάσιος, Χ. Σαρίμβης, Π. Ζέρβας και Ν. Μαρκάτος 681

**ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ «ΠΡΑΣΙΝΟΥ»
ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΠΕ) ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ/ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ**

Χ. Χ. Χριστοδούλου, Γ. Ν. Καραγιώργης, Α. Πουλλικκάς, Ν. Καραγιώργης 689

**ΘΕΡΜΟ-ΧΗΜΙΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΥΔΡΑΤΜΩΝ ΑΠΟ ΟΞΕΙΔΟ-ΑΝΑΓΩΓΙΚΑ ΥΛΙΚΑ
ΓΙΑ ΗΛΙΑΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ**

Σ. Λορέντζου, Α. Ζυγογιάννη, Χ. Παγκούρα, Χ. Αγραφιώτης, Α. Κωνσταντόπουλος 699

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ & ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΣΤΗΛΗΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ
ΤΥΠΟΥ PEM 100 W**

Γ. Παναγιώτου, Π. Αξαόπουλος 707

**ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ - ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Ο. Ιωαννίδου, Α. Ζαμπανιώτου, Κ. Αθανασίου, Θ. Χατζηαναγούστης 715

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΥΜΑΤΩΝ

**ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ
ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ**

Α. Α. Καράμπελας, Μ. Γεωργίου, Α. Πρίφτης 725

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΚΕΡΔΟΥΣ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΗΛΙΑΚΗΣ
ΙΧΝΗΛΑΤΗΣΗΣ ΜΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

Α. Τζαχάνης, Ν. Νίνος, Κ. Κιτσάκης 733

**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΑΓΟΥ ΑΠΟ ΤΟΝ ΗΛΙΟ
ΧΩΡΙΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ**

Π. Αξαόπουλος, Μ. Θεοδωρίδης 741

ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΕ ΕΝΑ ΤΟΠΟ

*Φ. Μανροματάκης, Γ. Μακρίδης, Γ. Γεωργίου, Α. Ποτηράκης, Γ. Φραγκιαδάκης,
Ε. Δρακάκης, Ε. Κουντουμάς* 747

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΩΝ DC/AC ΣΕ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΦΒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑ- ΣΤΑΣΗΣ 20ΚWp ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ <i>Χ. Δημουλιάς, Κ. Γκουραμάνης</i>	755
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΥΨΕΛΙΔΩΝ <i>Μ.-Ι. Καϊρη, Ε. Βογιατζής, Α. Παπαθανασίου, Ι. Παλυβός, Α. Μπουντουβής</i>	765
ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ <i>Π. Θέμελης, Ι. Τρυπαναγνωστόπουλος</i>	773
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΣΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΧΩΡΟ ΚΑΙ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΚΛΙΜΑ <i>Β. Περγράκη, Α. Κοσκινάς, Γ. Γιαννόπουλος</i>	781
<i>Ευρετήριο Συγγραφέων</i>	789

ΧΑΙΡΕΤΙΣΜΟΣ

ΧΑΙΡΕΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΕΔΡΟΥ ΤΟΥ ΙΗΤ

Σας καλωσορίζω στο Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, που διοργανώνεται με πρωτοβουλία του ΙΗΤ. Στην προσπάθεια αυτή από πολύ νωρίς προσφέρθηκαν να συνδράμουν ο Δήμος Γεροσκήπου και το Επιστημονικό Τεχνικό Επιμελητήριο Κύπρου, φορείς που από τη θέση αυτή θέλω να ευχαριστήσω από καρδιάς. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Επιστήμης των Υλικών του Τεχνικού Πανεπιστημίου Κύπρου, που έθεσε υπό την αιγίδα του το Συνεδριό μας.

Η διοργάνωση αυτή είναι η 9^η κατά σειρά και αποτελεί συνέχεια μίας παράδοσης που ξεκίνησε το 1982 από τους ιδρυτές του Ινστιτούτου και έχει πλέον γίνει θεσμός. Από τη πρώτη στιγμή φάνηκε ότι καλύπτει ένα κενό και μία ανάγκη του Ελληνόφωνου επιστημονικού δυναμικού, όπως τουλάχιστον αποδεικνύουν το πλήθος των εργασιών που υποβλήθηκαν αλλά και η μεγάλη συμμετοχή στις εργασίες τούτου αλλά και όλων των Συνεδρίων που προηγήθηκαν.

Η θεματολογία του Συνεδρίου σε όλη τη μέχρι σήμερα πορεία του καλύπτει θέματα που σχετίζονται άμεσα με δύο από τα τρία σημαντικότερα προβλήματα της ανθρωπότητας στις μέρες μας, την ενέργεια και το περιβάλλον, ενώ άπτεται και του τρίτου, που δεν είναι άλλο από τη διαθεσιμότητα πόσιμου νερού. Ίσως αυτός να είναι ο λόγος της μέχρι σήμερα επιτυχημένης πορείας του.

Καλώς ή κακώς, το βιοτικό επίπεδο της σύγχρονης κοινωνίας είναι ευθέως ανάλογο της κατανάλωσης ενέργειας, και το μέγιστο μέρος της ενέργειας αυτής λαμβάνεται ακόμα και σήμερα από τα συμβατικά καύσιμα. Δημιουργούνται έτσι τα δύο σημαντικά προβλήματα που προανέφερα, αυτό της εξασφάλισης των καυσίμων – για χάρη της οποίας γίνονται ακόμα και στον 21^ο αιώνα πόλεμοι, έστω και αν προβάλλονται διάφορες άλλες, λιγότερο προκλητικές αλλά και ελάχιστα πειστικές, δικαιολογίες, και αυτό της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος κυρίως από τις διεργασίες καύσης, αλλά όχι μόνο από αυτές.

Ο επιστημονικός κόσμος μπορεί να διαφωνεί για το αν τα αποδεκτού κόστους, όπως αυτό διαμορφώνεται σε κάθε περίοδο, συμβατικά καύσιμα θα τελειώσουν σε 30, 50 ή 100 χρόνια, όλοι όμως συμφωνούν ότι κάποια στιγμή αυτό θα συμβεί! Αυτό άλλωστε λέει και η κοινή λογική!

Ο επιστημονικός κόσμος μπορεί επίσης να διαφωνεί για τη σοβαρότητα της ζημίας που έχει ήδη γίνει στο περιβάλλον και για το κατά πόσο αυτή μπορεί να αποκατασταθεί και με ποια μέτρα, όλοι όμως συμφωνούν ότι υπάρχει ζημία που θα γίνεται μεγαλύτερη κάθε μέρα που περνά αν δε ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα.

Και έτσι έρχονται στο προσκήνιο οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας!

Είναι στο σύνολό τους καθαρές, και επομένως ελαχιστοποιούν, πρακτικά μηδενίζουν, την επιβάρυνση του περιβάλλοντος – έστω κι αν κάποιοι φανατικοί οικολόγοι αυτό δεν το δέχονται και προσπαθούν να βρουν κι εδώ προβλήματα, που όμως δεν υπάρχουν, και βέβαια είναι ανανεώσιμες – δηλαδή ανεξάντλητες!

Τα βασικά τους μειονεκτήματα είναι δύο: είναι Ήπιες, δηλαδή πηγές περιορισμένης συγκέντρωσης ισχύος, και η παροχή τους δεν είναι και γενικά δε μπορεί να γίνει σταθερή. Κατά συνέπεια, οι σημερινές ΑΠΕ, από τη φύση τους, δε μπορούν να αντικαταστήσουν πλήρως τις συμβατικές. Με την έννοια αυτή δεν αποτελούν και δεν πρέπει να θεωρείται ότι μπορούν να αποτελέσουν τη λύση του ενεργειακού και κατ' επέκταση του περιβαλλοντικού προβλήματος.

Εκείνο που μπορούν και πρέπει να κάνουν είναι να συνδράμουν στη μείωση της έντασης αξιοποίησης των συμβατικών πηγών, αυξάνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής των τελευταίων και μειώνοντας ανάλογα τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις. Θα δοθεί έτσι ο απαραίτητος χρόνος στην τεχνολογία και την επιστήμη να βρει άλλους τρόπους ικανοποίησης των ενεργειακών αναγκών, τρόπους που δεν θα έχουν ημερομηνία λήξης και που θα είναι φιλικοί, ή τουλάχιστον φιλικότεροι, προς το περιβάλλον από τους σημερινούς συμβατικούς – και αναφερόμαι βέβαια κυρίως στην πυρηνική σύντηξη, που φαίνεται να μπορεί να αποτελέσει τη μόνη ανανεώσιμη πηγή με πολύ μεγάλη συγκέντρωση ισχύος.

Επειδή και τα δύο αυτά προβλήματα, το ενεργειακό και το περιβαλλοντικό, χαρακτηρίζονται από γραμμικότητες, η υποκατάσταση των συμβατικών πηγών ενέργειας σ' ένα ποσοστό της τάξης του 20 – 25% σημαίνει αυτόματα παράταση ζωής των τελευταίων κατά το ίδιο ποσοστό αλλά και πρακτικά μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης κατά το ίδιο ποσοστό.

Βεβαίως, λόγω των χαρακτηριστικών τους, οι ΑΠΕ δεν είναι κατ' ανάγκη κατάλληλες για όλες τις εφαρμογές, και αυτός είναι ο λόγος που ανέφερα ποσοστά υποκατάστασης των συμβατικών της τάξης του 20 – 25%, μέγεθος που είναι σήμερα γενικά αποδεκτό και για αυτό έχει τεθεί σαν στόχος και από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Ακριβώς όμως λόγω της ηπιότητάς τους, οι ΑΠΕ μπορούν κατ' εξοχή να συμβάλλουν στο τρίτο σημαντικό παγκόσμιο πρόβλημα, αυτό της διαθεσιμότητας πόσιμου νερού.

Ναι μεν η επιφάνεια του πλανήτη μας καλύπτεται σε ποσοστό 70% από νερό, όμως αυτό δεν είναι πόσιμο και η μετατροπή του σε τέτοιο είναι ενεργειακά δαπανηρή. Το ενεργειακό κόστος όμως, όταν η ενέργεια προέρχεται από ΑΠΕ, παύει να αποτελεί παράγοντα αποφασιστικής σημασίας. Έτσι, οι ΑΠΕ μπορούν πράγματι να συμβάλλουν στην επίλυση και του τρίτου παγκόσμιου προβλήματος, αυτού της διαθεσιμότητας πόσιμου νερού, αν όχι να αποτελέσουν τη λύση του, όπως είμαι σίγουρος ότι θα μας πει αργότερα σήμερα και η εκλεκτή προσκεκλημένη μας, η καθηγήτρια κ. Miriam Balaban!

Στην κατεύθυνση της αξιοποίησης των ΑΠΕ λοιπόν και των δυνατοτήτων τους θα συζητήσουμε αυτό το διήμερο, και ξέρω, μια και έχω δει έστω και διαγώνια όλες τις εργασίες που πρόκειται να παρουσιασθούν, ότι θα ακουστούν πολλά και σημαντικά, η αξιοποίηση των οποίων από τα κέντρα λήψης αποφάσεων αποτελεί επιτακτική ανάγκη.

Βέβαιος λοιπόν για τα θετικά και σημαντικά αποτελέσματα των εργασιών του Συνεδρίου, θέλω να σας ευχαριστήσω για την εδώ παρουσία σας. Κλείνοντας, θα μου επιτρέψετε να ευχαριστήσω όσους συνέδραμαν οικονομικά στη διοργάνωση του Συνεδρίου και βέβαια, για μία ακόμα φορά, τους συνδιοργανωτές, δηλαδή το ΕΤΕΚ και το Δήμο Γεροσκήπου και ειδικά το Δήμαρχο Τάσο Κούζουπο.

Καθηγητής Ν. Κυριάκης, Πρόεδρος ΔΣ ΙΗΤ

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΚΤΙΡΙΟ

ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΤΗΝ ΤΥΠΟΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΧΟΛΙΚΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ

A. Μιχαήλ¹, M. K. Φωκάς²

Πρόγραμμα Αρχιτεκτονικής, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Κύπρου, Καλλιπόλεως 75,
1678 Λευκωσία, e-mail: ¹ aimilios@ucy.ac.cy, ² mcphocas@ucy.ac.cy

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η θερμική άνεση, αποτέλεσμα φυσικών και ψυχολογικών παραμέτρων, αποτελεί ουσιαστικό συντελεστή άνεσης των χρηστών στον εσωτερικό χώρο. Στην περίπτωση των εκπαιδευτικών κτιρίων το επίπεδο θερμικής άνεσης προσδιορίζεται, πέρα από τη συνθετική και κατασκευαστική υπόσταση του κελύφους, από το εκπαιδευτικό σύστημα, τις λειτουργίες και ανάγκες που προκύπτουν από την ίδια την εκπαιδευτική διαδικασία. Οι τοπικές κατασκευαστικές εκφάνσεις του μοντερνισμού, σε άμεση σχέση με τον κλιματολογικά ορθολογικό σχεδιασμό, ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του '60, αποτέλεσαν το κύριο μοντέλο ανάπτυξης της εκπαιδευτικής αρχιτεκτονικής στο νησί.

Η ίδια τυπολογία, με μικρής κλίμακας αποκλίσεις, εμφανίζεται να διέπει την προσέγγιση σχεδιασμού των σχολικών κτιρίων μέχρι σήμερα. Τυπικά εκπαιδευτικά κτίρια δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης, αποτέλεσμα σχεδιασμού των Τεχνικών Υπηρεσιών του Υπουργείου Παιδείας και Πολιτισμού, διερευνούνται στην παρούσα μελέτη. Η ανοικτή δομή του σχολικού κτιρίου και ιδιαίτερα η διάταξη γραμμικού στοίχου επιτρέπει την εφαρμογή μιας σειράς από στρατηγικές ελαχιστοποίησης ενεργειακών απαιτήσεων, που αναφέρονται στα άμεσα ηλιακά κέρδη, στην ηλιοπροστασία μέσω στεγασμένων διαδρόμων, στο δροσισμό μέσω των αμφίπλευρων ανοιγμάτων και στην αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού. Στην παρούσα εισήγηση διερευνάται ο βαθμός αξιοποίησης των δυνατοτήτων αυτών.

Για την ανάλυση επιλέχθηκαν τέσσερα σχολικά κτίρια που ανήκουν σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες, όπως αυτές καθορίζονται στην Κύπρο βάσει της ευρωπαϊκής οδηγίας για την ενεργειακή επάρκεια των κτιρίων. Η συλλογή των δεδομένων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας έγινε σε περίοδο πλήρους λειτουργίας των σχολείων, σε εβδομαδιαία βάση και αναφέρεται στην θερινή περίοδο. Τα συμπεράσματα αναφέρονται στη συσχέτιση των θερμοκρασιακών και υγρασιακών δεδομένων αναλόγως της κλιματικής ζώνης και προσανατολισμού και στη διερεύνηση των στοιχείων ηλιοπροστασίας, ανοιγμάτων και άλλων γεωμετρικών στοιχείων που σχετίζονται με το σχεδιασμό της σχολικής αίθουσας.

Λέξεις κλειδιά: κλιματικές ζώνες, σχολικά κτίρια, θερμική άνεση, οπτική άνεση.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο χώρος, φυσικός ή τεχνητός, μέσα στον οποίο κινείται ένα άτομο, ασκεί σε αυτό μια συνεχή φυσική και ψυχολογική επίδραση που επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό το αίσθημα άνεσης και την ικανότητα του να ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στις συγκεκριμένες δραστηριότητες που εκτελεί [1, 2]. Το αίσθημα άνεσης στο σχολικό κτίριο συνδέεται άμεσα με τους ιδιαίτερους τρόπους χρήσης που προσδιορίζονται από το σύστημα της εκπαιδευτικής διαδικασίας, τις λειτουργίες και ανάγκες που προκύπτουν από αυτή [3, 4].

Οι σημαντικότεροι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επιδρούν στον καθορισμό της θερμικής άνεσης και οι οποίοι μπορούν να ελεγχθούν μέσω του κτιριακού περιβλήματος και των αρχιτεκτονικών επιλογών, αναφέρονται στη θερμοκρασία του χώρου, στη σχετική ταχύτητα του αέρα και στη σχετική υγρασία. Επιπλέον, η στάθμη φωτισμού αποτελεί σημαντικό παράγοντα προσδιορισμού της οπτικής αίσθησης [5,6,7,8].

2. ΤΥΠΟΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΧΟΛΙΚΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

Οι μορφές των σχολικών κτιρίων στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, ενταγμένες στο γενικότερο χαρακτήρα των δημόσιων κτιρίων της περιόδου, καθορίζονται κυρίως από τις επιδράσεις των νεοκλασικών προτύπων. Η τυπολογία χαρακτηρίζεται από τη συγκέντρωση όλων των λειτουργιών του κτιρίου σε ένα συμπαγή - εσωστρεφή όγκο, τη συμμετρική οργάνωση της κάτοψης και τη νεοκλασική διάρθρωση των όψεων.

Η εισαγωγή των ιδεών και αρχών του μοντέρνου κινήματος στην σχολική αρχιτεκτονική της Κύπρου, ιδιαίτερα από την δεκαετία του '60, επιβάλλει την αναίρεση των προηγούμενων σχεδιαστικών αρχών. Η επικράτηση της χρήσης του οπλισμένου σκυροδέματος και των σύγχρονων κατασκευαστικών μεθόδων οδήγησε στην παραγωγή ενός σημαντικού αριθμού σχολικών κτιρίων, η πλειοψηφία των οποίων διακρίνεται για το νεωτερικό τους πνεύμα, την αρχιτεκτονική τους πληρότητα και συνοχή.

Οι τοπικές κατασκευαστικές εκφάνσεις του μοντερνισμού, σε άμεση σχέση με τον κλιματολογικά ορθολογικό σχεδιασμό, αποτέλεσαν το κύριο μοντέλο ανάπτυξης της εκπαιδευτικής αρχιτεκτονικής στο νησί. Στην αρχιτεκτονική του σύλληψη, το σχολικό κτίριο εισάγεται ως σύστημα γραμμικών κτιριακών στοίχων που επιτρέπουν την δημιουργία ανοικτών ή κλειστών υπαίθριων χώρων. Η ίδια τυπολογία, με μικρής κλίμακας αποκλίσεις, εμφανίζεται να διέπει την προσέγγιση σχεδιασμού των σχολικών κτιρίων μέχρι σήμερα. Εκπαιδευτικά κτίρια, αποτέλεσμα σχεδιασμού των Τεχνικών Υπηρεσιών του Υπουργείου Παιδείας και Πολιτισμού, είναι άμεσα επηρεασμένα με τη μοντέρνα αρχιτεκτονική παραγωγή. Χαρακτηρίζονται από σημαντικές ομοιότητες, έντονη τυποποίηση και προσήλωση σε δοκιμασμένα μοντέλα οργάνωσης.

Η ανοικτή δομή του σχολικού κτιρίου και ιδιαίτερα η διάταξη του γραμμικού στοίχου επιτρέπουν την εφαρμογή μιας σειράς από στρατηγικές ελαχιστοποίησης ενεργειακών απαιτήσεων, που αναφέρονται στα άμεσα ηλιακά κέρδη, στην ηλιοπροστασία μέσω στεγασμένων διαδρόμων, στο δροσισμό μέσω των αμφίπλευρων ανοιγμάτων και στην αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού. Επιπλέον η οργάνωση των λειτουργιών σε στοίχους, επιτρέπει την εισχώρηση του φυσικού περιβάλλοντος στον πυρήνα του σχολικού κτιρίου. Η ύπαρξη των αιθριακών χώρων συμβάλλει καθοριστικά στην βελτίωση των μικροκλιματικών δεδομένων που πέρα από την ενεργειακή εξοικονόμηση, εξασφαλίζουν ευχάριστο περιβάλλον και συμβάλουν στη δημιουργία οπτικής άνεσης.

3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ

Αναγνωρίζοντας την εξάρτηση των κτιρίων από το άμεσο περιβάλλον τους και την επίδραση των εποχιακών και ημερήσιων μεταβολών των μέσο-κλιματικών δεδομένων της εκάστοτε περιοχής στο κτιριακό περίβλημα του κτιρίου, η θέση του εκάστοτε σχολείου αποτελεί καθοριστική παράμετρο στην επιλογή του δείγματος των σχολικών κτιρίων. Επιλέγονται τέσσερα σχολικά κτίρια που ανήκουν σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες (πίνακας 1), όπως αυτές καθορίζονται από την Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων 2002/91/ [9].

Η επιλογή σχολικών κτιρίων ίδιας βαθμίδας στοχεύει στην μείωση του μεγάλου αριθμού παραγόντων που επηρεάζουν τη θερμική άνεση.

Κλιματική Ζώνη	Βαθμομέρες για περίοδο θέρμανσης <20 °C	Διάρκεια περιόδου θέρμανσης <20 ⁰		Διάρκεια περιόδου ψύξης >24 ⁰		Μέση θερμοκρασία για περίοδο θέρμανσης °C	Μέση θερμοκρασία για περίοδο ψύξης °C
		ΜΗΝΕΣ	ΜΕΡΕΣ	ΜΗΝΕΣ	ΜΕΡΕΣ		
Z ₁ – Παράλια	1049	6	181	4	122	14.2	25.8
Z ₂ – Πεδινά	1231	6	181	4	122	13.2	27.2
Z ₃ – Ημιορεινά	1339	6	181	4	122	12.6	26.0
Z ₄ – Ορεινά	2033	8	242	2	62	11.6	25.2

Πίνακας 1: Κλιματικά δεδομένα ανά ζώνη.

Πηγή: Οδηγία 2002/91/EK για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων[9].

Λόγω της πολυπλοκότητας της δομής που παρουσιάζει ένα εκπαιδευτικό συγκρότημα, απαιτείται κατάτμηση σε τμήματα που αποτελούν συστατικά στοιχεία και κατά συνέπεια υποσύνολα της δομής. Μια τέτοια κατάτμηση επιτρέπει τη δημιουργία μικρότερων μοντέλων μελέτης και εξασφαλίζει συστηματικότερη διαδικασία αναλυτικής διερεύνησης. Η καταγραφή και ανάλυση της παρούσας μελέτης αναφέρεται στη διερεύνηση της σχολικής αίθουσας. Η επιλογή αυτή έγινε στηριζόμενη στον πρωτεύοντα ρόλο της, στη δομή και λειτουργία των σχολικών κτιρίων.

Τα καταγραφικά όργανα θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας HOBO Data Logger [temp / RH / light / external channel] τοποθετήθηκαν σε σχολικά κτίρια γυμνασιακής εκπαίδευσης που βρίσκονται σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες. Τοποθετήθηκαν σε αίθουσες διαφορετικών προσανατολισμών, σε ύψος 200 εκ. από τη στάθμη του εσωτερικού πατώματος. Οι χώροι αυτοί δεν κλιματίζονταν και ούτε υποστηρίζονταν μηχανικά από οποιαδήποτε ηλεκτρική συσκευή. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εισήγηση αναφέρονται στα δεδομένα που συλλέχθηκαν μεταξύ 4^{ης} Ιουνίου 0:00 h και 10^{ης} Ιουνίου 2007, 0:00 h και σε περίοδο πλήρους λειτουργίας των σχολείων και πλησίον του θερινού ηλιοστασίου (21 Ιουνίου).



εικ. 1: Γυμνάσιο Βεργίνας (Z01)



εικ. 2: Γυμνάσιο Αρχ. Μακαρίου (Z02)



εικ. 3: Γυμνάσιο Ακακίου (Z03)



εικ. 4: Γυμνάσιο Ομόδους (Z04)

Τα σχολικά κτίρια που έχουν επιλεγεί για την ανάλυση είναι το γυμνάσιο Βεργίνας Λάρνακας (κλιματική ζώνη 01 – Παράλια, με υψόμετρο 20 μέτρων από τη στάθμη της θάλασσας και με βόρειο γεωγραφικό πλάτος $35^{\circ} 55'$ και ανατολικό γεωγραφικό μήκος $33^{\circ} 35'$), το γυμνάσιο Αρχιεπισκόπου Μακάριου ΙΙΙ, (κλιματική ζώνη 02 – Πεδινά, με επίπεδο τεμάχιο με υψόμετρο 170 μέτρων από τη στάθμη της θάλασσας και με βόρειο γεωγραφικό πλάτος $35^{\circ} 08'$ και ανατολικό γεωγραφικό μήκος $33^{\circ} 23'$), το γυμνάσιο Ακακίου (κλιματική ζώνη 03 – Ημιορεινά, με υψόμετρο 240 μέτρων από τη στάθμη της θάλασσας και με βόρειο γεωγραφικό πλάτος $35^{\circ} 08'$ και ανατολικό γεωγραφικό μήκος $33^{\circ} 08'$) και το γυμνάσιο Ομόδους (κλιματική ζώνη 04 – Ορεινά, με υψόμετρο 810 μέτρων από τη στάθμη της θάλασσας και με βόρειο γεωγραφικό πλάτος $35^{\circ} 50'$ και ανατολικό γεωγραφικό μήκος $32^{\circ} 48'$) (εικ. 1- 4).

4. ΑΝΑΛΥΣΗ

4.1. ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

Οι συνθετικές αρχές του μοντερνισμού μεταφέρονται στο σχεδιασμό των σχολικών κτιρίων χωρίς ουσιαστικό προβληματισμό και ευαισθησία με αποτέλεσμα στα περισσότερα κτίρια, να επικρατεί ουδέτερη έκφραση. Η διάταξη των χώρων διδασκαλίας αποτελεί ίσως το πιο έντονο χαρακτηριστικό της οργάνωσης των τυπικών σχολικών κτιρίων. Οι αίθουσες παρατάσσονται κατά μήκος ανοικτών διαδρόμων. Σύνθεση τέτοιων στοιχείων δίνουν πιο σύνθετες κατόψεις σε σχήμα Γ, Π ή περικλειστού τετραγώνου.

Στην πλειοψηφία τους οι σχολικές αίθουσες διατάσσονται περιμετρικά από την κυρίως αυλή. Η διάταξη αυτή παρέχει εσωστρεφή χαρακτήρα με τα σχολεία να απομονώνονται λειτουργικά και οπτικά από το ευρύτερο περιβάλλον τους. Η τυπική αίθουσα διδασκαλίας έχει ορθογώνια κάτοψη, σπανιότερα τετράγωνη, και αποτελείται κατά κανόνα από δύο συνεχείς καννάβους υποστυλωμάτων και δοκαριών. Το πλάτος της αίθουσας είναι περίπου 7 μέτρα, τέτοιο ώστε να μπορεί να υποστηρίξει τρεις σειρές θρανίων. Η απόσταση μεταξύ αξόνων των υποστυλωμάτων είναι της τάξεως των 4 μέτρων με αποτέλεσμα να συναντούμε σχολικές αίθουσες ελαφρά ορθογωνικές με διαστάσεις περίπου 7x8 μέτρα και εμβαδόν περίπου 55-60 τ.μ. Το ύψος των αιθουσών διδασκαλίας κυμαίνεται από 3.00-3.20 μ.. Μικρές διαφορές στα μεγέθη παρουσιάζονται ανάλογα με το σχεδιασμό του εκάστοτε σχολικού κτιρίου, ωστόσο η λογική οργάνωσης της αίθουσας δεν διαφοροποιείται. Όσον αφορά στα ανοίγματα, αυτά εμφανίζονται, κατά κανόνα, στις δύο μεγάλες όψεις της αίθουσας με τη μια να έχει παράθυρα και την άλλη φεγγίτες.

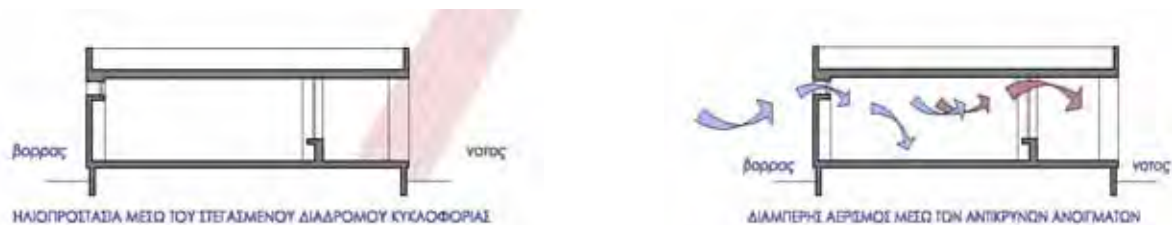
Στα σχολικά κτίρια εφαρμόζονται απλά παθητικά συστήματα με κυριότερα αυτά της εκμετάλλευσης του άμεσου ηλιακού κέρδους και της χρήσης της θερμικής μάζας. Κατά τη χειμερινή περίοδο η ηλιακή ακτινοβολία που διαπερνά τα νότια, ανατολικά και δυτικά υαλοστάσια συμβάλλει στην άνοδο της εσωτερικής θερμοκρασίας. Ποσά ενέργειας αποθηκεύονται στη μάζα του κτιριακού κελύφους και επαναποδίδονται στον εσωτερικό χώρο σε περιόδους χαμηλότερης θερμοκρασίας. Η λειτουργία της θερμικής μάζας παρέχει μείωση της θερμοκρασιακής διακύμανσης κατά την διάρκεια του εικοσιτετραώρου.

Το εξωτερικό περίβλημα των γραμμικών στοιχείων είναι σημαντικά μεγαλύτερο για δεδομένο όγκο, συγκριτικά με συμπαγείς μορφές κτιρίων. Η μεγάλη έκθεση του περιβλήματος προς το εξωτερικό περιβάλλον, δημιουργεί απαιτήσεις κατάλληλων θερμομονώσεων και κατασκευαστικών λεπτομερειών. Στα σχολεία που εξετάστηκαν, όπως και στη μεγάλη πλειοψηφία των σχολικών κτιρίων δεν παρέχεται θερμομονωτική προστασία.

Η ηλιοπροστασία των υαλοπετασμάτων και η αποφυγή υπερθέρμανσης του χώρου κατά τη θερινή περίοδο εξασφαλίζεται μέσω των στεγάστρων ή άλλων στοιχείων ηλιοπροστασίας. Οι στεγασμένοι διάδρομοι στην ανατολή και στη δύση (στοίχοι στον άξονα βορά – νότου) προσφέρουν ικανή ηλιοπροστασία κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Ο φυσικός φωτισμός στις αίθουσες διδασκαλίας εξασφαλίζεται μέσω των εξωτερικών παραθύρων και των φεγγιτών. Η γραμμική διάταξη των αιθουσών διδασκαλίας παρέχει την δυνατότητα για ύπαρξη ανοιγμάτων στις δύο μεγάλες πλευρές της αίθουσας, εξασφαλίζοντας στις πλείστες περιπτώσεις ικανοποιητικά επίπεδα φωτισμού.

Η ανοικτή δομή του τυπικού σχολικού κτιρίου και ιδιαίτερα η διάταξη γραμμικού στοίχου που επιτρέπει την αμφίπλευρη ύπαρξη ανοιγμάτων σε όλες ανεξαρτήτως τις αίθουσες διδασκαλίας, εξασφαλίζει φυσική ροή αέρα διαμέσου των χώρων. Η δυνατότητα αυτή παρέχει στους χώρους διαμερή αερισμό και δροσισμό κατά τους θερινούς μήνες με αποτέλεσμα τη βελτίωση των θερμικών συνθηκών. Επιπλέον πρέπει να αναφερθεί ότι η ύπαρξη στεγάστρου στη προσήνεμη πλευρά του κτιρίου, ευνοεί τον βελτιώτερο δροσισμό, με την αύξηση της ταχύτητας ροής του αέρα. (εικ.5)

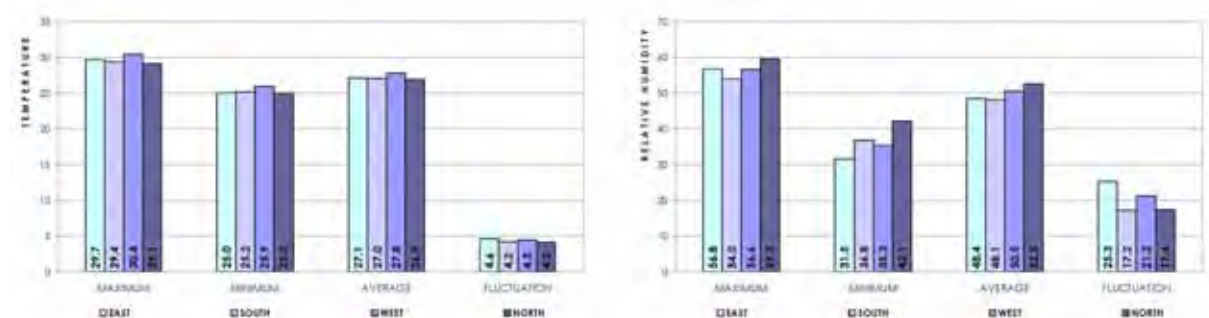


εικ. 5: Βιοκλιματική λειτουργία αιθουσών διδασκαλίας.

Από την αξιολόγηση των παραπάνω στοιχείων που συντελούν στον καθορισμό της θερμικής άνεσης, προκύπτει ότι ο νότιος προσανατολισμός, εμφανίζει συγκριτικά πλεονεκτήματα ως προς τους υπόλοιπους προσανατολισμούς. Το παραπάνω υποστηρίζεται κυρίως ως προς τη σημαντική του συνεισφορά στην αξιοποίηση του άμεσου ηλιακού κέρδους και της θερμικής μάζας του κτιρίου. Προϋπόθεση αποτελεί η κατάλληλη και συστηματική ηλιοπροστασία των ανοιγμάτων καθώς επίσης και ο διαμερή αερισμός των αιθουσών.

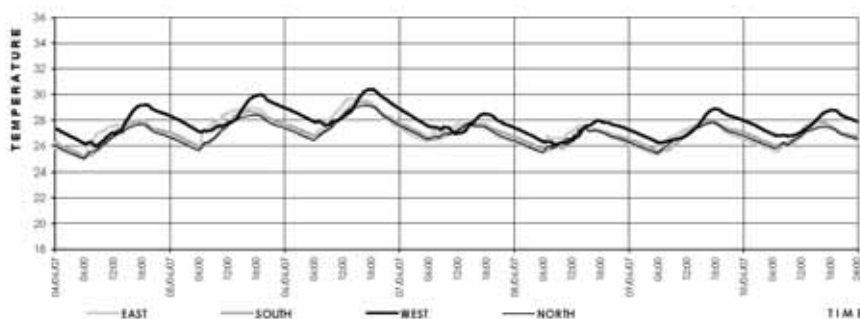
4.2. ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Από τις γραφικές παραστάσεις μέσης θερμοκρασίας και μέσης σχετικής υγρασίας ανά προσανατολισμό όλων των κλιματικών ζωνών, μπορούμε να εξαγάγουμε συμπεράσματα που σχετίζονται με την μεταβολή των τιμών εντός του 24ώρου (εικ. 6α,β).



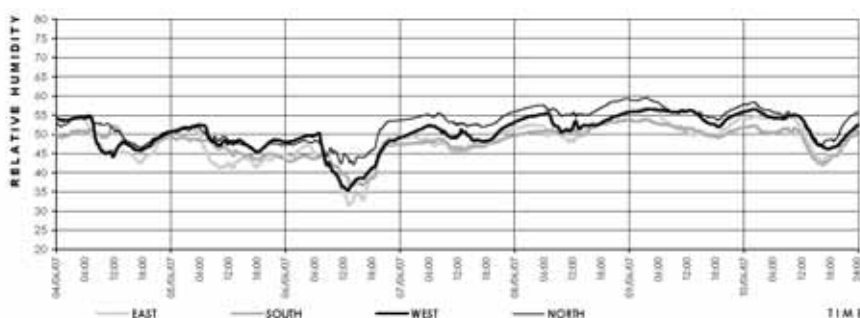
εικ. 6α,β: Συγκριτική παρουσίαση μέσης θερμοκρασίας και μέσης σχετικής υγρασίας για τις τέσσερις κλιματικές ζώνες.

Οι υψηλότερες μέσες θερμοκρασίες εμφανίζονται στη δύση και οι χαμηλότερες στο βορρά. Οι τιμές σε ανατολικό και νότιο προσανατολισμό είναι περίπου όμοιες. Μέγιστες θερμοκρασίες εμφανίζονται κατά τις μεσημβρινές ώρες, από τις 14:00 μέχρι τις 18:00. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μετακίνηση της χρονικής εμφάνισης των μέγιστων τιμών ανά προσανατολισμό. Εξετάζοντας τις τιμές που έχουν καταγράψει στις 6 Ιουνίου 2007, παρατηρούμε ότι μέγιστη μέση τιμή θερμοκρασίας για ανατολικό προσανατολισμό εμφανίζεται στις 14:20 (29,7 °C) για νότιο στις 15:40 (29,4 °C) και δυτικό στις 18:00 (30,4 °C). Η μέγιστη μέση θερμοκρασία για το βόρειο προσανατολισμό παρατηρείται στις 17:00 μ.μ. (29,1 °C). Μέσες Ελάχιστες θερμοκρασίες κατά την διάρκεια τις ίδιας μέρας καταγράφονται στις 06:00 (περίπου 26,6 °C) με εξαίρεση στο δυτικό προσανατολισμό όπου η ελάχιστη τιμή είναι υψηλότερη κατά 1°C (27,6 °C) και εμφανίζεται στις 08:20. Η μικρή διακύμανση των θερμοκρασιών κατά την διάρκεια του 24ωρου (μεταξύ 2,6 και 3,0 °C) είναι αποτέλεσμα της συμπαγούς κατασκευής (> 400 kg/m²) και κατά συνέπεια της αυξημένης θερμικής αδράνειας των κτιρίων. (εικ. 7)



εικ. 7: Μέση θερμοκρασία στις τέσσερις κλιματικές ζώνες.

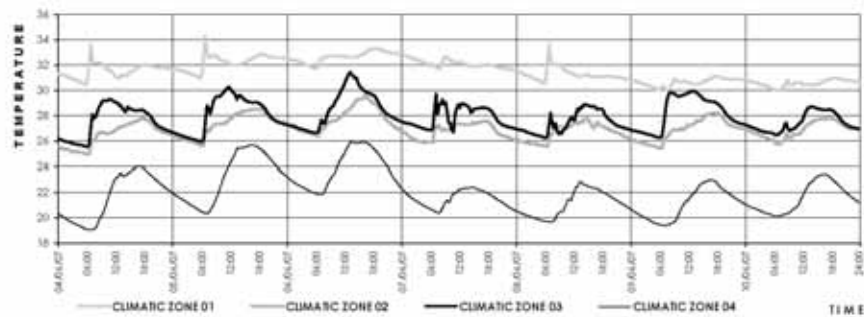
Περίπου όμοια μέση σχετική υγρασία παρατηρείται σε ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό, 49,5 RH% και 49,3 RH% αντίστοιχα. Χαμηλότερη μέση σχετική υγρασία εμφανίζεται στον ανατολικό προσανατολισμό με τιμή στις 31,5 RH%. Η ημερήσια διακύμανση κατά την διάρκεια της 6^{ης} Ιουνίου 2007 είναι περίπου 12 RH% με εξαίρεση τον ανατολικό προσανατολισμό όπου η ημερήσια διακύμανση φτάνει τις 18 RH%. Μέγιστες τιμές σημειώνονται κατά τις βραδινές ώρες (μεταξύ 23:00 h και 24:00 h), ενώ οι ελάχιστες μεταξύ των μεσημβρινών ωρών 13:00 και 14:20, υποδεικνύοντας αντιστρόφως ανάλογη σχέση θερμοκρασίας και υγρασίας (εικ. 8).



εικ. 8: Μέση σχετική υγρασία στις τέσσερις κλιματικές ζώνες.

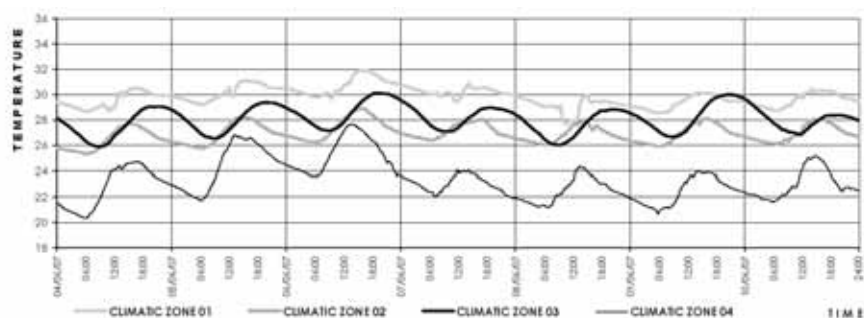
Όσον αφορά στις μέσες θερμοκρασίες για ανατολικό προσανατολισμό, παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις ανάλογα με την κλιματική ζώνη. Υψηλότερη μέση θερμοκρασία για ανατολικό προσανατολισμό εμφανίζεται στην κλιματική ζώνη 01 με 33,3 °C, 7,3 °C υψηλότερα από την μέση θερμοκρασία στην κλιματική ζώνη 04 (26,0 °C). Η μέση

θερμοκρασία για ανατολικό προσανατολισμό στις κλιματικές ζώνες 02 and 03 βρίσκεται στους 29,6 και 31,4 °C αντίστοιχα. Η διακύμανση για την περίοδο καταγραφής κυμαίνεται από 3,0 °C στην KZ 01 μέχρι 6,5 °C στην KZ 04. (εικ. 9)



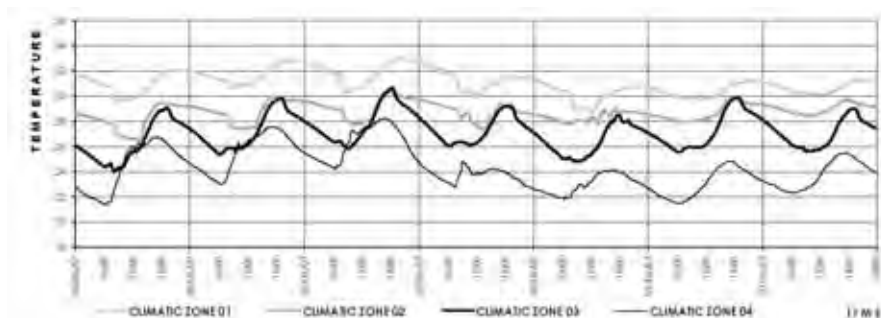
εικ. 9: Θερμοκρασιακά δεδομένα για ανατολικό προσανατολισμό.

Για νότιο προσανατολισμό υψηλότερη μέση θερμοκρασία εμφανίζεται επίσης στην κλιματική ζώνη 01 με 31,9 °C και χαμηλότερη στην κλιματική ζώνη 04 με 27,7 °C. Η μέση θερμοκρασία στις κλιματικές ζώνες 02 και 03 στο νότιο προσανατολισμό βρίσκεται στους 28,9 και 30,1 °C αντίστοιχα. Η διαφορά μεταξύ υψηλότερης και χαμηλότερης μέσης θερμοκρασίας στο νότιο προσανατολισμό είναι 4,2 °C. Η διακύμανση για την περίοδο καταγραφής κυμαίνεται από 3,2 °C στην KZ 01, μέχρι 6,8 °C στην KZ 04. (εικ. 10)



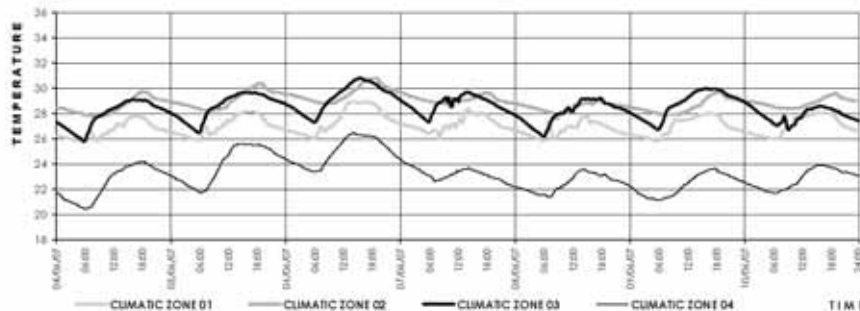
εικ. 10: Θερμοκρασιακά δεδομένα για νότιο προσανατολισμό.

Για δυτικό προσανατολισμό υψηλότερη μέση θερμοκρασία παρατηρείται στην κλιματική ζώνη 01 με 33,1 °C, στην κλιματική ζώνη 02, 30,3 °C, στην κλιματική ζώνη 03, 30,7 °C, και στην κλιματική ζώνη 04, 28,3 °C. Η διαφορά μεταξύ υψηλότερης και χαμηλότερης μέσης θερμοκρασίας στο δυτικό προσανατολισμό είναι 4,8 °C. Η διακύμανση για την περίοδο καταγραφής κυμαίνεται από 2,6 °C στην KZ 02, μέχρι 6,2 °C στην KZ 04. (εικ. 11)



εικ. 11: Θερμοκρασιακά δεδομένα για δυτικό προσανατολισμό.

Στις μέσες θερμοκρασίες για βόρειο προσανατολισμό, παρατηρούνται μικρότερες διαφοροποιήσεις λόγω κλιματικής ζώνης. Υψηλότερη μέση θερμοκρασία εμφανίζεται στις κλιματικές ζώνες 02 και 03 με 30,8 °C. Η μέση θερμοκρασία για την κλιματική ζώνη 01 βρίσκεται στους 28,9 °C. Η κλιματική ζώνη 04, έχει τη χαμηλότερη μέση θερμοκρασία για βόρειο προσανατολισμό με 26,5°C, όπως άλλωστε και σε όλους τους προσανατολισμούς. Η διακύμανση για την περίοδο καταγραφής κυμαίνεται από 3,5 °C στη KZ 01, μέχρι 5,0 °C στη KZ 04 (εικ. 12).



εικ. 12: Θερμοκρασιακά δεδομένα για βόρειο προσανατολισμό.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση των δεδομένων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας που λήφθηκαν από επιλεγμένες αίθουσες διδασκαλίας σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες και σε διαφορετικούς προσανατολισμούς, αποδεικνύουν την σχέση των κλιματικών δεδομένων του εκάστοτε περιβάλλοντος και την καθοριστική σημασία του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού και κατασκευαστικών μεθόδων ως προς την επίτευξη θερμικής άνεσης στο εσωτερικό των κτιρίων.

Ολοκληρωμένη καταγραφή θερμοκρασιών και υγρασιών θα αναφερόταν και στις δύο ακραίες περιόδους. Μετρήσεις καθ'όλη τη διάρκεια του έτους θα δώσουν τη δυνατότητα πληρέστερης τεκμηρίωσης της θερμικής συμπεριφοράς των κτιρίων. Επιπλέον η ερευνα μπορεί να αναπτυχθεί προς την ποσοτική καταγραφή του επιπέδου του φυσικού φωτισμού, συγκεντρώσεων CO₂ και επιπέδου στάθμης ήχου. Τα επιπλέον δεδομένα θα επιτρέψουν την πληρέστερη αξιολόγηση του επιπέδου άνεσης και θα αποτελέσουν την βάση για σύνταξη προτάσεων βελτιστοποίησης των συνθηκών διαβίωσης στις αίθουσες διδασκαλίας και την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απαιτήσεων σε αυτές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Canter D., Environmental Social Psychology. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, 1988.
2. Gifford R., Environmental Psychology. University of Victoria, Boston, 1997.
3. Germanos D., Educational Space and Education. Gutenberg, Athens, 2002, in Greek.
4. Dudek M., Architecture of Schools. Weinstein C.S. Educational environmental psychology, Architectural Press, Oxford, 2000.
5. Fanger P.O., Thermal Comfort. McGraw-Hill Book Company, New York, 1973.
6. Givoni, B., Man, Climate and Architecture. Applied Science Publishers, London, 1976.
7. Givoni, B., Passive and Low Energy Cooling of Buildings. Reinhold, New York, 1994.
8. Markus T.A., Morris E.N., Buildings, Climate and Energy. Pitman, London, 1980.
9. Οδηγία 2002/91/EK για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων, Υπηρεσία Περιβάλλοντος, Υπουργείο Εμπορίου, Βιομηχανίας & Τουρισμού, Λευκωσία, 2007.

Η ΣΟΦΙΑ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ Η ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Δρ. Δέσποινα Σεργίδη

Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών/Τοπογράφων Μηχανικών &
Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Τ. Κ. 50329, 3603 Λεμεσός, Κύπρος
Email: Despina.Serghides@cut.ac.cy

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η λαϊκή ιδιωματική αρχιτεκτονική έχει εξελιχθεί κατά τη διάρκεια πολλών ετών για να εξετάσει τα προβλήματα που ενέχονται στην κατοικία. Μέσω μιας διαδικασίας της δοκιμής και του λάθους οι προκάτοχοί μας έχουν εξεύρει τρόπους να αντιμετωπίσουν τα άκρα του κλίματος. Η επιρροή των δυτικών πολιτισμών είναι εντούτοις, διάχυτη. Η τάση προς ένα διεθνοποιημένο ύφος του κτηρίου οδηγεί σε μείωση των παραδοσιακών λύσεων, οι οποίες έχουν εξυπηρετήσει διάφορους πολιτισμούς καλά για πολλούς αιώνες.

Φυσικά, και σωστά οι άνθρωποι επιζητούν ολοένα και ψηλότερα επίπεδα άνεσης και ποιότητας στα κτήρια. Τέτοια πρότυπα μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση των σύγχρονων συστημάτων κλιματισμού, τα οποία είναι ακριβά σε αρχικό κόστος, και είναι πολύ ενεργοβόρα μακροπρόθεσμα.

Είναι δυνατό να εξασφαλισθούν τα πρότυπα άνεσης που απαιτούνται με την προσεκτική χρήση των παραδοσιακών τεχνικών θερμικού ελέγχου. Τα πλεονεκτήματα είναι σαφή, υπάρχει μια δραματική μείωση των ενεργειακών αναγκών και μια αυξανόμενη χρήση του αρχιτεκτονικού ύφους με τον οποίο οι άνθρωποι αισθάνονται άνετα. Αυτό δεν σημαίνει ότι οι αρχιτέκτονες και οι σχεδιαστές πρέπει να πιθηκίσουν τους τρόπους του παρελθόντος. Τα σύγχρονα υλικά, η τεχνολογία υπολογιστών και οι καινοτόμες τεχνικές κατασκευής πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην αναζήτηση της αποδοτικότητας και της οικονομικής αποτελεσματικότητας στα κτίρια. Εντούτοις, το να αγνοήσουμε την αρχιτεκτονική κληρονομιά μας είναι επικίνδυνο και να μην λαμβάνουμε υπόψη τη συσσωρευμένη σοφία του παρελθόντος είναι στην καλύτερη περίπτωση κακο-πληροφόρηση και στη χειρότερη αλαζονεία.

Αυτή η παρουσίαση θα εξετάσει τις παραδοσιακές μορφές ιδιωματικής, παραδοσιακής αρχιτεκτονικής στη Μεσόγειο και θα εξηγήσει πώς ο σχεδιασμός δημιουργεί ένα κατάλληλο εσωτερικό περιβάλλον. Οι σύγχρονες και εξελισσόμενες μορφές θα αναλυθούν για να δείξουν πώς οι σύγχρονες τεχνικές εξετάζουν τα προβλήματα του θερμικού ελέγχου. Τελικά οι συγκρίσεις θα γίνουν για να καθορίσουν εάν τα παθήματα μπορούν να γίνουν μαθήματα. Οι συγκρίσεις θα γίνουν από τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις μελέτες βελτιστοποίησης των σύγχρονων σπιτιών, μέσα από ένα ευρύ φάσμα σχεδιαστικών προσεγγίσεων και της χρήσης των φυσικών πηγών ενέργειας για την επίτευξη εσωτερικής θερμικής άνεσης.

Για τις μελέτες βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκαν η δυναμική έκδοση του προγράμματος «SERI-RES» και «η μέθοδος 5000».

Η διάλεξη θα διανθιστεί και θα διευκρινιστεί εκτενώς με εικονογραφίες.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προστασία από δυσμενείς καιρικές συνθήκες και η εξασφάλιση άνετου μικροκλίματος είναι από τους βασικούς στόχους της αρχιτεκτονικής. Η Μεσογειακή παραδοσιακή αρχιτεκτονική εξελίχθηκε με το να δημιουργεί κτίρια που να είναι σε αρμονία με τα δυσμενή κλίματα των διαφόρων περιοχών της.

Στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική ο μηχανισμός της εσωκλιματικής ρύθμισης ήταν ενσωματωμένος στο κτίριο. Η τοπογραφική διάταξη, η κατασκευή, η μορφολογία ακόμη και η διάταξη και χρήση των εσωτερικών χώρων συμμετείχαν στη λειτουργία του μηχανισμού. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της φάσης στις διάφορες περιοχές της Μεσογείου δίνει η ανώνυμη αρχιτεκτονική και πολεοδομία των παραδοσιακών οικισμών. Σε δυσμενή όμως κλίματα τα σχεδιαστικά πρότυπα της ανώνυμης αρχιτεκτονικής, σε συνδυασμό με τους άλλους περιορισμούς και απαιτήσεις που την κατεύθυναν, έδιναν μόνο γενικευμένη λύση στο πρόβλημα και οι εσωτερικές συνθήκες απείχαν σημαντικά από τις σημερινές απαιτήσεις άνεσης. Έτσι, δημιουργήθηκαν οι προϋποθέσεις για την ενεργοβόρα μηχανική φάση της θέρμανσης και του κλιματισμού που προώθησε η βιομηχανοποίηση της παραγωγής ενέργειας από το 19ο αιώνα. Στη συνέχεια, οι γρήγορες και θεαματικές εξελίξεις στη τεχνολογία των εγκαταστάσεων θέρμανσης και κλιματισμού, καθώς και άλλες τεχνικές καινοτομίες, οι διεθνείς επιδράσεις, συμπεριλαμβανομένου και του τουρισμού, έχουν μετατοπίσει την αρχιτεκτονική μακριά από τις σοφές παραδοσιακές αξίες και αρχές. Ενώ οι παραδοσιακές μεσογειακές κατοικίες παρείχαν καταφύγιο από ακραίες κλιματολογικές συνθήκες με διάφορους τρόπους χωρίς να καταναλώνουν πάρα πολλή ενέργεια, η μηχανοποίηση και η διεθνοποίηση επέφεραν απάρνηση των δοκιμασμένων μεθόδων και η έλλειψη γνώσεως φυσικής του κτιρίου απογύμνωσε την κατασκευή από τις βασικές της λειτουργίες και άφησαν το κτίριο στο έλεος του κλίματος. Τα μοντέρνα κτίρια έχουν γίνει κλιματικά ανίκανα. Οι συσκευές κλιματισμού έχουν αντικαταστήσει το φυσικό δροσισμό και αυτό επέφερε υψηλή κατανάλωση ενέργειας [1].

Η υποταγή της αρχιτεκτονικής στη μηχανή αφήνει μέχρι σήμερα άλυτα τα προβλήματα της εξασφάλισης βασικών συνθηκών άνεσης. Προβλήματα κόστους, λειτουργίας και συντήρησης των μηχανολογικών εγκαταστάσεων, με προεξέχον το πρόβλημα της ενεργειακής υπερκατανάλωσης. Στις ανεπτυγμένες χώρες τα κτίρια κατέληξαν να απορροφούν τεράστιο ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας που φθάνει και το 50% της πρωτογενούς συνολικής ενέργειας (Βρετανία).

Σήμερα που υπάρχει στενότητα στις πηγές καυσίμων, είναι απαραίτητο όπως και τα σύγχρονα κτίρια παρέχουν το στόχο του καταφυγίου από τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες με την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Υπάρχει σήμερα ένας τεράστιος όγκος τεχνικών πληροφοριών, και όμως τα σύγχρονα σπίτια μας είναι συνήθως λιγότερο άνετα από τα παραδοσιακά.

Μια αναδρομική εξέταση της παραδοσιακής αρχιτεκτονικής είναι απαραίτητη για να εντοπίσουμε τους τρόπους με τους οποίους οι πρόγονοί μας αντιμετώπιζαν τα προβλήματα του θερμικού σχεδιασμού, και μέσα στα πλαίσια του τρόπου ζωής τους και με τα εργαλεία και τις τεχνικές που είχαν στη διάθεση τους. Είναι επίσης σημαντικό να κατανοήσουμε τις διαφορές μεταξύ της σημερινής προσέγγισης και αυτής των παραδοσιακών αρχιτεκτόνων.

Αυτή η εισήγηση περιγράφει τις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές λύσεις στις ακραίες κλιματικές συνθήκες στη Κύπρο και τις συγκρίνει με σύγχρονες προσεγγίσεις, δείχνοντας ότι μπορούμε να πάρουμε μαθήματα από το παρελθόν.

2. Η ΑΡΧΕΤΥΠΗ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗ ΚΑΤΟΙΚΙΑ

Η παραδοσιακή Κυπριακή αρχιτεκτονική είναι δύσκολο να καθοριστεί και να ερμηνευτεί. Όπως η γη από την οποία αναδύεται αντανakλά τον ποικιλόμορφο τρόπο ζωής των κατοίκων της και τη διαθεσιμότητα των υλικών και των πόρων της κάθε περιοχής.

Η εδαφική ποικιλία (πεδιάδες, λόφοι, βουνά, παραλίες) δημιούργησε και μια ποικιλία αναγκών, δομικών υλικών και ως συνέπεια, μορφών δόμησης. Η μακρά πείρα των τοπικών οικοδόμων και η αφοσίωση τους στη παράδοση, μαζί με την ικανότητα τους να δέχονται και να αφομοιώνουν τις ξένες πολιτιστικές προτιμήσεις, αντανakλώνται στην ποικιλία κατοικιών τις οποίες συναντούμε στη μεσόγειο.

Συγκεκριμένα, καθώς μελετούμε την εξέλιξη της παραδοσιακής, ιδιωματικής κυπριακής αρχιτεκτονικής, βλέπουμε να διαφαίνεται μια αρχετυπική μορφή ως το απλούστερο βασικό καταφύγιο των Κυπρίων [2]. Η βασική αυτή μορφή στέγασης, είναι ένα ενιαίο, μακρύ, ορθογώνιο κτίριο του ενός δωματίου, το «μακρινάρι». Οι διαχωρισμοί αυτού του δωματίου (το «δίχωρο»), η προσθήκη του Portio, του «ηλιακού», και άλλων δωματίων, μαζί με το προαύλιο, ανέπτυξε τη διάταξη του χώρου σε διάφορους σχηματισμούς οι οποίοι αλληλοσχετίζονταν με το συγκεκριμένο τρόπο ζωής, τις ανάγκες, τις κλιματικές συνθήκες και την τοπογραφία [3].

3. ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΑ ΚΤΙΡΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ – ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΕΣΩΚΛΙΜΑΤΟΣ

3.1. Ο ΗΛΙΑΚΟΣ ΚΑΙ Η ΑΥΛΗ – ΘΕΜΕΛΙΑΚΑ ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ο Ηλιακός (το λιακωτό) και το προαύλιο, ή η εσωτερική αυλή αποτελούν θεμελιακά παραδοσιακά κτίσματα θερμικού ελέγχου των οικοδομών, τα οποία κατοπτρίζουν τη σοφία της παραδοσιακής Μεσογειακής αρχιτεκτονικής.

Στις χώρες της Μεσογείου και τις περιοχές με θερμά κλίματα, στις οποίες ο ήλιος είναι επιθυμητός το χειμώνα ενώ το καλοκαίρι είναι αναγκαίος ο δροσισμός και ο αερισμός, ο ηλιακός κι η εσωτερική αυλή αποτελούν απαραίτητα ηλιακά συστατικά των σπιτιών και μοναδικά στοιχεία της τοπικής αρχιτεκτονικής.

Και τα δύο συστατικά παρόλο που είναι υπαίθριοι ανοικτοί χώροι του κτιρίου, είναι κεντρικά στοιχεία γύρω από τα οποία συντίθενται οι διάφορες δραστηριότητες όλων των άλλων χώρων, ανεξάρτητα αν το σπίτι βρίσκεται στα πεδινά ή στα ορεινά, στο χωριό ή στην πόλη. Τα συστατικά αυτά αποτελούν την καρδιά της κατοικίας από άποψη χώρου, από κοινωνική και περιβαλλοντική άποψη.

Είναι σημαντικά αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά και δείχνουν την ενστικτώδη προσέγγιση στον παθητικό ηλιακό σχεδιασμό που συνέβαλε στη διαμόρφωση του κλίματος στο μεσογειακό σπίτι. Η διάταξη τους ανελίχθηκε φυσιολογικά από τις κλιματολογικές συνθήκες, τις ανάγκες της οικογένειας και την κοινωνική δομή της κοινότητας. Πάντα τα δύο βρίσκονται το ένα πλάι στο άλλο και επενεργούν σαν χώροι διαμετακόμισης και συνδέουν την εξωτερική με την εσωτερική διάταξη της οικοδομής. Αποτελούν προεκτάσεις της κατοικίας προς τα έξω και ταυτόχρονα προεκτάσεις του εξωτερικού χώρου προς τα μέσα. Η μορφή της λειτουργίας τους ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή, ακόμη και από τοποθεσία σαν έκφραση της αισθητικής ανταπόκρισης τους στις ποικίλες επενεργούσες παραμέτρους. Οι ηλιακοί και οι αυλές έχουν διάφορες χρήσεις στην τοπική αρχιτεκτονική, που ποικίλλουν και αυτές ανάλογα με την περιοχή, την τοποθεσία, τις κλιματικές συνθήκες και τη δομή της οικονομίας [4].

Σε συντομία η μελέτη αυτή θα εξετάσει τους παραδοσιακούς τύπους ηλιακών και αυλών στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική της Κύπρου και θα επεξηγήσει πως αυτά δημιουργούν το κατάλληλο περιβάλλον μέσα από την ποικιλία του σχεδιασμού τους και την αξιοποίηση των φυσικών πόρων ενέργειας τόσο για το χειμώνα όσο και για το καλοκαίρι [5, (1)].

A. ΧΕΙΜΩΝΑΣ

Ο σχεδιασμός των αυλών και των ηλιακών ποικίλλει ανάλογα με το βαθμό και τη συχνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, των ανέμων, της βροχής και της χιονόπτωσης.

α. Πρόσβαση στον Ήλιο

Στα παλιά σπίτια κύρια φροντίδα της αυλής και του ηλιακού ήταν η διασφάλιση της ιδιωτικότητας του ιδιοκτήτη και ταυτόχρονα η παροχή καλών συνθηκών για πρόσβαση στον ήλιο στη νότια όψη. Η διαμόρφωση σπιτιών με αυλή και ηλιακό αποτελεί σημαντική επινόηση για την επίτευξη του σκοπού αυτού. Εντούτοις οι αναλογίες και των δύο στοιχείων μπορούν να διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο στην ηλιακή πρόσβαση.

Εκεί που η αυλή είναι προσανατολισμένη προς το νότο ενεργεί σαν χώρος ηλιασμού που δέχεται την επιθυμητή ηλιακή ακτινοβολία το χειμώνα.

Η έκταση του καλύμματος του ηλιακού επιτρέπει στις ακτίνες του ήλιου του χειμώνα να το διαπερνούν και έτσι μπορεί να αξιοποιείται η ηλιακή ακτινοβολία του χειμώνα. Γι' αυτό το λόγο οι ηλιακοί στις ορεινές περιοχές μετακινούνται σε πιο ψηλά επίπεδα για καλύτερη χειμερινή αξιοποίηση του ήλιου.

β. Αξιοποίηση του Ήλιου με κατάλληλη διάρθρωση του ηλιακού και της αυλής σε συνδυασμό με εσωτερική μάζα σε στοιχεία όπως σε πετρόκτιστες σκάλες, με λίμνες, πλακόστρωτα για αποθήκευση και αξιοποίηση του ήλιου.

γ. Εμπόδιο Προφύλαξης από Ανέμους και Ψυχρά Ρεύματα

Εκεί που η αυλή και ο ηλιακός είναι εστραμμένα προς πλευρές εκτεθειμένες και προσβλητές το χειμώνα, επενεργούν σαν εμπόδιο προφύλαξης για το κυρίως κτίσμα με τη δημιουργία απάνεμων γωνιών προστατευμένων από ψυχρούς ανέμους και χαμηλές θερμοκρασίες.

- **Περιβάλλοντα Κτίσματα.** Τα κτίσματα που περιβάλλουν την αυλή την προστατεύουν από ψυχρούς ανέμους, το ύψος τους εντούτοις καθορίζει τη δημιουργία ή όχι στροβιλισμού μέσα στην αυλή.
- **Δενδροφύτευση.** Η βλάστηση και οι προστατευτικοί φράχτες σε μορφή ανεμοθραύστη του ανέμου, παρεμποδίζουν τους ψυχρούς ανέμους του χειμώνα ή τουλάχιστον μειώνουν την ταχύτητά τους και κατ'ακολουθία και την απώλεια θερμότητας από το κτίριο. Η φύτευση στις εκτεθειμένες όψεις αμβλύνει τις επιρροές των δυσμενών κλιματικών εναλλαγών [5 (ii)].

B. ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ

Η αυλή και ο ηλιακός αποτελούν στοιχείο κλειδί στο σχεδιασμό του κτιρίου. Με την ποικιλία των θερμικών μορφών και του σχεδιασμού τους μετριάζουν τις ψηλές θερμοκρασίες του καλοκαιριού. Η προσεγμένη κατασκευή τους σε συνδυασμό με το περιβάλλον του τοπίου μετριάζουν τις θερμοκρασίες γύρω από το κτίριο. Οι πιο συχνοί τρόποι είναι :

α. Εξάτμιση. Στις ξηρές περιοχές της Μεσογείου, όπως η Κύπρος, είναι απαραίτητη η εξάτμιση για επίτευξη ύγρανσης της ατμόσφαιρας και δημιουργία άνετων συνθηκών. Τούτο επιτυγχάνεται με το ράντισμα με νερό στους τοίχους του ηλιακού και της αυλής όπως και στη βλάστηση που το περιβάλλει.

- **Στο Έδαφος.** Φυσικές επικαλύψεις της αυλής όπως γρασίδι και άλλα φυτά μετριάζουν τις ψηλές καλοκαιρινές θερμοκρασίες και προάγουν δροσερή ατμόσφαιρα με την εξάτμιση.
- **Πίδακες, σιντριβάνια και Λίμνες.** Η διαμόρφωση αυλών με σιντριβάνια και πίδακες, προσφέρουν ευχάριστους δροσερούς εξωτερικούς χώρους που με την εξάτμιση νερού ωφελούν τους παρακείμενους εσωτερικούς. Στα παλιά αρχοντόσπιτα στην αυλή δημιουργείται πίδακας νερού ο οποίος προσφέρει πρόσθετη εξάτμιση και αυξάνει τα επίπεδα υγρασίας και το ευχάριστο περιβάλλον.
- **Ράντισμα.** Επιπλέον η τοπική συνήθεια των κατοίκων να ραντίζουν ή να πλένουν με νερό το πάτωμα της αυλής και τη βλάστηση σε αυτήν εξατμίζει το νερό και δροσίζει την ατμόσφαιρα, δημιουργεί ρεύματα και αυξάνει την υγρασία.

β. Θερμοκρασία και Ακτινοβολία. Οι θερμοκρασίες μέσα από το κτίριο είτε μετριάζονται είτε επαυξάνονται από το σχεδιασμό και την φύση των επιφανειών που τη περιβάλλουν. Όπως οι προσεγμένες επιστρώσεις είτε για αποθήκευση της θερμικής ακτινοβολίας όταν χρειάζεται και η αποβολή της όταν είναι ανεπιθύμητη σε συνδυασμό με την αποδοτικότητα της αυλής και του ηλιακού που εξαρτάται κύρια από τη διαμόρφωση τους και τη διανομή μάζας στα επί μέρους στοιχεία τους.

γ. Αερισμός - Δροσερές Αύρες. Ο αερισμός είναι αναγκαίος για άνεση και υγιεινή στο εσωτερικό. Ο αερισμός απαιτείται στα κτίρια ακόμα και κατά ζεστές μέρες του καλοκαιριού όταν η θερμοκρασία έξω από το κτίριο είναι ψηλότερη παρά στο εσωτερικό του. Στα

παραδοσιακά κτίσματα απεδίδετο μεγάλη προσοχή στον αερισμό ειδικότερα σε προκαταρκτική επεξεργασία του αέρα του αερισμού. Το σχέδιο και η τοποθέτηση της αυλής και του ηλιακού ρυθμίζουν τη ροή του αέρα μεταφέροντας στο εσωτερικό καθαρό αέρα από έξω, όταν αυτός είναι δροσερότερος από τον εσωτερικό. Οι παράμετροι που επηρεάζουν είναι :

- **Η Μορφή και η Διάταξη** των Ηλιακών και των Αυλών.
- **Η Περιοχή** που ευρίσκονται οι κατοικίες (Παραλιακές, βουνίστιες, αστικές περιοχές)
- **Στοιχεία όπως Ανεμοσυλλέκτες** που υπερυψώνονται πάνω από τις οροφές των παρακείμενων κτιρίων (7μ-8μ) με το στόμιο εστραμμένο προσήνεμα. Η τοποθέτηση στη βάση τους πίδακα καθαρίζει και δροσίζει το νερό που διοχετεύεται στην αυλή.
- **Αψίδες – Προεξοχές – Στεγάσματα** που κατευθύνουν τις καλοκαιρινές αύρες και διανέμουν τη ροή του αέρα.
- **Βλάστηση και δενδροφύτευση** για να διοχετεύουν τις καλοκαιρινές αύρες μέσα στο κτίριο

δ. Σκίαση. Η μεταχείριση της αυλής και του ηλιακού είναι σημαντική τεχνική για παροχή σκιασμού και κατ'έπекταση για το θερμικό έλεγχο στο κτίριο. Τα κύρια στοιχεία της αυλής και του ηλιακού για σκιασμό είναι :

- **Στοιχεία Περίφραξης.**
- **Αψίδες, Προεξοχές, Στέγαστρα** που αποκόπτουν τον ήλιο το καλοκαίρι και να τον αφήνουν ανεμπόδιστο το χειμώνα.
- **Βλάστηση.** Αναρριχώμενα φυλλοβόλα φυτά, όπως η παραδοσιακή κληματαριά ή βουκεμβίλια σε οριζόντιες πέργολες που σκιάζουν το καλοκαίρι και επιτρέπουν τον ήλιο το χειμώνα. Πυκνή συμπαγής βλάστηση στην ανατολή και δύση για προστασία από το χαμηλό ήλιο του καλοκαιριού το πρωί και το απόγευμα [5 (iii)]

3.2. ΑΛΛΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΚΤΙΡΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Εκτός από τον ηλιακό και την αυλή, τα δύο βασικά μέσα που χρησιμοποιούνταν στον παραδοσιακό σχεδιασμό κτιρίων για το μετριασμό των ακραίων καιρικών συνθηκών, υπάρχουν πολλές άλλες αρχιτεκτονικές πτυχές και δομικά στοιχεία στα παλιά σπίτια που αντανakλούν τη σοφία της παράδοσης, όπως :

α. Η Διάταξη και ο Προσανατολισμός του κτιρίου με μεγάλες γυάλινες επιφάνειες εστραμμένες στο νότο για ηλιασμό το χειμώνα όταν η πορεία του ήλιου διαγράφεται χαμηλά στον ουρανό και με υπολογισμένα σκίαστρα που αφήνουν την ηλιακή ακτινοβολία το χειμώνα και παρέχουν ηλιοπροστασία το καλοκαίρι

β. Ανοίγματα.

- **Μικρά ανοίγματα στην ανατολή και τη δύση** για αποφυγή του καλοκαιρινού ήλιου το πρωί και το απόγευμα.
- **Μικρά ανοίγματα και στο βορρά** για αποφυγή ψύχους αλλά και για επίτευξη διαμπερούς αερισμού
- **Μικρά παράθυρα τύπου αρσέρας** τοποθετημένα ψηλά κυρίως πάνω από τη σκάλα για αερισμό.

γ. Παντζούρια, Καφασωτά και Πέργολες που επιτρέπουν αερισμό, φωτισμό και θέα αλλά ταυτόχρονα ελέγχουν την ηλιακή ακτινοβολία το καλοκαίρι.

δ. Φωταγωγοί για να φωτίζουν και να αερίζουν το εσωτερικό των κατοικιών σε πυκνοδομημένα αστικά περιβάλλοντα.

ε. Υλικά και μέθοδοι κατασκευών

Αυτά ποικίλλουν ανάλογα με την περιοχή και τοποθεσία.[5,(iv)].

4. ΟΙ ΚΑΤΟΙΚΟΙ

Οι κάτοικοι ήταν αυτοί που συνέβαλαν περισσότερο στην επιτυχία του κλιματολογικού σχεδιασμού. Η αυθεντική τους προσέγγιση στην επίλυση προβλημάτων και η τάση τους για αυτάρκεια εκφραζόταν μέσα από την προθυμία και την ικανότητά τους να οργανώνουν τις καθημερινές δραστηριότητες με τέτοιο τρόπο ώστε όλοι οι χώροι να χρησιμοποιούνται δυναμικά, χωρίς να είναι απαραίτητο να διατηρούνται στο ίδιο επίπεδο άνεσης. Επιπλέον, οι κάτοικοι είχαν συνεχώς υπόψη τους τη χρήση που έκαναν του κτιρίου, και ως εκ τούτου μετέβαλλαν τα θερμικά χαρακτηριστικά του ανάλογα με το χρόνο της ημέρας ή σύμφωνα με τις εποχές [9].

5. ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗ ΣΟΦΙΑ

Σήμερα η παραδοσιακή θερμική φιλοσοφία η οποία χρησιμοποιούταν στον σχεδιασμό κτιρίων έχει ξεχαστεί ή εγκαταλειφθεί, και τα σύγχρονα σπίτια δεν περιέχουν κανένα σημάδι που να μας θυμίζει τη σοφία των παλιών.

Οι Κύπριοι άφησαν πίσω τους την ειλικρίνεια και ζεστασιά του Ελληνικού τρόπου ζωής που χαρακτηρίζεται από τη στενή ανθρώπινη επαφή, και διαμόρφωσαν τη ζωή τους σύμφωνα με τα Δυτικά κοινωνικά πρότυπα. Το μικρό μέγεθος της κυπριακής κοινότητας και ως εκ τούτου η ισχυρή ταυτότητα των ατόμων, υπέρβαλε την επιρροή του "status" στην κοινωνία και αυτό απεικονίστηκε σύντομα στα σπίτια τους. Οι μικροί περιορισμένοι χώροι που αντιγράφηκαν από τη δύση δεν άφησαν καμία επιλογή ή ακόμα και εκτίμηση για τον παραδοσιακό προσανατολισμό.

Επιπλέον, η επιβολή γενικών κανονισμών όπως η απόσταση τριών μέτρων από τα κοινά όρια προκαθόριζε την κατασκευή κατοικιών σε απομόνωση τη μία από την άλλη. Αυτό είναι σε αντίθεση με τη φυσική, οργανική εξέλιξη της παραδοσιακής ομαδοποίησης των κτηρίων με το ένα κοντά στο άλλο και που χρησιμοποιεί τους κοινούς τοίχους που δημιουργούν τους θερμικούς φακέλους ως ηλιοπροστατευτικούς ("sunshadows") και ανεμοπροστατευτικούς ("windshadows").

Η επιρροή της μεταπολεμικής μετακίνησης για "διεθνή" αρχιτεκτονική μαζικής παραγωγής, λόγω:

- Κατάρτισης των αρχιτεκτόνων σε διάφορες χώρες
- Μέσα μαζικής επικοινωνίας.
- Απαιτήσεις τουρισμού
- Ομοιομορφία των υλικών και της τεχνολογίας
- Η γρήγορη, φτηνή και εύκολη προσέγγιση στις λύσεις σχεδίου,

έχει οδηγήσει περαιτέρω σε κυπριακά κτήρια που είναι κλιματολογικά ανάρμοστα. Τα κτήρια δεν ενεργούν πλέον ως κλιματολογικοί μεσολαβητές και μετριαστές του κλίματος για να μαλακώσουν τα δυσάρεστα κλιματολογικά άκρα, ένας αρχιτεκτονικός στόχος που η παραδοσιακή φρόνηση αντιμετώπιζε επιδέξια. Αντίθετα η υιοθέτηση των διεθνών μορφών επιδεινώνει τις αντίξοες καιρικές συνθήκες. Η υιοθέτηση των ξένων αρχιτεκτονικών λύσεων στην Κύπρο τονίζει συχνά τα άκρα του κλίματος.

Τα κτήρια έχουν γίνει περιβλήματα για τεχνητά περιβάλλοντα και συχνά τα κελύφη τους ενεργούν ως πρόσθετο εμπόδιο στην αποδοτική χρήση των μηχανικών εγκαταστάσεών τους. Με τη συμπεριφορά "χειρότερα από το ίδιο το κλίμα" τέτοια σχέδια απαιτούν περισσότερη κατανάλωση εφεδρικής ενέργειας μέσω του μηχανικού εξοπλισμού για να ελέγξουν απλά το εσωτερικό περιβάλλον τους [5, (iv)].

Εκτός από τις ανωτέρω επιρροές, υπάρχουν περισσότεροι αλληλένδετοι παράγοντες που αυξάνουν την πολυπλοκότητα της αρχιτεκτονικής του σύγχρονου κυπριακού κτηρίου. Η σύγχρονη τάση προς υψηλότερα επίπεδα άνεσης, μαζί με την τάση του ανθρώπου να

προσαρμόζεται με το περιβάλλον του έχει οδηγήσει στην αυξανόμενη χρήση συστημάτων κλιματισμού και περισσότερη ζήτηση για ενέργεια από ότι σημειωνόταν με τη λογικότερη προσέγγιση των προγόνων μας. Δεδομένου ότι η κοινωνία μας γίνεται πίο απαιτητική και ανταγωνιστική, ο παράγοντας ασφάλειας στην εφαρμοσμένη μηχανική αυξάνεται όχι μόνο για το παρόν αλλά ακόμα περισσότερο για τις μελλοντικές απαιτήσεις. Αυτές οι αυξήσεις δαπανών μεταφέρονται προς τον τελικό χρήστη του κτηρίου [5, (iv)].

6. ΤΟ ΣΥΓΧΡΟΝΟ ΚΤΗΡΙΟ

Η αρχιτεκτονική σκηνή στην Κύπρο είναι σήμερα σε ασυμφωνία και δυσαρμονία με το φυσικό περιβάλλον. Οι προσπάθειες στην πρωτοτυπία είναι εμφανείς στο σχεδιασμό των κτηρίων, αλλά και εμφανής είναι η έλλειψη φρόνησης για να αντιμετωπίσει τις σκληρές κλιματολογικές συνθήκες . Το αποτέλεσμα είναι σύγχρονα κτήρια που αγωνίζονται να επιτύχουν τα εσωτερικά επίπεδα άνεσης και καταβροχθίζουν συνεπώς μεγάλες ποσότητες ενέργειας [6].

Η μέγιστη έκθεση του εξωτερικού περιβλήματος του κτηρίου στον ήλιο είναι ακατάλληλη για την Κύπρο. Θα είναι επίσης πίο κρύο το χειμώνα. Η τάση να ανυψωθεί το κτήριο σε κολώνες (pilotis) με την προοπτική της ενσωμάτωσης στο μέλλον καταστημάτων ή αποθηκών ή στην οικοδόμηση σκέπαστρου του αυτοκινήτου της οικογένειας, οδηγεί σε παρόμοια προβλήματα. Οι περισσότερες των επιφανειών εκτίθενται στις διακυμάνσεις περιβαλλοντικής θερμοκρασίας. Τα ανυψωμένα κτήρια δεν έχουν πλέον εκείνη την επαφή με τη γη που κρατά σταθερή τη θερμοκρασία 10 έως 13 βαθμούς Κελσίου.

Εντούτοις με τον αέρα, τα υπερυψωμένα pilotis δημιουργούν μια υψηλότερη ταχύτητα (επίδραση venturi) του αέρα που κινείται κάτω από το κτήριο που αναγκάζει τη θερμοκρασία να μειωθεί σημαντικά. Αυτό είναι κατάλληλο το καλοκαίρι, αλλά καταστρεπτικό κατά τη διάρκεια του χειμώνα

Το σύγχρονο κτήριο διαμορφώνει ένα υπαίθριο χώρο τύπου αυλής, αλλά είναι συνήθως κάτω από το κτήριο χωρίς την ηλιακή πρόσβαση το χειμώνα. Δεν χρησιμεύει πλέον ως ο ευπρόσδεκτος κοινωνικός, ο ενδιαμέσος χώρος μετάβασης μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού, του δημόσιου και του ιδιωτικού όπως το παραδοσιακό προαύλιο. Η παραδοσιακή σειρά λειτουργιών του, το μεγάλο παιδιών, η στέγαση των ζώων, και ο χώρος για να ζήσουν κατά τη διάρκεια του μεγαλύτερου μέρους των εποχών περιορίζονται στην αποθήκευση παλιών αντικειμένων και χώρου στάθμευσης αυτοκινήτων.

Το λιακωτό δεν είναι πλέον ένα ηλιακό χαρακτηριστικό γνώρισμα ή πράγματι ο πυρήνας του κυπριακού κτηρίου. Έγινε η εκδήλωση της κοινωνικής θέσης που δεν θυμίζει καθόλου την αρχική του μορφή και δεν εκπληρώνει πλέον τις λειτουργίες του. Το όνομά του έχει αλλάξει επίσης αντικαθίσταται από την ευρωπαϊκή εκδοχή της "Χώλ" και "Entree".

Αυτή η σύγχρονη σκηνή επιφέρει μια αίσθηση της νοσταλγίας για την παραδοσιακή φρόνηση που μπορεί να ενθαρρύνει τους σχεδιαστές για να αντλήσουν τα μαθήματα από τους προγόνους μας .

7. Η ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΟ ΣΤΟ ΣΥΓΧΡΟΝΟ ΣΠΙΤΙ

Είναι έκδηλο ότι το έργο των σύγχρονων αρχιτεκτόνων είναι πολύ πιο πολύπλοκο από αυτό των παραδοσιακών οικοδόμων. Οι απαιτήσεις της σύγχρονης ζωής έχουν εισαγάγει στο σχεδιασμό κτηρίων εκτιμήσεις, πρόνοιες και νέους παράγοντες, πέρα από τους “βασικούς” παραδοσιακούς. Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται και η ζωή γίνεται πιο απαιτητική, η συνετή και βέλτιστη οργάνωση των σύνθετων μεταβλητών που περιλαμβάνουν τις τεχνικές, κοινωνικές, χρηστικές και πολιτιστικές πτυχές, συγκλίνει ακόμα στη δημιουργία της άνεσης και της ευκολίας για το χρήστη. Η προτεραιότητα των αρχιτεκτόνων στη διαδικασία σχεδίου

αλλάζει. Οι μηχανές γίνονται σημαντικότερες στην επίτευξη των κατάλληλων επιπέδων άνεσης. Επιπλέον δεδομένου ότι το συναίσθημα της άνεσης είναι μια υποκειμενική αντίληψη ποικίλλει από άτομο σε άτομο, από πολιτισμό σε πολιτισμό και κατά τη διάρκεια του χρόνου. Έτσι είναι άδικο και λανθασμένο να κρίνουμε τα επίπεδα θερμικής άνεσης στα παραδοσιακά κτήρια με τα ίδια κριτήρια που χρησιμοποιούμε για τα σύγχρονα [7]

Ωστόσο, τα υλικά, εργαλεία και οι τεχνικές στη διάθεση του αρχιτέκτονα είναι πολύ περισσότερα από αυτά του παραδοσιακού οικοδόμου. Επιπρόσθετα, ο αρχιτέκτονας σήμερα έχει το πλεονέκτημα της συσσωρευμένης γνώσης των προκατόχων του.

Μέσω αυτών των δύο βασικών περιοχών, της βιώσιμης παραδοσιακής προσέγγισης στην οικοδόμηση από τη μια πλευρά, και του ιδιαίτερα σύνθετου συνόλου κριτηρίων σχεδιασμού της συμβατικής, σύγχρονης πρακτικής από την άλλη, ο βασικός στόχος είναι να παραχθούν οι συστάσεις και προσεγγίσεις για την αποδοτική αξιοποίηση της ενέργειας στη σύγχρονη αρχιτεκτονική[8].

8.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι ο επιτυχημένος κλιματικός σχεδιασμός στην Κύπρο δεν πρέπει να αγνοεί τη συσσωρευμένη εμπειρία και σοφία του παρελθόντος, αλλά να αναπτύσσεται κατόπιν μιας βαθιάς αντίληψης η οποία επέρχεται από επιστημονική κατανόηση και όχι συναισθηματική εκτίμηση της παραδοσιακής αρχιτεκτονικής.

Από την άλλη δεν πρέπει να αγνοείται ούτε η μαζική γνώση και τεχνολογία που προέρχονται από τη Δύση. Η αρχιτεκτονική πρέπει να αποτελείται από μια σύνθεση των δύο αυτών πτυχών έτσι ώστε να εναρμονίζεται με τις παραδοσιακές αξίες οι οποίες είναι κατάλληλες για τη σύγχρονη κυπριακή κοινωνία, την πολιτιστική της ταυτότητα, την ανθρώπινη της κλίμακα, και να βασίζεται στην κατάλληλη τεχνολογία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Γιάννας Σίμος, Βιοκλιματικός Σχεδιασμός, Αρχιτεκτονική και Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Δελτίο Συλλόγου Αρχιτεκτόνων, τεύχος 19, 5-6 1983.
2. Γ.Χ. Παπαχαραλάμπους, Η Κυπριακή Οικία, Κέντρο Επιστημονικών Ερευνών, Λ/σια1968
3. Γεωργιάδης Κλεάνθης, Ιστορία της Κύπρου, Τμήμα αρχαιοτήτων, Κύπρος, Δημοκρατία της Κύπρου, Λευκωσία 1967, Λευκωσία.
4. Σίνου Στέφανου, Αναδρομή στη Λαϊκή Αρχιτεκτονική της Κύπρου, Αθήνα 1976.
5. Σεργίδη Δέσποινα
 - (i) Prototype Solar Building for Cyprus, Graduate School, Energy Studies AA 1988.
 - (ii) Building Analysis – A Traditional Cypriot Building, Graduate School Energy Studies, AA 1987-88.
 - (iii) Open Spaces as Building Components, Graduate School Energy Studies, AA 1987-88
 - (iv) Architecture and Bioclimatic Design, HTI, 1989.
6. Bowen, A., και Yannas S., (Eds), Passive and Low Energy Ecotechniques Applied to Housing, PLEA'84 "Μεξικό, εκδόσεις Περγάμου, 1984,
7. Bowen, A., and Wagner (Eds), Passive and Low Energy Alternatives, The First International PLEA Conference, εκδόσεις Περγάμου, Οξφόρδη, 1982
8. Fernandez, E. de Oliveira και Yannas, Simos., (Eds), Energy and Buildings for Temperate Climates – A Mediterranean Regional Approach, Proceedings of the PLEA 88 Conference, Πόρτο, εκδόσεις Περγάμου, Οξφόρδη, 1988,
9. Vinod, G., (Ed), Energy and Habitat, School of Planning and Architecture, New Delhi, Wiley Eastern

ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥΣ

Νίκος Παπαμανώλης

Τμήμα Αρχιτεκτόνων, Πολυτεχνείο Κρήτης
Ελ. Βενιζέλου 127 (πρώην Γαλλική Σχολή), 73100 Χανιά
Τηλ. 2821037106, email: npapama@tee.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα βιομηχανικά κτίρια αποτελούν μια κατηγορία κτιρίων με κοινά, ευδιάκριτα αρχιτεκτονικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά αυτά έχουν αντίκρυσμα στην εμφάνισή τους καθώς και στην περιβαλλοντική και ενεργειακή συμπεριφορά τους.

Η εργασία εντοπίζει και καταγράφει τα κύρια χαρακτηριστικά των βιομηχανικών κτιρίων στην Ελλάδα και εξετάζει τις επιπτώσεις τους στην περιβαλλοντική και ενεργειακή συμπεριφορά τους. Η μελέτη βασίζεται κυρίως σε ποιοτικά δεδομένα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η περιβαλλοντική και ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αρχιτεκτονική και την κατασκευή τους. Παράγοντες όπως ο όγκος του κτιρίου, η επιφάνεια του κελύφους του, τα ανοίγματα, ο προσανατολισμός των όψεων αποτελούν, μεταξύ άλλων, στοιχεία της αρχιτεκτονικής του με έντονη επίδραση στη διαμόρφωση των αντίστοιχων συμπεριφορών. Ομοίως, έντονη είναι η επίδραση που ασκούν τα δομικά υλικά και στοιχεία, ο τρόπος εφαρμογής και συναρμογής τους, οι μονώσεις και άλλοι παράγοντες που σχετίζονται με την κατασκευή. Είναι κατά συνέπεια λογικό ότι κτίρια με παρόμοια αρχιτεκτονικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά επιδεικνύουν υπό τις ίδιες συνθήκες (κλιματικές, χρήσης κλπ) παρόμοιες συμπεριφορές όσον αφορά τις αλληλεπιδράσεις τους με περιβαλλοντικούς παράγοντες και, κατ' επέκταση, τα ενεργειακά ισοζύγιά τους.

Τα βιομηχανικά κτίρια αποτελούν, από κτιριολογικής άποψης, μια ξεχωριστή, ευδιάκριτη κατηγορία κτιρίων. Είναι κτίρια εργασίας και στεγάζουν παραγωγικές δραστηριότητες του δευτερογενούς τομέα. Τα βιομηχανικά κτίρια από την εποχή της βιομηχανικής επανάστασης, που άρχισαν ουσιαστικά να κατασκευάζονται, έχουν δεχθεί αλλαγές στον τρόπο σχεδιασμού και κατασκευής τους. Διατηρούν παρόλα αυτά, διαχρονικά, κάποια χαρακτηριστικά που αντανάκλουν τη χρήση τους. Είναι, γενικά, μεγάλων διαστάσεων με λιτή εμφάνιση που συχνά συμπληρώνεται με στοιχεία που ανήκουν σε συστήματα της παραγωγικής διαδικασίας. Έχουν μεγάλα ανοίγματα και μεγάλων διαστάσεων εσωτερικούς χώρους.

Στην Ελλάδα, οι κύριοι παράγοντες που διαμορφώνουν τον τρόπο σχεδιασμού και κατασκευής κτιρίων (κλίμα, διαθεσιμότητα υλικών, τεχνογνωσία, νομοθεσία, παραδόσεις) είναι σε όλη την έκτασή της παρόμοιοι [1]. Ως αποτέλεσμα, τα κτίρια έχουν ομοιότητες στην εμφάνιση αλλά και στην ενεργειακή και περιβαλλοντική συμπεριφορά τους [1,2]. Όσον αφορά ειδικότερα τα βιομηχανικά κτίρια, οι ομοιότητες αυτές υποστηρίζονται περαιτέρω από τους εν γένει συγκεκριμένους προσανατολισμούς και τις δυνατότητες που χαρακτηρίζουν τις παραγωγικές δομές στη χώρα.

Η εργασία εντοπίζει και περιγράφει τα κύρια αρχιτεκτονικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των βιομηχανικών κτιρίων στην Ελλάδα και εξετάζει την επίδρασή αυτών των χαρακτηριστικών στην περιβαλλοντική και ενεργειακή συμπεριφορά τους. Ειδικότερα, η εργασία εντοπίζει σχεδιαστικές και κατασκευαστικές πρακτικές που επικρατούν σε αυτήν την κατηγορία κτιρίων και συνεπάγονται αρνητικές για την περιβαλλοντική και ενεργειακή συμπεριφορά τους επιπτώσεις. Όπου δε είναι εφαρμόσιμο, διατυπώνει προτάσεις που θα μπορούσαν να αμβλύνουν αυτές τις επιπτώσεις.

2. ΤΑ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Μεγάλο ποσοστό των βιομηχανικών μονάδων στην Ελλάδα είναι οργανωμένες σε ειδικές περιοχές (Βιομηχανικές Περιοχές, Τεχνολογικά Πάρκα κλπ) που εξασφαλίζουν κατάλληλες υποδομές και συνθήκες για τη λειτουργία τους.

Συνήθως, οι εγκαταστάσεις μιας βιομηχανικής μονάδας διαθέτουν άνετο περιβάλλοντα χώρο ώστε να διευκολύνεται η κυκλοφορία των οχημάτων που μεταφέρουν τις πρώτες ύλες και τα προϊόντα αλλά και η στάθμευση των αυτοκινήτων των εργαζόμενων, πελατών κλπ. Για το σκοπό αυτό, ο περιβάλλον χώρος είναι στρωμένος με χαλίκια ή ασφαλτοστρωμένος σε μεγάλη έκταση και, ενίοτε, στο τμήμα του parking, στεγασμένος. Ακόμη, στα όρια του περιβάλλοντος χώρου, που κατά κανόνα είναι περιφραγμένος, συχνά συναντάμε, σε απόσταση από το κυρίως κτίριο της μονάδας, αποθήκες επικίνδυνων υλικών και καυσίμων και Η/Μ εγκαταστάσεις (π.χ. βιολογικού καθαρισμού).

Τα βιομηχανικά κτίρια στην Ελλάδα είναι κατά κανόνα ισόγεια και υψηλά. Το σχήμα τους είναι πρισματικό - συνήθως προκύπτει ως σύνθεση δύο ή τριών ορθογώνιων παραλληλεπίπεδων όγκων, μεταξύ των οποίων, ένας υπερισχύει. Οι επιφάνειες είναι καθαρές. Τα όποια ανοίγματα στις όψεις τους είναι μεγάλα, συνεχή, συνήθως διατεταγμένα οριζόντια (Σχήμα 1). Όσον αφορά τους εσωτερικούς χώρους, αυτοί, με βάση μια τυπική οργάνωση, περιλαμβάνουν: χώρους παραγωγής, αποθήκες (πρώτων υλών, αναλώσιμων, ημιέτοιμων προϊόντων, τελικών προϊόντων) και γραφεία. Οι χώροι αυτοί διακρίνονται μεταξύ τους. Μάλιστα, η διάκρισή τους συχνά αντανακλά και στην εμφάνιση του κτιρίου στο βαθμό που οι διαφορετικές λειτουργίες που φιλοξενούν συνεπάγονται διαφορετικές προσεγγίσεις στο σχεδιασμό και την κατασκευή τους (για παράδειγμα, οι απαιτήσεις σε ανοίγματα για φυσικό φωτισμό διαφέρουν ριζικά μεταξύ των αποθηκών και των γραφείων). Έτσι, είναι συνηθισμένη περίπτωση τα γραφεία να στεγάζονται σε ξεχωριστό τμήμα του κτιρίου ή ακόμη και σε ξεχωριστό κτίριο, με διαφορές στην αισθητική και την κατασκευή του έναντι του υπόλοιπου συγκροτήματος.

Η κατασκευή των βιομηχανικών κτιρίων στην Ελλάδα ακολουθεί δύο βασικά μοντέλα.

- Το επικρατούν μοντέλο χρησιμοποιεί μεταλλικό φέροντα οργανισμό και κέλυφος από μεταλλικά πάνελ με εσωτερική θερμομόνωση αφρού αυτοσβαινόμενης πολυουρεθάνης, πάχους μεταξύ 25 και 40 mm. Οι εσωτερικές τοιχοποιίες είναι από γυψοσανίδες ή από τούβλα, δρομικές.

- Το δεύτερο μοντέλο κατασκευής χρησιμοποιεί μπετονένιο σκελετό και, στο κατακόρυφο κέλυφος, διπλές δρομικές τοιχοποιίες με εσωτερική θερμομόνωση πολυστερίνης ή, στη χειρότερη περίπτωση, μπατικές με τούβλα ή με τσιμεντότουβλα, χωρίς θερμομόνωση. Οι εσωτερικές τοιχοποιίες είναι και εδώ από γυψοσανίδες ή από τούβλα, δρομικές. Η επιστέγαση

είναι με μονωμένο δώμα ή, συχνά, με δίριχτες (ή διαδοχικές δίριχτες) στέγες με μεταλλικά ζευκτά και επικάλυψη με μεταλλικά πάνελ.



Σχήμα 1. Τυπικά βιομηχανικά κτίρια στην Ελλάδα

Και στα δύο μοντέλα τα δάπεδα είναι βιομηχανικά και τα κουφώματα μεταλλικά, αλουμινένια ή ανοξείδωτα.

Ανεξάρτητα από το μοντέλο κατασκευής της κύριας κτιριακής μονάδας, το τμήμα που στεγάζει τα γραφεία συνήθως ακολουθεί τη συμβατική θεωρουμένη για τα κτίρια γραφείων στην Ελλάδα κατασκευή. Δηλαδή, έχει φέροντα οργανισμό από μπετόν, διπλές δρομικές τοιχοποιίες με εσωτερική θερμομόνωση πολυστερίνης στο κατακόρυφο κέλυφος και δρομικές, από τούβλα ή γυψοσανίδες, στους εσωτερικούς διαχωριστικούς τοίχους. Η επιστέγαση είναι με μονωμένο δώμα. Τα δάπεδα είναι συνήθως από πλακάκια και τα εξωτερικά κουφώματα αλουμινένια ή συνθετικά.

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή των βιομηχανικών κτιρίων στην Ελλάδα (και όχι μόνο) ακολουθεί τη λογική του χαμηλού κόστους. Οι περισσότεροι βιομήχανοι, στη βάση μιας καθαρά λογιστικής σκέψης, ενδιαφέρονται να καλύψουν τις λειτουργικές ανάγκες της μονάδας τους σε σύντομο χρόνο και με όσο το δυνατό λιγότερο κόστος. Επιπλέον, υποσιάζονται ότι η επένδυσή τους για τις κτιριακές εγκαταστάσεις ενδέχεται, για διάφορους λόγους (π.χ. εξέλιξη τεχνολογίας, επέκταση δραστηριοτήτων), να απαξιωθεί σύντομα. Στη λογική αυτή, το ενδια-

φέρουν για την ποιότητα κατασκευής των κτιριακών εγκαταστάσεων υποβαθμίζεται. Ανάλογα υποβαθμισμένο είναι και το ενδιαφέρον για την περιβαλλοντική και ενεργειακή συμπεριφορά αυτών των εγκαταστάσεων, παρά την ανταποδοτικότητα που συνεπάγεται η φροντίδα βελτίωσής τους. Μάλιστα, στην περίπτωση αυτή, λειτουργεί αποθαρρυντικά και το γεγονός ότι τα βιομηχανικά κτίρια, λόγω αντικειμενικών συνθηκών (μεγάλος όγκος, μεγάλη επιφάνεια κελύφους, χαμηλός συντελεστής εκμετάλλευσης όγκου), απαιτούν συγκριτικά υψηλές δαπάνες για μέτρα βελτίωσης της περιβαλλοντικής και ενεργειακής συμπεριφοράς τους.

3. ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Στην Ελλάδα αναπτύσσεται κατά τις τελευταίες δεκαετίες ένα πλαίσιο νομοθετικών και άλλων πρωτοβουλιών με στόχο αφενός τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των βιομηχανικών εγκαταστάσεων και αφετέρου την εξοικονόμηση ενέργειας στο βιομηχανικό τομέα [π.χ. 3]. Το πλαίσιο αυτό καλύπτει ικανοποιητικά και θέματα υγιεινής και ασφαλείας στους χώρους εργασίας (π.χ. πυροπροστασία). Όσον αφορά ειδικότερα τα θέματα που αφορούν την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος και το ενεργειακό ισοζύγιο των βιομηχανικών κτιρίων - δηλαδή τους δείκτες της περιβαλλοντικής και ενεργειακής συμπεριφοράς τους - αυτά, στο συγκεκριμένο πλαίσιο, αντιμετωπίζονται μάλλον επιφανειακά. Δηλαδή, δεν διατυπώνονται συγκεκριμένες προτάσεις για το χειρισμό τους. Σχετικό και χαρακτηριστικό είναι επίσης το γεγονός ότι η Οδηγία 2002/91/ΕΚ της Ε.Ε. για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων δεν αφορά τα βιομηχανικά κτίρια.

Τα βιομηχανικά κτίρια, λόγω της χωροθέτησής τους σε βιομηχανικές περιοχές, βρίσκονται εκτεθειμένα σε περιβάλλον κατά τεκμήριο βεβαρυνμένο σε ρύπους και θορύβους. Ως αποτέλεσμα, επιβαρύνεται το εσωτερικό τους περιβάλλον και επιταχύνεται η φθορά και η υποβάθμιση των ιδιοτήτων των δομικών τους στοιχείων.

Υποβάθμιση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος και της κατασκευής των βιομηχανικών κτιρίων προκαλείται επίσης από την κακή ποιότητα και τις ελλείψεις στην αρχική κατασκευή τους. Είναι αξιοσημείωτο ότι σημαντικό ποσοστό αυτών των κτιρίων στην Ελλάδα παραμένουν και λειτουργούν ημιτελή. Μάλιστα, οι ελλείψεις τους μπορεί να αφορούν σημαντικούς για την εν γένει συμπεριφορά τους παράγοντες (π.χ. να είναι ανεπίχριστα). Ακόμη, κακοτεχνίες στην αρχική κατασκευή και πιο ειδικά στην εφαρμογή ή και στις επιδιορθώσεις στην εφαρμογή μονωτικών υλικών (θερμομόνωση, υγραμόνωση, ηχομόνωση) ή παραλείψεις στο σχεδιασμό και την κατασκευή συστημάτων που προστατεύουν από αντίξοες περιβαλλοντικές επιδράσεις (π.χ. ηλιοπροστασία, ανεμοπροστασία, ηχοπροστασία) επιβαρύνουν ακόμη περισσότερο την περιβαλλοντική και ενεργειακή συμπεριφορά των αντίστοιχων κτιρίων. Σχετικά, ο άνετος περιβάλλον χώρος που συναντάται σε πολλά βιομηχανικά κτίρια, πέραν του λειτουργικού του ρόλου (κυκλοφορία-στάθμευση οχημάτων, πυροπροστασία), σπάνια αξιοποιείται σε μέτρα βελτίωσης της περιβαλλοντικής συμπεριφοράς του κτιρίου (π.χ. φυτεύσεις ηχοπροστασίας).

Όσον αφορά ειδικότερα τη θερμική άνεση στο εσωτερικό των βιομηχανικών κτιρίων, παρατηρούμε ότι: Τα μεταλλικά πάνελ, ως στοιχεία του κελύφους, έχουν αυξημένες θερμομονωτικές ιδιότητες και μικρή θερμοχωρητικότητα. Συγκεκριμένα, οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας (k) των πάνελ που χρησιμοποιούνται συνήθως στις πλαγιοκαλύψεις των βιομηχανικών κτιρίων κυμαίνονται μεταξύ 0.77 και 0.50 W/m²K, ανάλογα με το πάχος τους. Οι τιμές αυτές, παρόλο που αντιστοιχούν σε μικρότερες διατομές, δεν υπολείπονται σημαντικά από τις αντίστοιχες της διπλής δρομικής τοιχοποιίας με εσωτερική μόνωση 5 cm (περίπου

0.45 W/m²K) που αποτελεί τον εναλλακτικό τρόπο πλαγιοκαλύψεων. Παρά ταύτα, η όποια θερμομόνωση παρέχουν τα στοιχεία του κελύφους ακυρώνεται σε μεγάλο βαθμό από τις αυξημένες τιμές αερισμού των βιομηχανικών κτιρίων. Οι αυξημένες αυτές τιμές, αν δεν καλύπτουν ανάγκες δροσισμού ή απομάκρυνσης αέριων ρύπων ή υπερβολικής θερμότητας από το εσωτερικό του κτιρίου, αντιστοιχούν σε ανεπιθύμητες διαφυγές αέρα μέσα από κακότεχνες συναρμογές στοιχείων του κελύφους ή σε συχνό άνοιγμα των κατά κανόνα μεγάλων πορτών για διελεύσεις προσωπικού και οχημάτων (φορτοεκφορτώσεις κλπ).

Η υγροπροστασία σε πολλά βιομηχανικά κτίρια είναι επίσης προβληματική. Πέραν των εγγενών δυσκολιών που παρουσιάζει η υγροπροστασία των μεταλλικών κατασκευών, στα βιομηχανικά κτίρια, ανεξάρτητα από το μοντέλο κατασκευής τους, μεγάλο μέρος του προβλήματος οφείλεται σε κακότεχνιες. Έτσι, δεν είναι σπάνιο φαινόμενο να περνούν τα νερά της βροχής μέσα από τα εξωτερικά κουφώματα, ή από τη στέγη, όπου τα διαφώτιστα και οι παπαφίγκοι - που χρησιμοποιούνται συχνά για φυσικό φωτισμό - προσφέρουν έδαφος κακοτεχνιών.

Ο εσωτερικός φωτισμός των βιομηχανικών κτιρίων είναι γενικά ελλιπής. Οι μεγάλες διαστάσεις των εσωτερικών χώρων δε διευκολύνουν το φυσικό φωτισμό από τα ανοίγματα στο κέλυφος. Ακόμη, η αμεριμνησία για σύνταξη μελετών τεχνητού φωτισμού αλλά και το υψηλό κόστος εφαρμογής παρόμοιων μελετών οδηγούν συχνά σε πρόχειρες και ατελείς λύσεις.

Τα συστήματα θέρμανσης που επικρατούν στα βιομηχανικά κτίρια στην Ελλάδα βασίζονται στην παροχή θερμού αέρα. Πρόκειται κυρίως για αξονικά αερόθερμα ή αερολέβητες. Τα συστήματα αυτά, παρόλο που είναι συμβατά με τη χαμηλή θερμοχωρητικότητα των δομικών στοιχείων, δεν προσφέρουν ομοιόμορφη θερμοκρασία στο χώρο. Μάλιστα, δεδομένου του μεγάλου ύψους οροφής των αντίστοιχων κτιρίων, έχουμε ως συνέπεια την εμφάνιση έντονων θερμοκρασιακών διαφορών στο εσωτερικό τους. Χαρακτηριστικά, στο χώρο παραγωγής εργοστάσιου στη Θεσσαλονίκη μετρήθηκε σε περίοδο θέρμανσης κατακόρυφη θερμοβαθμίδα 1.85 °C/m [4]. Έντονο είναι το πρόβλημα και κατά τη θερμή περίοδο, δεδομένου ότι τα περισσότερα εργοστάσια δε διαθέτουν συστήματα κλιματισμού. Η περιορισμένη θερμική αδράνεια του κελύφους τους σε συνδυασμό με τη θερμότητα που εκλύεται στο εσωτερικό τους λόγω της λειτουργίας μηχανημάτων κλπ, συχνά συνεπάγονται δυσάρεστα υψηλές θερμοκρασίες.

Για τους λόγους που εν συντομία περιγράφηκαν, το κόστος εξασφάλισης συνθηκών άνεσης στο εσωτερικό των βιομηχανικών κτιρίων εκτιμάται υψηλό. Δυστυχώς, δεν υπάρχουν αξιόπιστα στατιστικά δεδομένα για τις ενεργειακές καταναλώσεις στα βιομηχανικά κτίρια στην Ελλάδα. Οι όποιες σχετικές καταναλώσεις συνυπολογίζονται στις αντίστοιχες του βιομηχανικού τομέα που, σύμφωνα με στοιχεία του Υπ. Ανάπτυξης για το 2006, αντιστοιχούν περίπου στο 20 % της συνολικής κατανάλωσης τελικής ενέργειας [5]. Μεταξύ αυτών, το ποσοστό που αφορά τον κτιριακό τομέα (φωτισμός, χρήση Η/Μ εγκαταστάσεων για θέρμανση, κλιματισμό, αερισμό, λειτουργία συσκευών) είναι μάλλον μικρό, αλλά σε απόλυτες τιμές σημαντικό. Πάντως, κάποιες αποσπασματικές μελέτες διαπιστώνουν περιθώρια βελτίωσης του ενεργειακού ισοζυγίου των βιομηχανικών κτιρίων και με την εφαρμογή βιοκλιματικών προσεγγίσεων [4]. Ακόμη, είναι ενδεχόμενο ότι σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να προκύψει με επεμβάσεις που στοχεύουν στη βελτίωση της απόδοσης των Η/Μ συστημάτων που υποστηρίζουν τη λειτουργία αυτών των κτιρίων. Σχετικά, είναι σκόπιμο να σημειώσουμε ότι στα κτίρια που στεγάζουν τις παραγωγικές διαδικασίες, ο ενεργειακός σχεδιασμός, αν και βασίζεται στις ίδιες αρχές, διαφοροποιείται ανάλογα με τη χρήση του κάθε χώρου, τη λειτουργία του εξοπλισμού παραγωγής και την παρουσία και το είδος της δραστηριότητας των ανθρώπων. Στο πλαίσιο αυτό, οι παρατηρήσεις για την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος δεν ι-

σχύουν στον ίδιο βαθμό για τους χώρους των γραφείων των βιομηχανικών κτιρίων, ιδιαίτερα αν αυτοί διαχωρίζονται από τους υπόλοιπους χώρους της μονάδας. Εκεί, οι σχεδιαστές και κατασκευαστικές επιλογές είναι συνήθως βελτιωμένες, γεγονός που συνεπάγεται καλύτερες συνθήκες και ορθολογικότερη χρήση ενέργειας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή των βιομηχανικών κτιρίων στην Ελλάδα, γενικά, αφήνουν σημαντικά περιθώρια βελτιώσεων με αντίκρισμα στην περιβαλλοντική και ενεργειακή συμπεριφορά τους. Μεταξύ των αιτίων για την πραγματικότητα αυτή μπορούμε να προτάξουμε την απροθυμία των βιομηχάνων να επενδύσουν για την αποτροπή της. Η απροθυμία αυτή, πέραν του ότι είναι ανεκτή από την ισχύουσα νομοθεσία, συντηρείται περεταίρω από τη φαινομενική απουσία κινήτρων. Εκδηλώνεται δε κυρίως σε δύο κατευθύνσεις: α. ως κακοτεχνίες και ελλείψεις στην κατασκευή και β. ως απουσία συστημάτων περιβαλλοντικής προστασίας στις όψεις και τον περιβάλλοντα χώρο.

Η πραγματικότητα αυτή, στο βαθμό που βασίζεται σε άγνοια ή σε εσφαλμένες ή κοντόφθαλμες εκτιμήσεις, θα άξιζε να ανατραπεί. Σχετικά, στα πλαίσια ενός ευρύτερου σχεδιασμού, θα ήταν σκόπιμο:

- α. Να διερευνηθούν οι παράγοντες που διαμορφώνουν την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος και το ενεργειακό ισοζύγιο στα βιομηχανικά κτίρια στην Ελλάδα καθώς και τα χαρακτηριστικά τους για διαφορετικές κατηγορίες κτιρίων.
- β. Να αναπτυχθεί μια εκτεταμένη και αξιόπιστη βάση δεδομένων της ενεργειακής απόδοσης των βιομηχανικών κτιρίων και
- γ. Να προσδιοριστούν και να βαθμονομηθούν δείκτες περιβαλλοντικής και ενεργειακής απόδοσης των βιομηχανικών κτιρίων και να αναπτυχθούν μαθηματικές μέθοδοι αξιολόγησης των αντίστοιχων αποδόσεων.

Τα πορίσματα που θα προκύψουν από μια ανάλογη προεργασία είναι πιθανό ότι θα εμπλουτίσουν και θα ισχυροποιήσουν τα επιχειρήματα για σχεδιασμό και κατασκευή πιο αποδοτικών, τεχνολογικά προηγμένων, άνετων και φιλικών προς το περιβάλλον βιομηχανικών κτιρίων στην Ελλάδα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Papamanolis N., The Main Constructional Characteristics of Contemporary Urban Residential Buildings in Greece, Building and Environment, Vol. 40, Issue 3, March 2005, pp. 389-396.
2. Papamanolis N., Characteristics of the Environmental and Energy Behaviour of Contemporary Urban Buildings in Greece, Architectural Science Review, Vol. 49, No 2, June 2006, pp. 120-126.
3. Κ.Α.Π.Ε., http://www.cres.gr/energy_saving/biomixania/biomixania_intro.htm
4. Μηνόπουλος Σ., Μέτρα Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Βιομηχανικές Εγκαταστάσεις, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Μ.Π.Σ. Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Κτιρίων, Ε.Α.Π., 2006.
5. Υπουργείο Ανάπτυξης, Eurostat, http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page?_pageid=1996,45323734&_dad=portal&_schema=PORTAL&screen=welcomeref&open=/&product=REF_TB_energy&depth=2

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΑΠΟΘΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΟΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ιφιγένεια Θεοδωρίδουⁱ, Πέγκυ Αραβαντινού-Τζεⁱⁱ, Άγης Μ. Παπαδόπουλοςⁱⁱⁱ

ⁱ Fachbereich für Energieeffizientes Bauen, Fachgebiet Architektur,
TU Darmstadt, Deutschland

ⁱⁱ Αρχιτέκτων μηχανικός, Οικονομολόγος, MSc , MBA

ⁱⁱⁱ Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής, Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι τελευταίες εξελίξεις στον τομέα της ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο, σε συνδυασμό με το φλέγον θέμα της προστασίας του περιβάλλοντος, θέτουν νέες βάσεις για τη διαμόρφωση της ενεργειακής πολιτικής. Το γεγονός πως τα σημαντικότερα μοντέλα ενεργειακής κατανάλωσης βασίζονται στους υδρογονάνθρακες, η παραγωγή των οποίων μειώνεται, οδηγεί σε μία οιονεί μόνιμη ενεργειακή κρίση. Δεν είναι όμως μόνο οικονομική και πολιτική η διάσταση του προβλήματος. Αντιθέτως επιβάλλεται η μετουσίωση της περιβαλλοντικής ευαισθησίας στην πράξη.

Ο κτιριακός τομέας κατέχει ένα μεγάλο ποσοστό στην ενεργειακή κατανάλωση και την παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου. Στην Ευρώπη των 25 υπολογίζεται πως υπάρχουν περίπου 193 εκατομμύρια κτίρια, τα οποία ευθύνονται για το 40% της κατανάλωσης ενέργειας, το 25,9% αφορά κατοικίες. Η βιοκλιματική αρχιτεκτονική μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στον περιορισμό των εκπομπών CO₂ έως και κατά 60%, συμβάλλοντας ταυτόχρονα στη σταδιακή ανεξαρτητοποίηση από το πετρέλαιο.

Στην Ελλάδα το 77% των κτιρίων είναι κατοικίες, ενώ το 67,5% των κατοικιών βρίσκονται σε πολυκατοικίες. Ο τρόπος δόμησης των κτιρίων, κυρίως δε η ύπαρξη θερμομόνωσης στο κέλυφός τους, είναι σε άμεση συνάρτηση του έτους κατασκευής τους. Το ενδιαφέρον συμπέρασμα που εξάγεται αβίαστα είναι ότι θεωρητικά, κι εφόσον οι μελέτες των κτιρίων είχαν όντως εφαρμοστεί στην πράξη, μόνο το 30% των κτιρίων διαθέτει θερμομόνωση. Από αυτά σε αστική περιοχή βρίσκονται το 663.258 κτίρια, δηλαδή το 16,62% όλων των κτιρίων της χώρας.

Μόνο το 8,4% των ενοίκων χαρακτηρίζουν τη θερμική άνεση στο εσωτερικό τους ως πολύ καλή. Παράλληλα, τα ελληνικά κτίρια ευθύνονται για το 32% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας και περίπου για το 45% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Είναι λοιπόν εμφανής η ανάγκη παρέμβασης στα υφιστάμενα ελληνικά κτίρια, με στόχο την μείωση κατανάλωσης της ενέργειας. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια ανάλυση του κτιριακού αποθέματος, ώστε να ποσοτικοποιηθούν οι δυνατότητες παρέμβασης και το δυναμικό ενέργειας που μπορεί να εξοικονομηθεί.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κατασκευαστικός κλάδος θεωρείται ένας από τους σημαντικότερους κλάδους στην Ε.Ε. Το 2003 η κατασκευαστική δραστηριότητα ανήλθε σε 915 δις ευρώ, και κάλυψε το 10% του ΑΕΠ της ΕΕ, ενώ απασχολήθηκαν 11,7 εκατ. εργαζόμενοι, μέγεθος που αντιστοιχεί στο 7% της συνολικής απασχόλησης της ΕΕ [1]. Η ποσοστιαία συμμετοχή της Ελλάδας το 2003, στο συνολικό προϊόν του κατασκευαστικού κλάδου της ΕΕ είναι 1,5%, και αντιστοιχεί σε 14 δις ευρώ σε τρέχουσες τιμές του 2003 [2]. Το σύνολο της εγχώριας κατασκευαστικής

δραστηριότητας (δημόσιας και ιδιωτικής), σύμφωνα με τη μελέτη του Ι.Ο.Κ. [2], για το 2002 ανήλθε σε 12,180 δις ευρώ.

2. ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΑΙ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Η σημαντικότητα του κατασκευαστικού κλάδου, τόσο από οικονομική όσο και από ενεργειακή άποψη οδήγησε την Ε.Ε. στη σύσταση της Οδηγίας 93/76/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 13ης Σεπτεμβρίου 1993 “για τον περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακος με τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης (SAVE)” καθώς και της οδηγίας 2002/91/ΕΚ “για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων” [3].

Οι οδηγίες ενσωματώθηκαν στο Εθνικό μας δίκαιο με την Κ.Υ.Α. 21475/4707 (ΦΕΚ Β΄, 880/19-8-98) [4], η οποία εισάγει έννοιες, θεσμούς και διαδικασίες που επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στον τρόπο σχεδιασμού, κατασκευής και ελέγχου των κτιριακών έργων σύμφωνα με τον Κανονισμό Ορθολογικής Χρήσης και Εξοικονόμησης Ενέργειας (Κ.Ο.Χ.Ε.Ε. 1998), που αντικαθιστά τον Κανονισμό Θερμομόνωσης Κτιρίων [5].

Ο Κ.Ο.Χ.Ε.Ε δεν εφαρμόστηκε στην πράξη, για το λόγο αυτό θεσπίστηκε ο νόμος 3661/2008 [6] όπου προβλέπεται το ολοκληρωμένο πλαίσιο της ενεργειακής πιστοποίησης των κτιρίων.

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΑΠΟΘΕΜΑΤΟΣ

Σύμφωνα με την πιο πρόσφατη απογραφή των ελληνικών οικοδομών και κτιρίων, που πραγματοποιήθηκε το Δεκέμβριο του 2000 σε όλη την επικράτεια, και από την επεξεργασία των σχετικών δεδομένων που συλλέχθηκαν από την Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδος, προέκυψε ότι: ο συνολικός αριθμός των κτιρίων ανέρχεται σε 3.577.355 και των κατοικιών σε 5.627.549 από τις οποίες οι 4.381.317 είναι καταγεγραμμένες ως κανονικές [7]. Κατά την επεξεργασία των στατιστικών στοιχείων της απογραφής, σύμφωνα με το σχέδιο Κανονισμού Ορθολογικής Χρήσης και Εξοικονόμησης Ενέργειας [8] και τον διαχωρισμό της Ελλάδας σε τέσσερις κλιματικές ζώνες [9], παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό κτιρίων και κατοικιών καταγράφονται στη Β΄ ζώνη και ακολουθούν ιεραρχικά οι Γ΄, Δ΄ και Α΄ ζώνη [10]. Εξετάζοντας συγκεντρωτικά τα στοιχεία για τη χρήση των κτιρίων, προκύπτει μια ανάγλυφη σημασία του μεγέθους των κατοικιών, η οποία ανέρχεται στο 76,97% των κτιρίων.

4. ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΚΛΑΣΕΙΣ

Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην κατηγοριοποίηση των ελληνικών κτιρίων με ευκρινή κριτήρια. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή μια λεπτομερής συσταδοποίηση (clustering). Οι παράγοντες που διαμόρφωσαν τις κλάσεις είναι το έτος κατασκευής, τα υλικά και οι τεχνικές κατασκευής, ιστορικά, πολιτικά και κοινωνικά δρώμενα.

Α κατηγορία - έως 1945. Χαρακτηριστική είναι η δεκαετία 1832-1842 κατά την οποία θεσπίζονται διατάξεις, που προσπαθούν να οριοθετήσουν και να συγκεκριμενοποιήσουν τον τρόπο δόμησης κτιρίων και πολεοδόμησης, μιμούμενες Γερμανικά και Γαλλικά πρότυπα. Μέσα από αυτή τη διεργασία δημιουργείται και το λεγόμενο «Νεοκλασικό» ρεύμα. Κατά τη δεκαετία 1920-1930 παράγεται νομοθετικό έργο κάτω από την πιεστική ανάγκη αποκατάστασης των προσφύγων, της ραγδαίας εκβιομηχάνισης της χώρας και διεύρυνση της αστικής τάξης [11]. Μετά το 1922, με τη χρησιμοποίηση του ανελκυστήρα, οι όροφοι αυξάνονται σε αριθμό, οι εισοδοί περιορίζονται σε μία, αλλά η εξωτερική εμφάνιση διατηρεί τα στοιχεία της προηγούμενης περιόδου -μικρά μπαλκόνια, γείσα, μικρά παράθυρα- και σε κανονικά διαστήματα αντιμετώπιση της πρόσοψης σαν να πρόκειται για «αρχοντικό» μάλλον παρά για κατοικία [12].

Β1 κατηγορία - 1945-1960. Κατά την περίοδο αυτή αρχίζει πλέον και εφαρμόζεται μαζικά το οπλισμένο σκυρόδεμα αναδιαμορφώνοντας τις κατασκευαστικές πρακτικές. Η εξάπλωση των

νέων υλικών και μεθόδων κάτω από την πιεστική ανάγκη κατασκευής καταλυμάτων, οδηγεί στην ανέγερση πολυωρόφων κτισμάτων και σε συνδυασμό με τα ρεύματα του μοντερνισμού και του Bauhaus, οδηγούν στην μορφή της μεσοπολεμικής πολυκατοικίας, που στεγάζει πλέον περισσότερες οικογένειες σε οροφодιαμερίσματα [11]. Οι κατασκευές με μπετόν, ανέρχονται στο 47,84% των συνολικών κτιρίων της χώρας και ακολουθούν οι κατασκευές από τούβλα-τσιμεντόλιθους και πέτρα. Την περίοδο αυτή παράγεται καθοριστικό νομοθετικό έργο, με διατάξεις που επηρέασαν την μορφή του κτισμένου χώρου, όπως αυτές της κάθετης και οριζόντιας ιδιοκτησίας που έδωσε την δυνατότητα της επ' αντιπαροχή παραγωγής κατοικίας, με την κατανομή του κόστους της σε πολλούς συνιδιοκτήτες. Επίσης ο ΓΟΚ του 1955 καθορίζει την μορφή των πόλεων με το συνεχές σύστημα για το πυκνοκατοικημένο κέντρο, το πανταχόθεν ελεύθερο για τα προάστια και τις κηπουπόλεις και τα ενδιάμεσα συστήματα, το ασυνεχές και των περυγών που χρησιμοποιούνται και στους οικισμούς.

B2 κατηγορία - 1950-1980. Η εισαγωγή του Κανονισμού Θερμομόνωσης Κτιρίων (ΚΘΚ) το 1979 (ΦΕΚ362Δ/1979) και η εφαρμογή του από το 1981 και έπειτα, μας επιτρέπει να ταξινομήσουμε τα κτίρια αντίστοιχα. Η διάκριση έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς ο ΚΘΚ αποτελεί μέχρι στιγμής, το μοναδικό νομοθετικό εργαλείο βελτίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς των ελληνικών κτιρίων σε εφαρμογή. Παράλληλα γίνονται αλληπάλληλες διορθωτικές κινήσεις σε σχέση με το νομοθετικό πλαίσιο, με τροποποίηση του ΓΟΚ αλλά και συμπληρωματικών διαταγμάτων, όπως η επιβολή μέγιστου συντελεστή εκμετάλλευσης (δόμησης), ενώ εκδίδεται ο Γενικός Οικοδομικός Κανονισμός του 1973. Σταδιακά η αύξηση της πληθυσμιακής πυκνότητας αναγκάζει τα αστικά κέντρα σε γρήγορη ανοικοδόμηση και επέκταση. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται πρώτα στην Αθήνα και στη Θεσ/νίκη, αλλά επεκτείνεται ραγδαία στα μεγάλα αστικά κέντρα, τις κωμοπόλεις και τους οικισμούς [11].

Γ κατηγορία 1980-1990. Πρόκειται για μία μάλλον θολή περίοδο έως ότου εδραιωθεί πλήρως η εφαρμογή της θερμομόνωσης. Η επαφή του κτιρίου με το έδαφος ήταν δεδομένη μέχρι πριν τον Γ.Ο.Κ. του '85, καθώς μετέπειτα κυριάρχησε η πιλοτή [13].

Δ κατηγορία από το 1990 έως σήμερα.

Ο ακόλουθος πίνακας αφορά στην Γ Κλιματική Ζώνη (σύμφωνα με το σχέδιο του Κανονισμού Ορθολογικής Χρήσης και Εξοικονόμησης Ενέργειας του ΥΠΕΧΩΔΕ, 1998), η οποία αποτελεί και τη ζώνη αναφοράς, με χαρακτηριστικό δείγμα τη Θεσσαλονίκη. Τα κλιματικά δεδομένα της ευρύτερης περιοχής είναι γενικά μεσογειακό και ηπειρωτικό στο εσωτερικό, με κρύο χειμώνα και ζεστό καλοκαίρι, παρουσιάζοντας εμφανείς αντιστοιχίες με κλίματα της κεντρικής και νότιας Ευρώπης. Για την Γ κλιματική Ζώνη και συγκεκριμένα τη Μακεδονία (συνολικός αριθμός κτιρίων 830.938) προκύπτουν τα εξής:

Κλιματική ζώνη Γ - Μακεδονία	A κατηγορία 1919-1945	B1 κατηγορία 1945-1950	B2 κατηγορία 1950-1980	Γ κατηγορία 1981-1985	Δ κατηγορία 1986 έως σήμερα
Αστικά	33.074	212.985		43.837	88.096
Αγροτικά	45.513	270.536		41.953	78.780
Σύνολο	78.587	483.521		85.790	166.876
%	9,46	58,19		10,32	20,08

Πίνακας 1: Τυπική κατηγοριοποίηση των κτιρίων κατοικιών στην Ελλάδα. Κλάσεις ανά χρονολογία. Τα στοιχεία πηγάζουν από την τελευταία καταγραφή της ΕΣΥΕ για το 2000 και είναι επεξεργασμένα.

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

5.1. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΙΔΙΚΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟΥ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ ΜΕ CLUSTERING

Για την ανάλυση του κτιριακού αποθέματος της Θεσσαλονίκης δημιουργήθηκε ένα ερωτηματολόγιο με στόχο τη συλλογή στοιχείων για την ενεργειακή συμπεριφορά των κατοικιών, είτε αυτές είναι τύπου μονοκατοικίας είτε διαμερίσματος.

Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην εχεμύθεια και διασφαλίστηκε η διακριτική διαδικασία συλλογής στοιχείων, με πλήρη ανωνυμία. Από το ερωτηματολόγιο λήφθηκε δείγμα 550 κατοικιών εκ των οποίων το 77% είναι διαμερίσματα και το 23% μονοκατοικίες. Πριν τη βασική επεξεργασία των αποτελεσμάτων διεξήχθη έλεγχος ποιότητας αποτελεσμάτων, ώστε τελικά να ενδείκνυται προς αξιολόγηση και επεξεργασία το 83% του αρχικού δείγματος. Η δομή του βασίζεται σε 5 ενότητες που αφορούν στα κατασκευαστικά και τυπολογικά χαρακτηριστικά του κτιρίου, τον προσδιορισμό των συστημάτων θέρμανσης ψύξης και ζεστού νερού και τον τρόπο λειτουργίας τους, στην κοστολόγησή τους και σε ήδη υπάρχουσες παρεμβάσεις που τυχόν έχουν γίνει.

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας έδωσαν τα ακόλουθα γραφήματα:

1. Επιφάνεια ανά κλάση
2. Έτος κατασκευής ανά κλάση
3. Μέση τιμή για τις πρωινές και βραδινές θερμοκρασίες και ώρες λειτουργίας ανά κλάση.
4. Μέση-διαχωριστική τιμή ενεργειακής κατανάλωσης (θερμικής και ηλεκτρικής) ανά κλάση.
5. Συστήματα ζεστού νερού ανά κλάση
6. Σύστημα θέρμανσης ανά κλάση
7. Ένοικοι ανά τετραγωνικό
8. Αριθμός κλιματιστικών ανά κλάση
9. Τύπος υαλοπινάκων
10. Γειτνίαση ανά κλάση
11. Ηλεκτρική κατανάλωση ανά m^2 ανά κλάση
12. Θερμική κατανάλωση ανά m^2 ανά κλάση
13. Θερμική κατανάλωση ανά m^2 ανά κεφαλή ανά κλάση
14. Ηλεκτρική κατανάλωση ανά m^2 ανά κεφαλή ανά κλάση

5.2. ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΟΙΚΟΠΕΔΩΝ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Για τις ανάγκες της μελέτης της διαχείρισης υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος μελετήθηκαν συγκεκριμένα οικοδομικά τετράγωνα ως προς τη δυνατότητα βελτίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς τους ανάλογα με τη χρονολογική τους κλάση. Τα δύο οικοδομικά τετράγωνα που επιλέχθηκαν για μελέτη βρίσκονται στην περιοχή της Άνω Πόλης και στην περιοχή της Καλαμαριάς αντίστοιχα. Αποτυπώθηκαν οι όψεις επί των οδών και οι ακάλυπτοι χώροι, καθώς και οι ταράτσες τους. Έγινε μια ποιοτική καταγραφή των κτιρίων και κατόπιν εξετάστηκαν πιθανές μέθοδοι παρέμβασης και εξετάστηκαν μια σειρά από μέτρα επεμβάσεων ως προς την δυνατότητα εφαρμογής τους.

Το πρώτο οικοδομικό τετράγωνο περικλείεται από τις οδούς Κασσάνδρου, Δουμπιώτου Στρατηγού και Αντωνίου Πολυξένου. Επιλέχθηκε λόγω της παλαιότητας και ποικιλομορφίας των κτιρίων από τα οποία αποτελείται. Τα περισσότερα έχουν χτιστεί κατά τη δεκαετία του 1970, συνεπώς δεν είναι θερμομονωμένα, διαθέτουν παλαιάς τεχνολογίας συστήματα θέρμανσης και ως επί το πλείστον δεν διαθέτουν συστήματα ψύξης. Η δυνατότητα παρεμβάσεων για εξοικονόμηση ενέργειας στο κέλυφος και στα συστήματα θέρμανσης-ψύξης είναι μεγάλη στα συγκεκριμένα κτίρια. Παρ' όλα αυτά οι δυσκολίες που προκύπτουν

λόγω της τυπολογίας τους (γεινίαση με δύο κτίρια, μικρή επιφάνεια του ακάλυπτου χώρου, μικρές αποστάσεις από τα απέναντι κτίρια, παράνομες κατασκευές στις ταράτσες των κτιρίων) είναι εμφανής και καθιστά ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα την εκπόνηση αντίστοιχης μελέτης.

Το οικοδομικό τετράγωνο που βρίσκεται στην περιοχή της Καλαμαριάς περικλείεται από τις οδούς Μητροπολίτου Καλλίδου, Μπαλλά, Παπαπέτρου και Αβδελά. Σε αντίθεση με το προηγούμενο οικοδομικό τετράγωνο, τα κτίρια έχουν χτιστεί κατά τη δεκαετία του 1990. Είναι συνεπώς θερμομονωμένα, διαθέτουν σχετικά νέας τεχνολογίας συστήματα θέρμανσης και διαθέτουν σχεδόν όλα κάποιο σύστημα ψύξης. Οι πιθανές παρεμβάσεις και το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας είναι σίγουρα μικρότερες, αλλά δεν παύουν να υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης στην κατανάλωση ενέργειας των κτιρίων αυτών.

6. ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι επεμβάσεις σε ένα κτίριο μπορούν να αφορούν το κτιριακό κέλυφος με την προσθήκη θερμομόνωσης στους τοίχους, στις οροφές και στα δάπεδα, αντικατάσταση παλαιών παραθύρων, θυρών και κουφωμάτων, χρήση ειδικών επιχρισμάτων σε οροφές και όψεις, εγκατάσταση εξωτερικών σκιάστρων, φύτευση στέγης. Επίσης τον περιβάλλοντα χώρο του κτιρίου με τη χρήση αντίστοιχης βλάστησης. Ακόμα τις εγκαταστάσεις θέρμανσης, ψύξης, φωτισμού, ζεστού νερού και τις ηλεκτρικές συσκευές, αναβάθμιση του συστήματος κεντρικής θέρμανσης και κλιματισμού, εγκατάσταση εναλλακτών θερμότητας, κυκλοφορητών, γεωθερμικών αντλιών και ανεμιστήρων οροφής. Την ορθολογική χρήση του κτιρίου και την αξιοποίηση των δομικών του στοιχείων, την ενεργειακή διαχείριση, τον φυσικό αερισμό και την αξιοποίηση της θερμικής μάζας του κτιρίου [14]. Οι επεμβάσεις μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις κατηγορίες, μικρής, μεσαίας και μεγάλης κλίμακας.

Στον ακόλουθο πίνακα καταγράφονται όλα τα είδη των πιθανών παρεμβάσεων σε υφιστάμενα κτίρια, οι προϋποθέσεις που πρέπει να καλύπτει ένα κτίριο ώστε να επιδέχεται αυτή την παρέμβαση, ένα ενδεικτικό ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας και ενδεικτικές τιμές του κόστους της παρέμβασης [9].

ΠΑΡΕΜΒΑΣΗ	ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΚΤΙΡΙΩΝ	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΚΕΡΔΗ	ΜΕΣΟ ΚΟΣΤΟΣ
1. Προσθήκη εξωτερικής θερμομόνωσης στην τοιχοποιία για κτίρια χωρίς ή με ανεπαρκή μόνωση.	Σχεδόν όλα τα κατοικημένα κτίρια πριν το 1980 δεν είναι μονωμένα. Περίπου 10% των κτιρίων που κατασκευάζονται κατά τη διάρκεια (1980-2001) έχουν ανεπαρκή μόνωση προσόψεων. Διάρκεια ζωής του υλικού 30 έτη.	33-60 % της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση.	40 € / m ² επιφάνειας τοίχου.
2. Προσθήκη εξωτερικής θερμομόνωσης στην οροφή για κτίρια χωρίς ή με ανεπαρκή μόνωση οροφής.	Περίπου 70% των κτιρίων πριν το 1980 δεν είναι μονωμένα. Περίπου 10% των κτιρίων που κατασκευάζονται κατά τη διάρκεια (1980-2001) έχουν ανεπαρκή μόνωση οροφής. Διάρκεια ζωής του υλικού 30 έτη.	2-14 % της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση.	24 € / m ² θερμομόνωσης.

3. Αεροστεγή στεγανοποίηση των ανοιγμάτων.	Όλα τα κτίρια που κατασκευάζονται πριν από το 1990 και 10% των κτιρίων που κατασκευάζονται κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '90 χρειάζονται αεροστεγή στεγανοποίηση των ανοιγμάτων. Διάρκεια ζωής του υλικού 2 έτη.	16-21 % της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση.	20 € / διαμέρισμα.
4. Αντικατάσταση κουφωμάτων με χρήση διπλών υαλοπινάκων.	Όλα τα κτίρια που κατασκευάζονται πριν από το 1985 και 10% των κατοικημένων κτιρίων που κατασκευάζονται κατά τη διάρκεια του 1985-2001. Διάρκεια ζωής 30 έτη.	14-20 % της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση.	160 € / m ² επιφάνειας υαλοπινάκων.
5. Συντήρηση των εγκαταστάσεων κεντρικής θέρμανσης.	Όλα τα υπάρχοντα κατοικημένα κτίρια χρειάζονται την ετήσια συντήρηση σύμφωνα με τον εθνικό κανονισμό.	10-12 % της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση.	110 € / λέβητα.
6. Αντικατάσταση λέβητα με αποδοτικότερο λέβητα πετρελαίου.	Για όλα τα κατοικημένα κτίρια με τις παλαιές εγκαταστάσεις κεντρικής θέρμανσης. Διάρκεια ζωής 25 έτη.	17 % της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση.	1180 € / SD λέβητα. 2950 € / AB λέβητα.
7. Αντικατάσταση λέβητα με αποδοτικότερο λέβητα φυσικού αερίου.	Για 15% των υπαρχόντων κατοικημένων κτηρίων με τα παλαιά συστήματα κεντρικής θέρμανσης, όπου φυσικό αέριο είναι διαθέσιμο. Διάρκεια ζωής 25 έτη.	21 % της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση.	1180 € / SD λέβητα. 2950 € / AB λέβητα.
8. Εγκατάσταση αισθητήρων για τον έλεγχο των θερμοκρασιών λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης.	Για όλα τα κατοικημένα κτίρια χωρίς αισθητήρες για έλεγχο των θερμοκρασιών λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης, σύμφωνα με τους εθνικούς κανονισμούς. Διάρκεια ζωής 20 έτη.	3-6 % της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση.	880 € / κτίριο.
9. Εγκατάσταση θερμοστατών χώρου.	Για όλα τα κατοικημένα κτίρια, τα οποία δεν είναι εξοπλισμένα με θερμοστάτες χώρου. Διάρκεια ζωής 15 έτη.	3-6 % της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση.	290 € / SD. 1500 € / AB.
10. Τοποθέτηση εξωτερικής σκίασης.	Για 50% των κλιματιζόμενων κατοικημένων κτιρίων, υποθέτοντας ότι περίπου 20% του συνολικού χώρου των κατοικιών είναι κλιματιζόμενο (οι κατοικίες είναι μερικώς κλιματιζόμενες). Διάρκεια ζωής 10 έτη.	10-20 % της ηλεκτρικής κατανάλωσης ενέργειας για ψύξη.	30 € / m ² επιφάνειας σκίασης.

11. Εγκατάσταση ανεμιστήρων οροφής.	Για 20% των κλιματιζόμενων κατοικημένων κτιρίων. Διάρκεια ζωής 10 έτη.	60 % της ηλεκτρικής κατανάλωσης ενέργειας για ψύξη.	50 € / ανεμιστήρα οροφής.
12. Αντικατάσταση παλαιών και αναξιόπιστων μονάδων κλιματισμού.	Για 50% των κτιρίων με τις τοπικές μονάδες κλιματισμού, οι οποίες υποτίθεται ότι είχαν τις παλαιές και ανεπαρκείς μονάδες. Διάρκεια ζωής 10 έτη.	72 % της ηλεκτρικής κατανάλωσης ενέργειας για ψύξη.	700 € / κλιματιστική μονάδα.
13. Εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης.	Για όλα τα κτίρια, τα οποία δεν είναι εξοπλισμένα με τους ηλιακούς συλλέκτες. Διάρκεια ζωής 10 έτη.	50-80 % της ηλεκτρικής κατανάλωσης ενέργειας για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης.	900 € / διαμέρισμα.
14. Εγκατάσταση ενεργειακά αποδοτικότερων λαμπτήρων.	Για όλα τα κτίρια, τα οποία δεν έχουν ήδη τους ενεργειακά αποδοτικότερους λαμπτήρες. Διάρκεια ζωής 10 έτη.	60 % της ηλεκτρικής κατανάλωσης ενέργειας για φωτισμό.	1 € / m ² επιφάνειας δαπέδου διαμερίσματος.

Πίνακας 2: είδη των πιθανών παρεμβάσεων σε υφιστάμενα κτίρια, όπου SD κτίριο μονοκατοικίας και AB διαμέρισμα.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι σημερινές μεγαλουπόλεις, τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό, υποφέρουν από τη γήρανση των κτιρίων στο κέντρο τους είτε πρόκειται για κατοικίες είτε για δημόσια κτίρια. Ταυτόχρονα με την κατασκευαστική παρακμή παρατηρείται και πτώση του κοινωνικού επιπέδου, ενώ οι μάζες των κέντρων αναζητούν υψηλότερο βιοτικό σε νεόδμητα κτίρια της περιφέρειας [15]. Παράλληλα όμως με την οικονομική κρίση στον τομέα των κατασκευών η αγορά μοιάζει να ασφυκτιά. Είναι συνεπώς εμφανής η ανάγκη για ενεργειακή με ταυτόχρονη κατασκευαστική και ποιοτική αναβάθμιση των κτιρίων [16].

Για να φτάσει κανείς στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να υπάρξει μια αλληλουχία συσχετισμών και σταδιακών βημάτων, όπως ο προσδιορισμός της χρονολογικής κλάσης, η ποιότητα κατασκευής, η καταγραφή των συστημάτων ψύξης θέρμανσης και ζεστού νερού κ. α. Τα ερωτήματα αυτά, όπως απαντήθηκαν στο ερωτηματολόγιο μας δίνουν μια εικόνα της μέσης συμπεριφοράς των πολυκατοικιών της Θεσσαλονίκης.

Ταυτόχρονα μελετήθηκαν τυπικά οικοδομικά τετράγωνα και εξετάστηκαν οι δυνατότητες παρέμβασης σε αυτά, όπου διαπιστώθηκε ο μεγάλος βαθμός δυσκολίας εφαρμογής συνολικών μέτρων.

Συνοπτικά θα έλεγε κανείς ότι πέρα από την έλλειψη νομοθετικού πλαισίου, τις οικονομικές και διαδικαστικές δυσκολίες που προκύπτουν το μεγαλύτερο πρόβλημα έγκειται στην ίδια τη μορφή του κτιρίου της πολυκατοικίας καθ' αυτό. Ένα ιδιαίτερο γνώρισμα της ελληνικής αρχιτεκτονικής που απαιτεί προσεκτική μελέτη και αρχιτεκτονική δεξιότητα εάν ο σκοπός είναι τόσο η βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς των πόλεων όσο και η αισθητική τους αναβάθμιση.

1. IOK, 2004α, <http://www.iok.gr/IOK-research%20index.htm>
2. IOK, 2004β, <http://www.iok.gr/IOK-research%20index.htm>
3. Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, 2002, <http://eur-lex.europa.eu/el/index.htm>
4. Κ.Υ.Α. 21475/4707, ΦΕΚ Β', 880/19-8-98, www.et.gr
5. ΦΕΚ362Δ/1979, www.et.gr
6. Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, 2008^α, www.et.gr
7. ΕΣΥΕ, 2000^η, <http://www.statistics.gr/>
8. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε, 1998, <http://www.minenv.gr/4/47/g4700.html>
9. Constantinos A. Balaras et al., European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings, *Buildings and Environment*, Vol. 42, 2007
10. ΕΜΘΠΜ, 2008, <http://aix.meng.auth.gr/lhtee/index.html>
11. Φ. Μορτάκης, «Ιστορική αναδρομή του θεσμικού πλαισίου που επηρεάζει την Αρχιτεκτονική δημιουργία στον ελληνικό χώρο», για την ΔΟΚΚ, <http://www.sadas-pea.gr/mortakis.html>
12. Φαίδων Βαρνάς, Εφημερίδα Μακεδονία, Απρίλιος 2007
13. Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ, «Η αστική Πολυκατοικία σε εξέλιξη»
14. Constantinos A. Balaras et al., European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings, *Building and Environment*, Vol. 42, 2002
15. Αναστάσιος Μ. Κωτσιόπουλος, Αθανάσιος Ι. Αραβαντινός, Τα νέα αστικά τοπία και η ελληνική πόλη, Μάιος 2006, Κριτική ΑΕ
16. Objekt + Produkt, Lausitztower Hoyerswerda, *DETAIL*, Vol. 11, 2007
17. M. Santamouris et al., On the relation between the energy and social characteristics of the residential sector, *Energy and Buildings*, Vol. 39, 2007
18. Bart Poel, Gerelle van Cruchten, Constantinos A. Balaras, Energy performance assessment of existing dwellings, *Energy and Buildings*, Vol. 39, 2007
19. Papadopoulos A. M., Theodosiou TG, Karatzas KD. Feasibility of energy saving renovation measures in urban buildings: the impact of energy prices and the acceptable payback time criterion. *Energy and Buildings* 2002; 34(5):455–66.
20. Balaras CA, Drousa K, Argiriou AA, Asimakopoulos DN. Potential for energy conservation in apartment buildings. *Energy and Buildings* 2000; 31(2):143–54.
21. Papadopoulos A.M., Theodosiou T. and Karatzas K. (2002), Feasibility of energy saving renovation measures in urban buildings: The impact of energy prices and the acceptable pay back time criterion, *Energy and Buildings*, Vol. 34, 455-466
22. Theodosiou T.G., Papadopoulos A.M. (2008), The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions, *Energy and Buildings*, Vol. 40, 2083-2089

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΑΠΟΘΕΜΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΤΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟ ΕΡΓΟ DATAMINE

Ε. Δασκαλάκη, Π. Δρούτσα, Α. Γαγλία, Σ. Κοντογιαννίδης και Κ. Μπαλαράς
Ομάδα Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΟΕΕ), Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης
Ανάπτυξης (ΙΕΠΒΑ), Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (ΕΑΑ), Ι. Μεταξά και Βασ. Παύλου
152 36 Π. Πεντέλη, edask@meteo.noa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαδικασία των ενεργειακών επιθεωρήσεων και έκδοσης πιστοποιητικών ενεργειακής απόδοσης (ΠΕΑ) κτιρίων στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2002/91/EK για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων (EPBD) αποτελεί μια μοναδική ευκαιρία συγκέντρωσης πληροφοριών για τα χαρακτηριστικά του κτιριακού αποθέματος και της ενεργειακής του απόδοσης σε εθνικό και Ευρωπαϊκό επίπεδο. Το έργο DATAMINE που παρουσιάζεται στη παρούσα εργασία, είναι ένα πρώτο βήμα για τη συλλογή, οργάνωση και αξιοποίηση των δεδομένων που θα συγκεντρώνονται από τις ενεργειακές επιθεωρήσεις και τα ΠΕΑ των κτιρίων στις χώρες μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Τα διαθέσιμα στοιχεία αυτά εισάγονται σε μια Κοινή Βάση Δεδομένων (ΚΒΔ) Ενεργειακής Επιθεώρησης Κτιρίων. Η ΚΒΔ περιλαμβάνει 255 παραμέτρους, από τις οποίες προκύπτει η αξιολόγηση του κτιριακού αποθέματος και της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, καλύπτοντας το ευρύτερο δυνατό φάσμα χαρακτηριστικών όσον αφορά το κτιριακό κέλυφος, τις ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις και την ενεργειακή απόδοσή τους.

Το Ελληνικό πιλοτικό πρόγραμμα περιλαμβάνει την επεξεργασία στοιχείων από 250 κτίρια του οικιακού και τριτογενή τομέα (κατοικίες, γραφεία, ξενοδοχεία, σχολεία, νοσοκομεία, αθλητικά κέντρα και αεροδρόμια) από αντιπροσωπευτικές πόλεις της χώρας και για διαφορετικές περιόδους κατασκευής. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της ΚΒΔ του DATAMINE με έμφαση στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και την ενεργειακή συμπεριφορά του αντιπροσωπευτικού δείγματος των Ελληνικών κτιρίων και συγκριτικά αποτελέσματα με άλλα Ευρωπαϊκά κτίρια.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παγκόσμια ευαισθητοποίηση σε θέματα προστασίας του περιβάλλοντος αλλά και η αναγκαιότητα ορθολογικής χρήσης ενέργειας και φυσικών πόρων στον πλανήτη, έχουν σήμερα στρέψει το ενδιαφέρον στη χάραξη στρατηγικών εξοικονόμησης ενέργειας σε όλους τους ενεργοβόρους τομείς, μεταξύ των οποίων βρίσκεται και ο κτιριακός τομέας ο οποίος ευθύνεται για περίπου το 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην Ευρώπη. Η ετήσια κατανάλωση ενέργειας το 2006 στα ελληνικά κτίρια κατοικιών και τον τριτογενή τομέα ήταν 101650 GWh και αντιπροσωπεύει το 40.7% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας [1]. Σύμφωνα με την Εθνική Στατιστική Υπηρεσία, στην Ελλάδα, υπάρχουν περίπου 4 εκατομμύρια κτίρια με συνολική επιφάνεια 552 εκατομμύρια m². Το 77% των κτιρίων είναι κατοικίες, ενώ το υπόλοιπο 23% είναι κτίρια του τριτογενή τομέα. Το μεγαλύτερο ποσοστό των κατοικιών βρίσκεται σε πολυκατοικίες και τα περισσότερα κτίρια είναι μεγάλης ηλικίας, με παλιές εγκαταστάσεις και χαμηλές ενεργειακές αποδόσεις.

Η γνώση των ειδικών χαρακτηριστικών του κτιριακού αποθέματος και η παρακολούθηση της ενεργειακής του συμπεριφοράς, αποτελεί σημαντική προϋπόθεση για τη λήψη των κατάλληλων μέτρων σε τοπικό ή και εθνικό επίπεδο, που θα οδηγήσουν στην ουσιαστική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στον κτιριακό τομέα. Επομένως, η ανάγκη συστηματικής συλλογής, αποθήκευσης και επεξεργασίας δεδομένων από κτίρια παρουσιάζεται πλέον επιτακτική.

Η αποτύπωση του κτιριακού αποθέματος και της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων έχει αρχίσει με την εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2002/91/EK για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων (EPBD) και την έκδοση των Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ) για όλα σχεδόν τα κτίρια στην Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ). Παρόμοιες διατάξεις προβλέπονται πλέον και στην Ελλάδα σύμφωνα με τον Νόμο 3661/08 «Μέτρα για την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων και άλλες διατάξεις» του Υπουργείου Ανάπτυξης (ΦΕΚ 89/Α 3661 - 19/5/2008) και σύντομα αναμένεται να δημοσιοποιηθεί ο νέος Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK). Το ΠΕΑ θα αποδίδει στο κτίριο έναν αριθμητικό δείκτη για τη συγκριτική αξιολόγηση της ενεργειακής του απόδοσης, ενώ παράλληλα θα συνοδεύεται από συστάσεις με οικονομικά αποδοτικά μέτρα βελτίωσής της. Το ΠΕΑ θα είναι απαραίτητο κατά την κατασκευή νέων κτιρίων, κατά την πώληση ή την εκμίσθωση των κτιρίων, και για υφιστάμενα κτίρια ($>1000 \text{ m}^2$) που υπόκεινται σε ριζική ανακαίνιση. Επιπλέον, γίνεται υποχρεωτική η επιθεώρηση λεβήτων, εγκαταστάσεων θέρμανσης και κλιματισμού, τα νέα κτίρια θα πρέπει να πληρούν τις ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης, και επιβάλλεται η ενεργειακή μελέτη για τα μεγάλα κτίρια ($>1000 \text{ m}^2$). Όλα τα στοιχεία των επιθεωρήσεων και των πιστοποιητικών θα τηρούνται από την αρμόδια Διεύθυνση του Υπουργείου Ανάπτυξης σε ηλεκτρονική μορφή.

Το ευρωπαϊκό έργο DATAMINE, που περιγράφεται στην ενότητα που ακολουθεί, παρέχει τα απαιτούμενα εργαλεία ώστε να είναι δυνατή η εκμετάλλευση της τεράστιας αξίας πληροφορίας που θα προέρχεται από την έκδοση των ΠΕΑ και θα αποτελέσουν μια καλή βάση για την καθιέρωση εναρμονισμένων συστημάτων ελέγχου του κτιριακού αποθέματος και της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων σε τοπικό, εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο. Στην εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την πιλοτική εφαρμογή στην Ελλάδα και η σύγκριση αντιπροσωπευτικών χαρακτηριστικών των κτιρίων σε ευρωπαϊκό επίπεδο.

2. DATAMINE: ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Το έργο DATAMINE είχε ως στόχο του τη βελτίωση της υπάρχουσας γνώσης για το κτιριακό απόθεμα και την ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων μέσα από τα στοιχεία που συγκεντρώνονται κατά τη διάρκεια της ενεργειακής επιθεώρησης & πιστοποίησης των κτιρίων στις χώρες της ΕΕ.

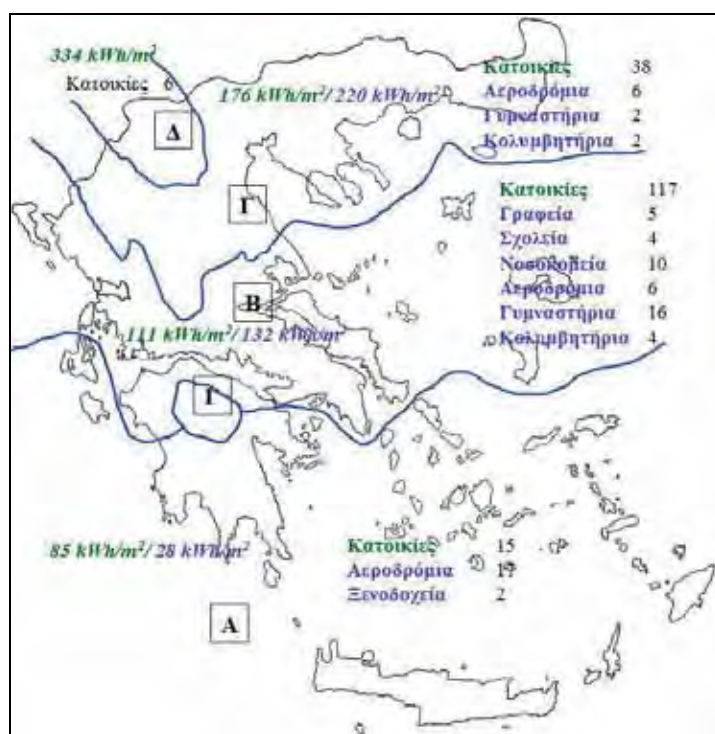
Στα πλαίσια του προγράμματος δημιουργήθηκε μια ευρωπαϊκή Κοινή Βάση Δεδομένων (ΚΒΔ) που είναι συνδεδεμένη με ένα εργαλείο επεξεργασίας και στατιστικής ανάλυσης, ώστε να είναι δυνατή η συλλογή αλλά και η επεξεργασία δεδομένων από κτίρια στη φάση μιας ενεργειακής επιθεώρησης. Η βάση περιλαμβάνει 255 παραμέτρους που καλύπτουν το ευρύτερο δυνατό φάσμα χαρακτηριστικών όσον αφορά: τα γενικά στοιχεία του κτιρίου (θέση, χρήση, κλιματιζόμενη επιφάνεια), το κτιριακό κέλυφος (U-values, επιφάνειες, κατασκευαστικά χαρακτηριστικά), τα εγκατεστημένα συστήματα (πληροφορίες Η/Μ εξοπλισμού, παράμετροι λειτουργίας) και την απόδοσή τους, την κατανάλωση ενέργειας, τις

ενεργειακές απαιτήσεις (φορτία θέρμανσης, ψύξης, ζεστού νερού χρήσης) και τις εκπομπές CO₂.

Η μεθοδολογία DATAMINE εφαρμόστηκε πιλοτικά σε 12 χώρες της ΕΕ που συμμετείχαν στο πρόγραμμα: Αυστρία, Βέλγιο, Βουλγαρία, Γερμανία, Ελλάδα, Ηνωμένο Βασίλειο, Ιρλανδία, Ισπανία, Ιταλία, Ολλανδία και Πολωνία. Στα πλαίσια της πιλοτικής εφαρμογής του έργου DATAMINE στην Ελλάδα δημιουργήθηκε μια ελληνική Βάση Δεδομένων Ενεργειακής Επιθεώρησης Κτιρίων. Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνονται στοιχεία για το ελληνικό πιλοτικό πρόγραμμα και παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα από την ανάλυση της εθνικής βάσης δεδομένων, ενώ γίνεται και μια συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων από την ανάλυση της ΚΒΔ.

3. ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ DATAMINE ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Κατά την πιλοτική εφαρμογή του έργου DATAMINE στην Ελλάδα ενσωματώθηκαν στοιχεία από συνολικά 250 ελληνικά κτίρια στην ελληνική Βάση Δεδομένων. Από αυτά, 176 κτίρια ανήκουν στον οικιακό και 74 στον τριτογενή τομέα. Στα κτίρια του οικιακού τομέα που έχουν ενσωματωθεί στην ελληνική πιλοτική εφαρμογή περιλαμβάνονται 118 πολυκατοικίες και 58 μονοκατοικίες. Στα κτίρια του τριτογενή τομέα περιλαμβάνονται γραφεία, νοσοκομεία, ξενοδοχεία, αθλητικά κέντρα, αεροδρόμια και κολυμβητήρια. Η κατανομή των κτιρίων και η μέση ετήσια κατανάλωση θερμικής ενέργειας στον οικιακό και τριτογενή τομέα για τις τέσσερις κλιματικές ζώνες που ορίζονται στον ΚΕΝΑΚ δίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Κατανομή κτιρίων πιλοτικής εφαρμογής του DATAMINE στην Ελλάδα. Δίνεται ο αριθμός κτιρίων ανά χρήση και η μέση ετήσια κατανάλωση θερμικής ενέργειας (kWh/m²) στον οικιακό και τριτογενή τομέα ανά κλιματική ζώνη.

Τα κτίρια του οικιακού τομέα αποτελούν το 70% του συνόλου, ενώ το υπόλοιπο 30% αποτελείται από κτίρια διαφόρων χρήσεων του τριτογενή τομέα. Αυτή η κατανομή είναι αντιπροσωπευτική του ελληνικού κτιριακού αποθέματος στο οποίο, σύμφωνα με στοιχεία της Στατιστικής Υπηρεσίας Ελλάδας ο οικιακός τομέας αποτελεί το 77% του συνολικού

κτιριακού αποθέματος, ενώ ο τριτογενής το 23%. Η κατανομή του τριτογενή ανά χρήση κτιρίου είναι: 2.7% γραφεία και εμπορικά, 0.46% σχολεία, 0.82% ξενοδοχεία, 0.06% νοσοκομεία και 19% άλλες χρήσεις (πχ. αεροδρόμια, γυμναστήρια κα).

Το δείγμα των κτιρίων που χρησιμοποιήθηκε για την πιλοτική εφαρμογή είναι βέβαια μικρό και δεν επιτρέπει την εξαγωγή γενικευμένων συμπερασμάτων. Συνεπώς, τα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης είναι ενδεικτικά και η παράθεσή τους στοχεύει στη ανάδειξη των δυνατοτήτων που παρέχει η βάση δεδομένων του DATAMINE στην επεξεργασία δεδομένων και τη συγκριτική αξιολόγηση των τάσεων που αντιπροσωπεύουν το κτιριακό απόθεμα σε τοπικό αλλά και εθνικό επίπεδο. Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης των δεδομένων της ελληνικής βάσης με έμφαση το κτιριακό κέλυφος. Κατά την ανάλυση έγινε διάκριση μεταξύ των κτιρίων οικιακού και τριτογενούς τομέα, λόγω διαφορών στη λειτουργία τους. Αντίστοιχη ανάλυση έχει γίνει και για τους τομείς της κατανάλωσης ενέργειας, της ζήτησης ενέργειας και των εκπομπών CO₂.

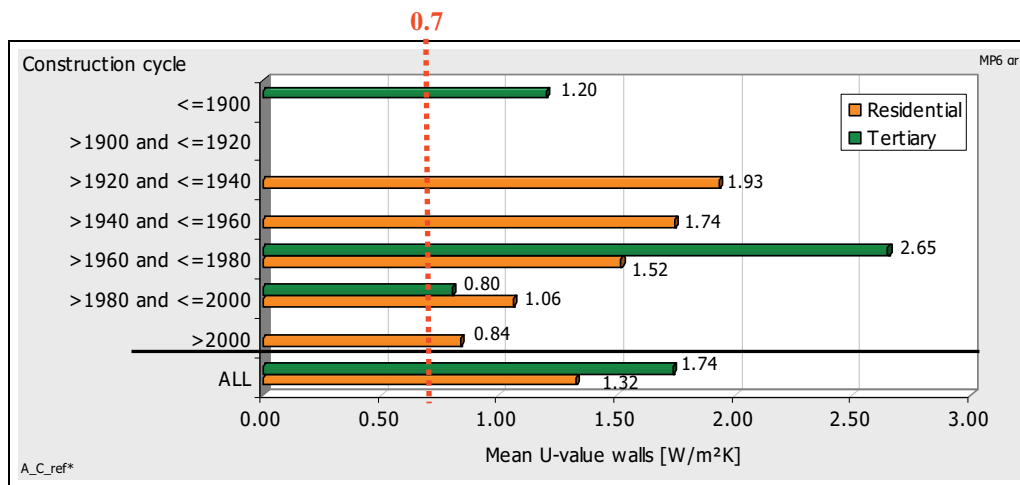
4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ – ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΚΕΛΥΦΟΣ

Η πλειοψηφία των δεδομένων που εισήχθησαν στην ευρωπαϊκή ΚΒΔ για την πιλοτική εφαρμογή του DATAMINE στην Ελλάδα υπήρχαν διαθέσιμα από ενεργειακές καταγραφές μεγάλου αριθμού κτιρίων σε διάφορες πόλεις της χώρας με χρήση τυποποιημένων εντύπων για ενεργειακές επιθεωρήσεις και συλλογή των απαιτούμενων πληροφοριών. Μόνο το 40% των δεδομένων προέρχονται από εφαρμογή μεθοδολογιών και των αντίστοιχων λογισμικών τους για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων.

Στο Σχήμα 2 δίνεται ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας των εξωτερικών τοίχων σε σχέση με την ηλικία του κτιρίου. Η ανάλυση αναφέρεται στον συνολικό αριθμό κτιρίων οικιακού τομέα (176 κτίρια) και στο 50% των κτιρίων του τριτογενή τομέα. Η πλειοψηφία των κτιρίων (90%) έχουν κτιστεί κατά την περίοδο 1960-2000. Στο σχήμα σημειώνεται και το προβλεπόμενο από τον ισχύοντα Κανονισμό Θερμομόνωσης Κτιρίων (ΚΘΚ) όριο με διακεκομμένη κόκκινη γραμμή. Ο συντελεστής θερμικών απωλειών (U-value) της τοιχοποιίας (αδιαφανών επιφανειών) για τις κατοικίες του δείγματος κυμαίνεται από 0.84 έως 1.93 W/m²K. Η μέση τιμή του συντελεστή για τα κτίρια που είχαν κατασκευαστεί πριν το 1980 είναι 1.73 W/m²K, ενώ παρατηρείται μείωσή του κατά 45% μετά την ισχύ του ΚΘΚ, το 1980. Οι πιο χαμηλές τιμές αντιστοιχούν σε κτίρια που έχουν κατασκευαστεί μετά το 2000. Παρόλα αυτά ο μέσος όρος του συντελεστή, ακόμα και για κτίρια μικρότερης ηλικίας παραμένει υψηλότερος από τον προβλεπόμενο από τον ΚΘΚ (0.7 W/m²K), αναδεικνύοντας ότι τα προβλήματα στην εφαρμογή του συνεχίζονται ακόμα και σήμερα. Η μέση τιμή του συντελεστή για τα κτίρια του τριτογενούς τομέα που είχαν κατασκευαστεί πριν το 1980 είναι 2.65 W/m²K, ενώ παρατηρείται μείωσή της κατά 69% μετά την ισχύ του ΚΘΚ, το 1980. Καθώς τα κτίρια με το μικρότερο συντελεστή έχουν κατασκευαστεί μετά το 1980 και αποτελούν το 47% του εξεταζόμενου δείγματος μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα νεοαναγειρόμενα κτίρια του τριτογενούς τομέα κατασκευάζονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ΚΘΚ.

Η μέση τιμή του συντελεστή θερμικών απωλειών από τους εξωτερικούς υαλοπίνακες για τα κτίρια του δείγματος είναι 4,4 W/m²K στις κατοικίες και 4,6 W/m²K στα κτίρια του τριτογενή τομέα. Η αντίστοιχη ανάλυση του μέσου συντελεστή θερμοπερατότητας των εξωτερικών υαλοπινάκων σε σχέση με την ηλικία του κτιρίου δεν παρουσιάζει σαφή τάση με την πάροδο του χρόνου. Αυτό οφείλεται στο ότι η αντικατάσταση των μονών υαλοστασίων

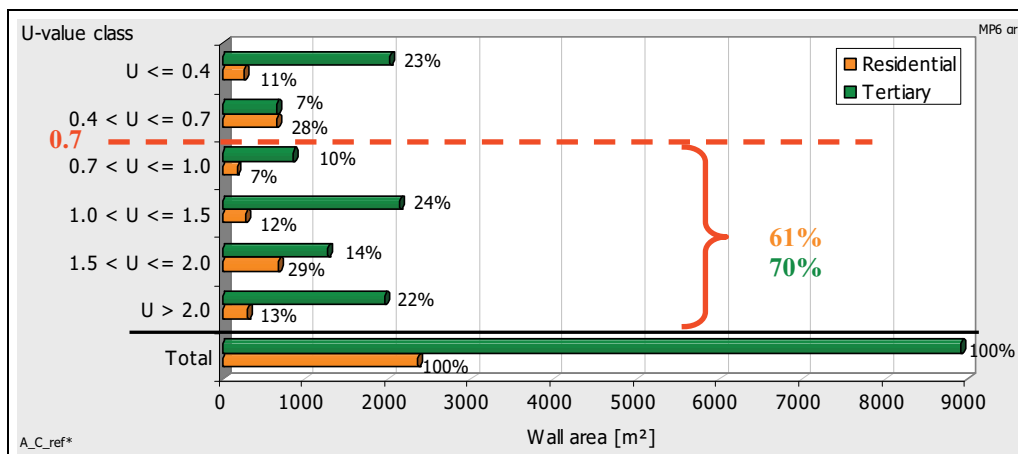
με διπλά αποτελεί μια πολύ συνηθισμένη πρακτική κατά την ανακαίνιση κτιρίων αφού με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται τόσο η θερμική όσο και η ακουστική άνεση. Οι τιμές ακόμα και για κτίρια που έχουν κατασκευαστεί μετά το 1980 παραμένουν υψηλότερες από 3.26 W/m²K (ενδεικτική τιμή για διπλά υαλοστάσια), ενδεικτικό ότι υπάρχουν και νεόκτιστα κτίρια με μονά υαλοστάσια.



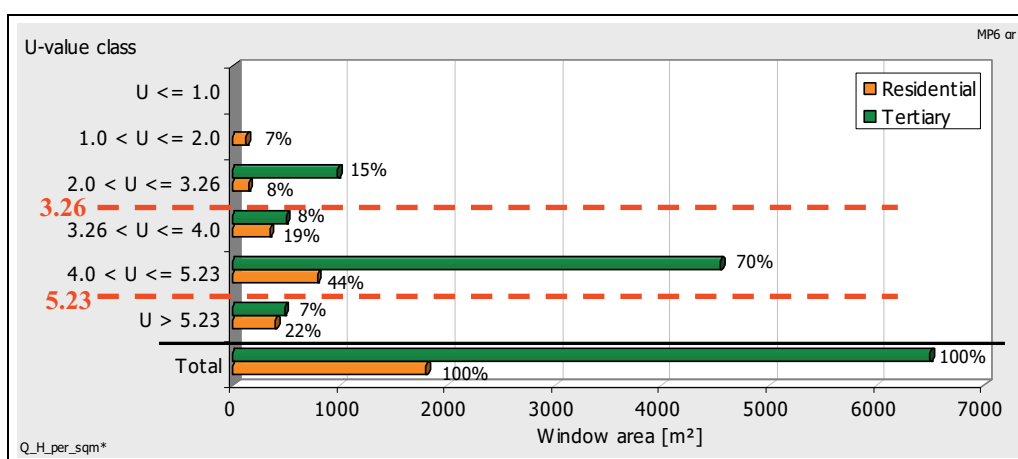
Σχ. 2: Μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας (U-Value) εξωτερικών τοίχων, σε σχέση με το έτος κατασκευής.

Η μέση τιμή του συντελεστή θερμικών απωλειών από τις οροφές των κατοικιών για τα κτίρια του δείγματος κυμαίνεται από 0.46 έως 1.01 W/m²K. Η μέση τιμή του συντελεστή για τα κτίρια που είχαν κατασκευαστεί πριν το 1980 είναι 1.00 W/m²K, ενώ παρατηρείται μείωσή της κατά 53% μετά την ισχύ του ΚΘΚ, το 1980. Η προσθήκη θερμομόνωσης στην οροφή είναι μια αρκετά συνηθισμένη επέμβαση κατά τη διάρκεια μιας ανακαίνισης. Για το λόγο αυτό πολλά κτίρια του εξεταζόμενου δείγματος, αν και έχουν κτιστεί από το 1960 και έπειτα, έχουν χαμηλό συντελεστή θερμικών απωλειών από τις οροφές σύμφωνα με τον προβλεπόμενο από τον ΚΘΚ.

Στο Σχήμα 3 δίνεται η κατανομή της εκτεθειμένης επιφάνειας της τοιχοποιίας σε διάφορα διαστήματα τιμών του συντελεστή θερμοπερατότητας. Η θερμομόνωση της πλειοψηφίας των εξωτερικών τοιχοποιιών στις κατοικίες του δείγματος δεν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του ΚΘΚ (η οριζόντια διακεκομμένη κόκκινη γραμμή σημειώνει την τιμή 0.7 σύμφωνα με τα όρια του Κανονισμού). Βελτίωση της θερμομόνωσης απαιτείται στο 61% και στο 70% της συνολικής εκτεθειμένης επιφάνειας της τοιχοποιίας στα κτίρια του δείγματος οικιακού και τριτογενή τομέα αντίστοιχα. Στο Σχήμα 4 δίνεται η κατανομή της επιφάνειας υαλοπινάκων σε διάφορα διαστήματα τιμών του συντελεστή θερμοπερατότητας. Οι οριζόντιες διακεκομμένες κόκκινες γραμμές σημειώνουν τα όρια που προβλέπονται από τον ΚΘΚ. Στο 13% της συνολικής επιφάνειας των υαλοπινάκων του δείγματος κτιρίων οικιακού τομέα ο συντελεστής θερμοπερατότητας υπερβαίνει το ανώτατο επιτρεπτό όριο που προβλέπεται από τον ΚΘΚ. Ένα μεγάλο ποσοστό (66%) κατοικιών του δείγματος έχουν μονά υαλοστάσια. Μόνο στο 7% της συνολικής επιφάνειας των υαλοπινάκων του δείγματος τριτογενή τομέα ο συντελεστής θερμοπερατότητας υπερβαίνει το ανώτατο επιτρεπτό όριο που προβλέπεται από τον ΚΘΚ. Παρόλα αυτά, ένα μεγάλο ποσοστό (77%) κτιρίων του δείγματος έχουν μονά υαλοστάσια. Τέλος, το σύνολο των δωματίων των κτιρίων του δείγματος του οικιακού τομέα και το 62% των δωματίων του τριτογενή τομέα χρειάζονται επεμβάσεις για βελτίωση της θερμομόνωσης προκειμένου να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του ΚΘΚ.



Σχ. 3: Συνολική επιφάνεια εξωτερικών τοίχων για διαφορετικούς συντελεστές θερμοπερατότητας (Κτίρια οικιακού τομέα 146 από 176 / Κτίρια τριτογενή τομέα 20 από 74).

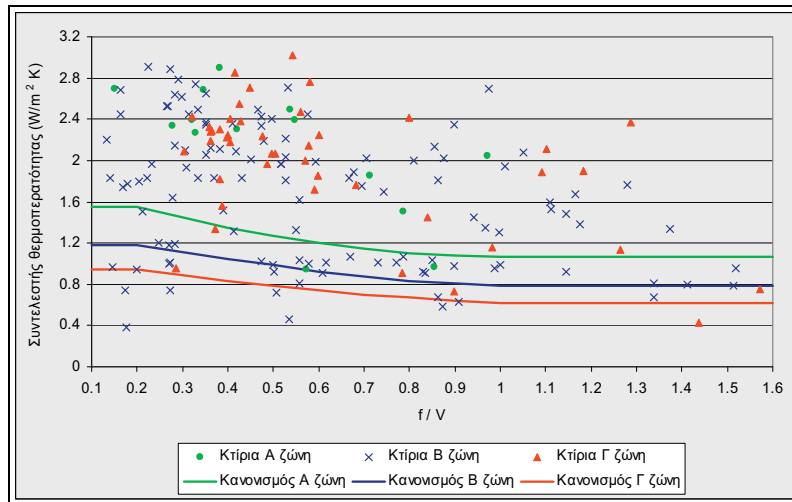


Σχ. 4: Συνολική επιφάνεια ανοιγμάτων για διαφορετικούς συντελεστές θερμοπερατότητας (Κτίρια οικιακού τομέα 59 από 176 / Κτίρια τριτογενή τομέα 18 από 74).

Στο Σχήμα 5 φαίνεται κατά πόσο η κατασκευή των κτιρίων του δείγματος της Ελληνικής Βάσης Δεδομένων είναι σύμφωνη με τις απαιτήσεις του ΚΘΚ ανά κλιματική ζώνη. Για κάθε κλιματική ζώνη, τα κτίρια με συντελεστή θερμοπερατότητας (U-value) πάνω από την αντίστοιχη καμπύλη $f/V=f(U_value)$ είναι εκτός Κανονισμού. Συγκεκριμένα, στο εξεταζόμενο δείγμα του οικιακού τομέα 87% των κτιρίων της Ζώνης Α, 84% των κτιρίων της Ζώνης Β και 98% των κτιρίων της Ζώνης Γ έχουν συντελεστή θερμοπερατότητας που υπερβαίνει τις ελάχιστες απαιτήσεις του Κανονισμού.

5. ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΣΕ 10 ΧΩΡΕΣ

Η ελληνική βάση ενσωματώθηκε στην κοινή ευρωπαϊκή ΚΒΔ ενεργειακής επιθεώρησης κτιρίων του DATAMINE, η οποία περιλαμβάνει δεδομένα από περίπου 19000 κατοικίες και κτίρια του τριτογενή τομέα από 12 ευρωπαϊκές χώρες. Η επεξεργασία των δεδομένων της Ευρωπαϊκής ΚΒΔ δίνει τη δυνατότητα σύγκρισης αντίστοιχων ομάδων κτιρίων σε διαφορετικές χώρες. Ενδεικτικά, στα Σχήματα 6-7 απεικονίζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων της ευρωπαϊκής ΚΒΔ για «τυπικά» κτίρια με διαφορετικές χρονολογίες κατασκευής. Το «τυπικό» κτίριο ορίζεται μετά από επεξεργασία του αντίστοιχου δείγματος που αποτελεί υποσύνολο της βάσης [2].



Σχήμα 5: Κατασκευή ελληνικών κτιρίων οικιακού τομέα και απαιτήσεις του ΚΘΚ ανά κλιματική ζώνη.

Η σύγκριση των μέσων τιμών συντελεστή θερμοπερατότητας αναδεικνύει τη βελτίωση του κτιριακού κελύφους κατά τα τελευταία 100 χρόνια. Δραστική μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας παρατηρείται κατά τις δύο τελευταίες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα και είναι περισσότερο εμφανής στα Σχήματα 6(α) και (β) όπου απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη του για εξωτερικούς τοίχους και δώματα, αντίστοιχα. Η τάση αυτή δεν παρατηρείται το ίδιο έντονα στις τοιχοποιίες των υπογείων (Σχήμα 7α), ενώ στην περίπτωση των υαλοπινάκων (Σχήμα 7β) παρουσιάζονται πολύ μικρές διαφοροποιήσεις σε σχέση με την ηλικία του κτιρίου, σε όλες τις χώρες. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στη συνήθη αντικατάσταση των μονών υαλοστασίων με διπλά κατά την ανακαίνιση κτιρίων, ιδιαίτερα κατά τις τελευταίες δεκαετίες.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

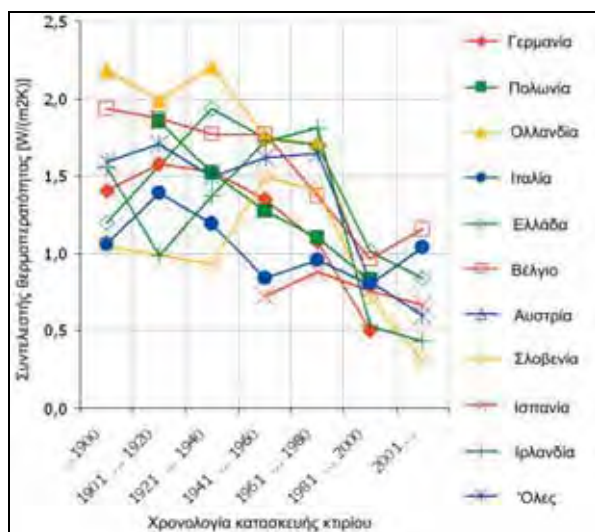
Με δεδομένη την εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2002/91/EK για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων (EPBD) σε όλες τις χώρες μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) στην οποία προβλέπεται η έκδοση Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ) για όλα σχεδόν τα κτίρια στην ΕΕ, η Κοινή Βάση Δεδομένων σχεδιάστηκε με στόχο την εκμετάλλευση των πληροφοριών που μπορούν να εξαχθούν από τα ΠΕΑ για διαφορετικούς τύπους κτιρίων σε διαφορετικές ευρωπαϊκές χώρες. Η συλλογή των παραμέτρων της βάσης μπορεί να γίνεται άμεσα κατά τη διαδικασία της ενεργειακής επιθεώρησης και στόχος είναι η αυτόματη ενημέρωση της βάσης από το Αρχείο Ενεργειακής Επιθεώρησης, που προβλέπεται να κρατείται σε ηλεκτρονική μορφή στις αρμόδιες αρχές κάθε χώρας.

Η μεθοδολογία DATAMINE αποδείχθηκε κατάλληλη για την καταγραφή πληροφοριών για το κτιριακό απόθεμα με ομοιογενή τρόπο, ώστε να είναι εφικτή η παρακολούθηση της εξέλιξης και η ανάλυση των τάσεων που επικρατούν στον κτιριακό τομέα τόσο σε εθνικό όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο.

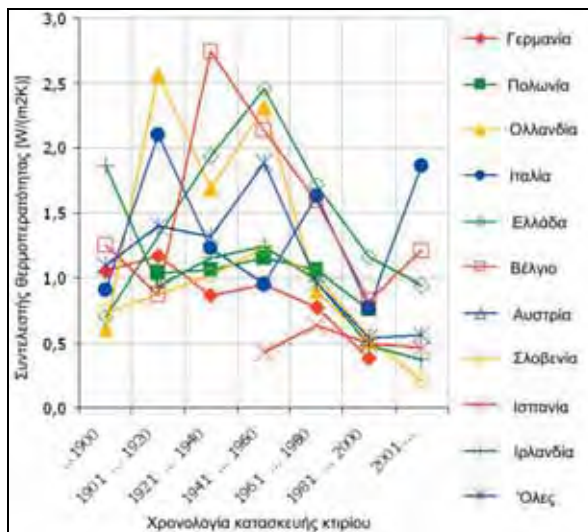
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το ευρωπαϊκό πρόγραμμα DATAMINE υλοποιήθηκε με τη συγχρηματοδότηση της ΓΔ XVII της Ευρωπαϊκής Επιτροπής στα πλαίσια του προγράμματος Ευφυής Ενέργεια για την Ευρώπη (Energy Intelligent Europe) με συντονιστή το Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Γερμανία. Η εθνική συμμετοχή καλύφθηκε από τη Γ.Γ.Ε.Τ. του Υπουργείου Ανάπτυξης και το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. Για την ανάπτυξη του DATAMINE συνεργάστηκαν 12 οργανισμοί

από αντίστοιχες Ευρωπαϊκές χώρες, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα. Για περισσότερες πληροφορίες: <http://env.meteo.noa.gr/datamine/>

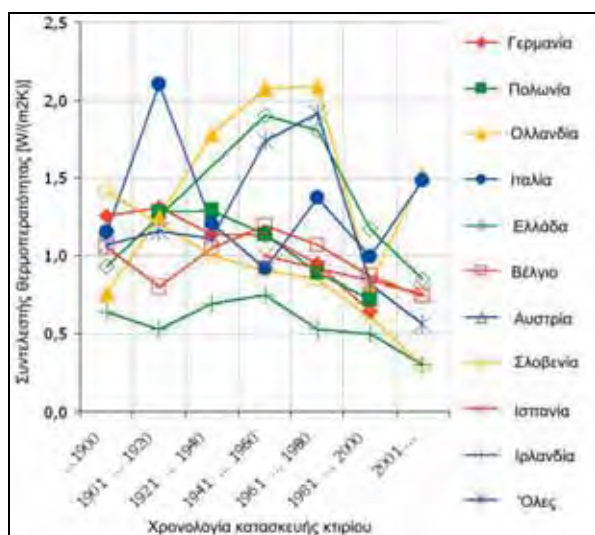


(α) τοίχοι

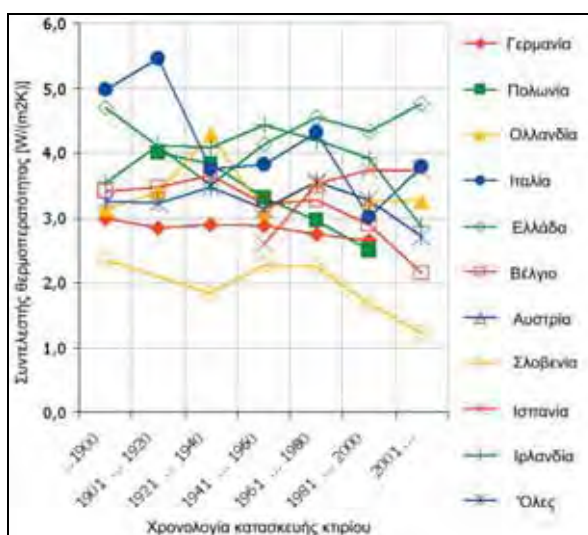


(β) οροφές

Σχ.6: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων επεξεργασίας του συντελεστή θερμοπερατότητας της Ευρωπαϊκής Κοινής Βάσης Δεδομένων για κτίρια του οικιακού τομέα ανά χρονολογία κατασκευής.



(α) δάπεδα υπογείων



(β) υαλοπίνακες

Σχ.7: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων επεξεργασίας του συντελεστή θερμοπερατότητας της Ευρωπαϊκής Κοινής Βάσης Δεδομένων για κτίρια του οικιακού τομέα ανά χρονολογία κατασκευής.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. EU Energy in Figures, Part 2 Statistical Pocket Book, 81 pp., Directorate General for Energy and Transport, European Commission, Luxembourg, 2008.
2. Loga T. and N. Diefenbach, Data Collection from Energy Certificates – Cross-Country Comparison of Energy Performance Indicators, DATAMINE Project report, August 2008.

ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΑΠΟΘΕΜΑ, ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΙΩΣΗ ΡΥΠΩΝ ΣΤΟΝ ΟΙΚΙΑΚΟ ΚΑΙ ΤΡΙΤΟΓΕΝΗ ΤΟΜΕΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ - ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ

*Α. Γ. Γαγλία¹, Κ. Α. Μπαλαράς¹, Σ. Μοιρασγεντής², Ε. Γεωργοπούλου²,
Ι. Σαραφίδης², Δ. Λάλας³*

¹Ομάδα Εξοικονόμησης Ενέργειας, ²Ομάδα Ενεργειακού Σχεδιασμού & Βιώσιμης Ανάπτυξης,
Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος & Βιώσιμης Ανάπτυξης, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Ι.
Μεταξά και Β. Παύλου, Λόφος Κουφού, 152 36, Π. Πεντέλη Τηλ. 210-8109146, Φαξ 210-8103236.

Email: agaglia@meteo.noa.gr

³FACETS ΕΠΕ Εταιρεία Ενεργειακών & Περιβαλλοντικών Μελετών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή αναφέρεται στην καταγραφή και ποιοτική αξιολόγηση του ελληνικού κτιριακού αποθέματος, καθώς επίσης και στην αξιολόγηση του δυναμικού εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης της εκπομπής αερίων ρύπων CO₂ στον κτιριακό τομέα. Προσδιορίζονται τα Μέτρα Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΜΕΕ) που μπορούν να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, καθώς και οι προτεραιότητες που πρέπει να δοθούν για την εφαρμογή τους με κριτήρια την ενεργειακή απόδοσή τους, την οικονομική βιωσιμότητά τους και τις οικονομικές υποστηρικτικές πολιτικές (επιδότησεις) που απαιτούνται για την εφαρμογή τους. Τα πιο ενεργειακά αποδοτικά και οικονομικά ελκυστικά μέτρα είναι: θερμομόνωση εξωτερικών τοίχων στα ξενοδοχεία, νοσοκομεία και κατοικίες, εγκατάσταση BMS στα ξενοδοχεία, νοσοκομεία και γραφεία, χρήση λαμπτήρων υψηλής απόδοσης, χρήση φυσικού αερίου για θέρμανση και αντικατάσταση των παλιών κεντρικών θερμάνσεων.

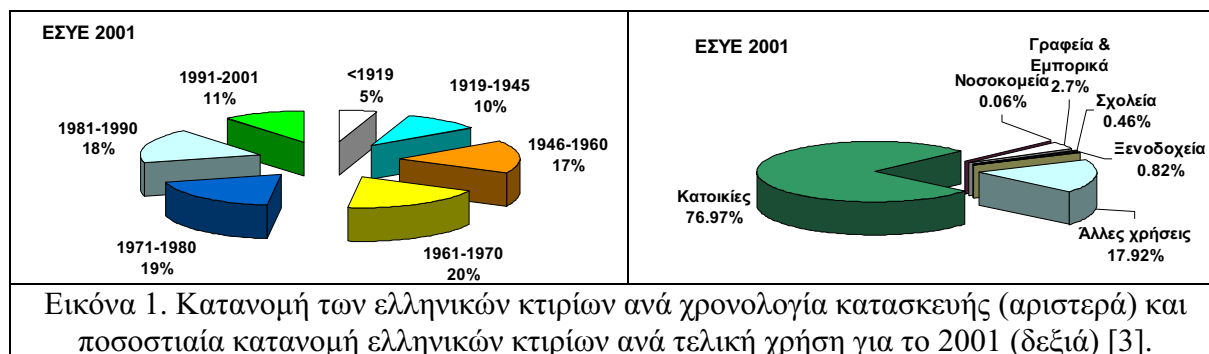
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το 2005 τα ελληνικά κτίρια κατανάλωσαν το 34% της συνολικής ενέργειας και το 65% της παραγομένης ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα το ποσοστό των εκπομπών του CO₂ που αντιστοιχεί στα κτίρια να υπερβαίνει το 43% [1,2]. Ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας στα Ελληνικά κτίρια την 20ετία (1985-2005) ανέρχεται στο 4,5%, ενώ ο αντίστοιχος για το σύνολο της καταναλισκόμενης ενέργειας είναι περίπου 3% [1]. Με αυτούς τους ρυθμούς αύξησης καθίσταται εξαιρετικά δύσκολη η επίτευξη του στόχου της Ελλάδας στο πλαίσιο του πρωτοκόλλου του Κυότο. Γι' αυτό θα πρέπει να εφαρμοστούν άμεσα Μέτρα Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΜΕΕ) σε όλους του τομείς και ιδιαίτερα στα κτίρια.

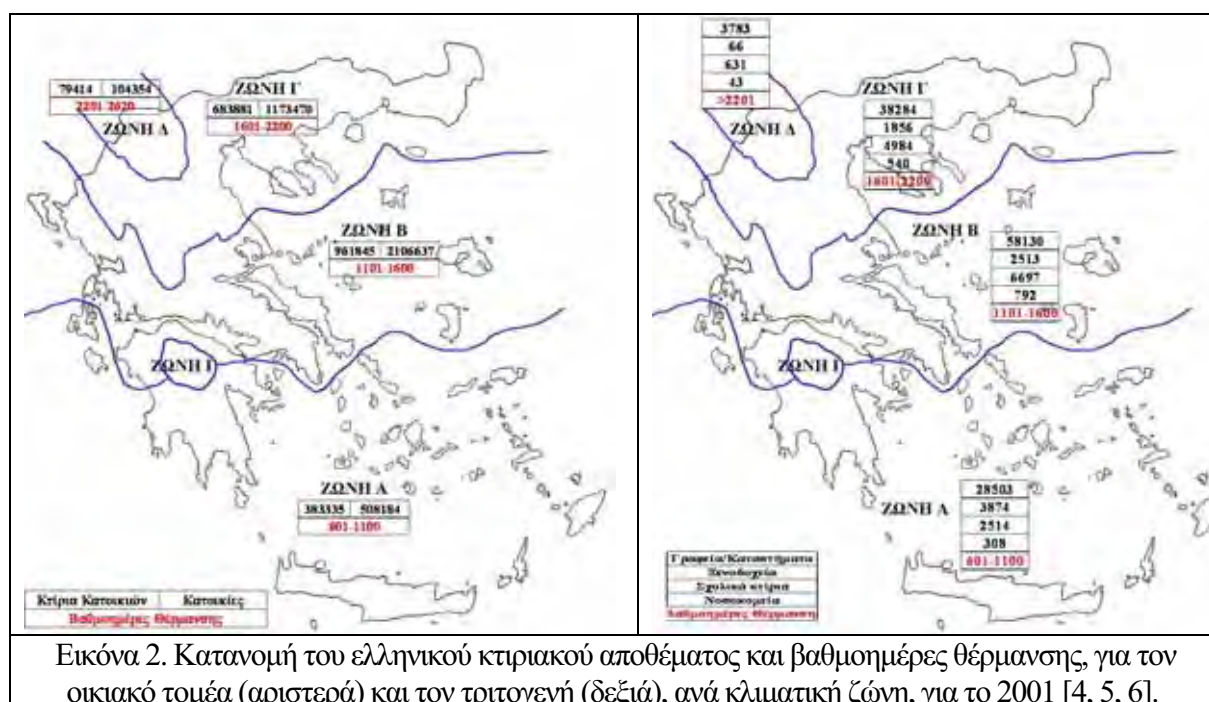
Η εργασία αυτή παρουσιάζει τα αποτελέσματα μελέτης που πραγματοποιήθηκε από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών για λογαριασμό του ΥΠΕΧΩΔΕ με αντικείμενο την μείωση των εκπομπών CO₂ στον οικιακό και τριτογενή τομέα. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εκτίμηση της ποιότητας και ποσότητας του κτιριακού αποθέματος στα ελληνικά κτίρια (κατοικίες, γραφεία-καταστήματα, νοσοκομεία, ξενοδοχεία και σχολεία), για τις τέσσερις κλιματικές ζώνες της Ελλάδας, και διακρίνονται τρεις χρονικές περίοδοι κατασκευής των κτιρίων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η αποτύπωση της ενεργειακής κατάστασης των ελληνικών κτιρίων, ανά κλιματική ζώνη και χρονική περίοδο κατασκευής, καθώς επίσης και το δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας με την επιλογή και εφαρμογή μέτρων βελτίωσης του κτιριακού κελύφους ή των ηλεκτρομηχανολογικών (Η/Μ) εγκαταστάσεων. Η δυνατότητα εφαρμογής των μέτρων αξιολογείται βάσει κριτηρίων, όπως το είδος των κτιρίων, η υφιστάμενη τεχνολογία, το ποσοστό εξοικονόμησης, το κόστος επέμβασης και η δυνατότητα εφαρμογής οικονομικών κινήτρων.

2. ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΑΠΟΘΕΜΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Το 71% των ελληνικών κτιρίων κατασκευάστηκαν πριν από το 1980 (**Εικόνα 1**), δεν διαθέτουν θερμομόνωση και παρουσιάζουν χαμηλή ενεργειακή απόδοση, ενώ παράλληλα στην πλειοψηφία τους διαθέτουν παλιές Η/Μ εγκαταστάσεις [3]. Το 77% των ελληνικών κτιρίων αντιστοιχεί σε κτίρια κατοικιών και το 23% σε κτίρια του τριτογενή τομέα [3].



Με βάση αναλυτικά στοιχεία της Εθνικής Στατιστικής Υπηρεσίας (ΕΣΥΕ) για τα ελληνικά κτίρια, την οικοδομική δραστηριότητα του Υπουργείου Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων έργων (ΥΠΕΧΩΔΕ), το Υπουργείο Υγείας, τη Δημόσια Επιχείρηση Ανέγερσης Νοσοκομειακών Μονάδων, τον Ελληνικό Οργανισμό Τουρισμού, το Ξενοδοχειακό Επιμελητήριο, το Υπουργείο Παιδείας, τον Οργανισμό Σχολικών Κτιρίων και πλήθος δημοσιευμένων ερευνητικών μελετών για εξοικονόμηση ενέργειας, αξιολογήθηκε και εκτιμήθηκε η ποιότητα και η ποσότητα του ελληνικού κτιριακού αποθέματος ανά τελική χρήση (**Εικόνα 2**), ανά χρονική περίοδο κατασκευής και κλιματική ζώνη, για τα υφιστάμενα κτίρια αλλά και τα νέα έως το 2010. Διαχωρίστηκαν επίσης ανάλογα με την ποιότητα του κτιριακού κελύφους (θερμομόνωση, διπλά τζάμια, κλπ) και το είδος των Η/Μ εγκαταστάσεων τους (κεντρική θέρμανση, ψύξη, θερμοστάτες, ηλιακοί συλλέκτες, κλπ). Για τον οικιακό τομέα, έγινε περαιτέρω διαχωρισμός σε πολυκατοικίες και μονοκατοικίες, ενώ τα ξενοδοχεία διαχωρίστηκαν σε ετήσιας και θερινής λειτουργίας μονάδες.



3. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΚΤΙΡΙΑ

Το 2005 τα ελληνικά κτίρια κατανάλωσαν 85923 GWh, δηλαδή το 34% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας της Ελλάδας. Οι 63407 GWh καταναλώθηκαν στα κτίρια κατοικιών και οι 22516 GWh στα κτίρια του τριτογενή (εκτός γεωργικών χρήσεων) [1]. Σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία του Υπουργείου Ανάπτυξης για την κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα ανά τομέα, τις καταγραφές της ΕΣΥΕ, δημοσιεύματα σχετικών ερευνητικών εργασιών, καθώς επίσης και δεδομένα για το ελληνικό κτιριακό απόθεμα, εκτιμήθηκε η ειδική θερμική και ηλεκτρική κατανάλωση ενέργειας (kWh/m^2), ανά τελική χρήση κτιρίων, χρονική περίοδο κατασκευής και κλιματική ζώνη (**Πίνακας 1**). Τα νεότερα κτίρια παρουσιάζουν μείωση της ειδικής κατανάλωσης θερμικής ενέργειας, ενώ η ηλεκτρική αυξάνεται κυρίως λόγω της αύξησης των αναγκών κλιματισμού. Αξιοσημείωτο είναι ότι η ειδική κατανάλωση θερμικής ενέργειας στα ελληνικά κτίρια είναι υψηλότερη από το μέσο όρων των κτιρίων στην Ευρώπη παρά τις ευνοϊκότερες κλιματολογικές συνθήκες της Ελλάδας [5, 6].

Πίνακας 1. Μέση ετήσια ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας ($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$) για τα ελληνικά κτίρια [4, 5, 6].												
	Μέση ετήσια ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ($\text{kWh}_e/\text{m}^2 \cdot \text{a}$)						Μέση ετήσια ειδική κατανάλωση θερμικής ενέργειας ($\text{kWh}_{th}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$)					
	Μονοκατοικίες			Πολυκατοικίες			Μονοκατοικίες			Πολυκατοικίες		
Κλιματική ζώνη	1980	2001	2010	1980	2001	2010	1980	2001	2010	1980	2001	2010
Ελλάδα σύνολο	27.6	38.7	37.5	28.1	40.6	39.2	140	123	92	96	95	75
Ζώνη Α	22.5	29.6	27.3	24.6	31.2	28.5	94	89	67	65	62	52
Ζώνη Β	28.3	42.3	41.7	31.5	46.8	45.8	134	115	88	94	91	71
Ζώνη Γ	24.1	35.0	33.7	25.8	37.0	35.4	159	145	108	111	109	90
Ζώνη Δ	25.4	34.6	32.6	28.1	36.6	34.2	187	176	129	130	125	115
Μέση ετήσια ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ($\text{kWh}_e/\text{m}^2 \cdot \text{a}$)												
	Γραφεία - Καταστήματα			Ξενοδοχεία			Σχολικά κτίρια			Νοσοκομεία		
Κλιματική ζώνη	1980	2001	2010	1980	2001	2010	1980	2001	2010	1980	2001	2010
Ελλάδα σύνολο	42	56	71	70	110	130	20	20	21	90	99	107
Ζώνη Α	48	67	88	77	122	145	23	23	24	102	124	139
Ζώνη Β	43	57	72	66	104	123	21	21	22	92	97	102
Ζώνη Γ	39	51	64	54	86	102	18	19	20	82	94	104
Ζώνη Δ	36	48	63	46	73	87	17	17	18	77	84	91
Μέση ετήσια ειδική κατανάλωση θερμικής ενέργειας ($\text{kWh}_{th}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$)												
	Γραφεία - Καταστήματα			Ξενοδοχεία			Σχολικά κτίρια			Νοσοκομεία		
Κλιματική ζώνη	1980	2001	2010	1980	2001	2010	1980	2001	2010	1980	2001	2010
Ελλάδα σύνολο	93	75	70	90	80	75	32	31	31	145	134	129
Ζώνη Α	67	52	48	71	62	58	24	23	23	96	75	69
Ζώνη Β	85	69	65	90	78	73	29	29	28	136	129	126
Ζώνη Γ	107	89	83	113	99	92	37	36	36	188	168	160
Ζώνη Δ	134	110	103	142	124	115	46	46	45	252	237	231

4. ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΚΤΙΡΙΑ

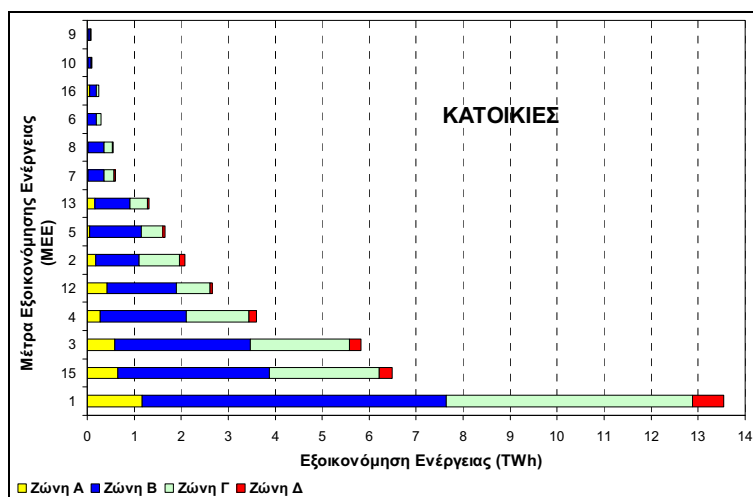
Για την εκτίμηση του δυναμικού εξοικονόμησης ενέργειας, μελετήθηκε η εφαρμογή διαφόρων ΜΕΕ. Κάθε μέτρο εφαρμόστηκε σε καθορισμένο ποσοστό κτιρίων, με βασικό κριτήριο, το είδος και την υφιστάμενη κατάσταση των κτιρίων, καθώς και την δυνατότητα υλοποίησής του κάθε ΜΕΕ. Στον **Πίνακα 2** αναφέρονται οι παραδοχές και το ποσοστό (%) εξοικονόμησης ενέργειας ανά ΜΕΕ για τις διαφορετικές χρήσεις κτιρίων: Μονοκατοικίες (Μ) και Πολυκατοικίες (Π), Γραφεία-Καταστήματα (Γ/Κ), Ξενοδοχεία (Ξ), Σχολεία (Σ), και Νοσοκομεία (Ν).

Πίνακας 2. Παραδοχές και ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας για τα διάφορα ΜΕΕ στα ελληνικά κτίρια του τριτογενή (Γ/Κ, Ξ, Σ, Ν) και οικιακού (Μ, Π) τομέα, [4, 5, 6].		
Μ.Ε.Ε	Παραδοχές εφαρμογής μέτρων	Εξοικονόμηση ενέργειας (%)
#1: Θερμομόνωση εξωτερικών τοίχων	Σχεδόν όλα τα κτίρια προ-1980 είναι αμόνωτα. Γ/Κ: Εφαρμογή μόνο στο (15%) των αμόνωντων κτιρίων που έχουν κεντρική θέρμανση. Ξ, Σ, Ν: Εφαρμογή σε όλα τα αμόνωτα κτίρια προ- 1980. Μ-Π: Σε όλα τα αμόνωτα κτίρια προ- 1980 και στο 10% των κτιρίων της περιόδου 1980-2001.	Γ/Κ, Σ: 28-34% της θερμικής ενέργειας (Θ.Ε) και 4% της ηλεκτ. ενέργειας για ψύξη (Η.Ε.Ψ) Ξ: 38-44% της Θ.Ε και 5% της Η.Ε.Ψ. Ν: 34-40% της Θ.Ε και 4% της Η.Ε.Ψ. Μ-Π: 33-60% της θερμικής ενέργειας.
#2: Θερμομόνωση οροφής	Γ/Κ, Ξ, Σ & Ν: Εφαρμογή σε όλα τα κτίρια προ-1980 και δεν διαθέτουν μόνωση οροφής. Μ-Π: Στο 70% των αμόνωντων κτιρίων προ- 1980 και στο 10% του 1980-2001.	Γ/Κ, Σ: 4-7% της Θ.Ε και 2% της Η.Ε.Ψ. Ξ, Ν: 5-8% της Θ.Ε και 2% της Η.Ε.Ψ. Μ-Π: 2-14% της θερμικής ενέργειας.
#3: Διπλά υαλοστάσια	Γ/Κ: Εφαρμογή στο 15% των κτιρίων (με κεντρική θέρμανση) προ-1980 και στο 50% του 1980-2001. Ξ, Σ & Ν: Εφαρμογή σε όλα τα κτίρια (με κεντρική θέρμανση) προ-1980 και στο 50%-70% του 1980-2001. Μ-Π: Εφαρμογή σε όλα τα κτίρια προ-1985 και στο 10% του 1985-2001.	Γ/Κ, Σ: 10-12% της θερμικής ενέργειας. Ξ: 15-28% της θερμικής ενέργειας. Ν: 15-28% της θερμικής ενέργειας. Μ-Π: 14-20% της θερμικής ενέργειας.
#4: Συντήρηση κεντρικών θερμάνσεων	Γ/Κ, Ξ, Σ, Ν & Μ-Π: Εφαρμογή σε όλα τα υφιστάμενα κτίρια, που χρειάζονται σύμφωνα με τους εθνικούς κανονισμούς, ετήσια συντήρηση.	Γ/Κ, Ξ, Σ, Ν: 11% της θερμικής ενέργειας για θέρμανση χώρων. Μ-Π: 10-12% της θερμικής ενέργειας.
#5: Νέες κεντρικές θερμάνσεις	Γ/Κ, Ξ, Σ, Ν & Μ-Π: Εφαρμογή σε όλα τα κτίρια με παλιό σύστημα κεντρικής θέρμανσης.	Γ/Κ, Ξ, Σ, Ν & Μ-Π: 15-17% της θερμικής ενέργειας για θέρμανση χώρων.
#6: Κεντρική θέρμανση Φ.Α.	Γ/Κ, Ξ, Ν & Μ-Π: Εφαρμογή σε 15% των κτιρίων με παλιά συστήματα κεντρικής θέρμανσης, στις κλιματικές ζώνες Β και Γ, όπου το Φ.Α. είναι διαθέσιμο.	Γ/Κ, Ξ, Ν & Μ-Π: 19-21% της θερμικής ενέργειας για θέρμανση χώρων.
#7: Θερμοστάτες αντιστάθμισης	Γ/Κ, Ξ, Σ, Ν & Μ-Π: Εφαρμογή σε όλα τα κτίρια με κεντρική θέρμανση που δεν έχουν θερμοστάτες αντιστάθμισης, σύμφωνα με τους εθνικούς κανονισμούς.	Γ/Κ, Ξ, Σ, Ν: 5% της θερμικής ενέργειας για θέρμανση χώρων. Μ-Π: 2-3% της Θ.Ε. για θέρμανση χώρων.
#8: Θερμοστάτες χώρων	Γ/Κ, Ξ, Σ, Ν & Μ-Π: Εφαρμογή σε όλα τα κτίρια με κεντρική θέρμανση και δυνατότητα θερμοστάτη χώρου.	Γ/Κ, Ξ, Σ & Ν: 5% της Θ.Ε για Θ.Χ. Μ-Π: 2-3% της Θ.Ε. για θέρμανση χώρων.
#9: Εξωτερική σκίαση	Γ/Κ, Ξ, Σ, & Ν: Εφαρμογή στο 60% των κλιματιζόμενων κτιρίων, προ-2001. Μ-Π: Στο 50% των κλιματιζόμενων κτιρίων, θεωρώντας ότι κλιματίζεται μόνο το 20% των χώρων τους.	Γ/Κ, Ξ, Σ, Ν & Μ-Π: 10-20% της ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη.
#10: Ανεμιστήρες οροφής	Γ/Κ, Ξ & Ν: Εφαρμογή στο 50% των κλιματιζόμενων κτιρίων με κάλυψη του 50-70% της επιφάνειάς τους. Σ: Εφαρμογή σε όλα κλιματιζόμενα κτίρια με κάλυψη του 80% της επιφάνειάς τους. Μ-Π: Εφαρμογή σε όλα τα κλιματιζόμενα κτίρια με κάλυψη του 20% της επιφάνειάς τους.	Γ/Κ, Ξ, Σ, Ν & Μ-Π: 60% της ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη.
#11: Νυχτερινός αερισμός	Γ/Κ: Εφαρμογή στο 10% των κλιματιζόμενων κτιρίων. Ετήσια κατανάλωση ενέργειας 0.45 kWh/m ³ , για 5 ACH και 5 ώρες την ημέρα.	Γ/Κ: 15-20% της ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη.
#12: Ηλιακοί συλλέκτες για ZNX	Γ/Κ: Εφαρμογή στο 20% των κτιρίων που δεν διαθέτουν ηλιακούς συλλέκτες. Ξ, Σ & Ν: Εφαρμογή στο 50% των κτιρίων που δεν διαθέτουν ηλιακούς συλλέκτες. Μ-Π: Σε όλα τα κτίρια που δεν έχουν ηλιακούς συλλέκτες.	Γ/Κ: 35-50% της ηλεκ. ενέργειας για ZNX Ξ: 65-80% της ηλεκ. ενέργειας για ZNX Σ: 25-40% της ηλεκ. ενέργειας για ZNX Ν: 55-70% της ηλεκ. ενέργειας για ZNX Μ-Π: 50-80% της ηλεκ. ενέργειας για ZNX
#13: Λαμπτήρες υψηλής απόδοσης	Γ/Κ, Ξ, Σ & Ν: Εφαρμογή σε όλα τα κτίρια που δεν διαθέτουν λαμπτήρες υψηλής ενεργειακής απόδοσης. Μ-Π: Σε όλα τα κτίρια που δεν διαθέτουν λαμπτήρες υψηλής απόδοσης	Γ/Κ, Ξ, Σ & Ν, Μ-Π: 60% της ηλεκτρικής ενέργειας για φωτισμό
#14: BMS	Γ/Κ: Για το 20% των κλιματιζόμενων κτιρίων του 1980-2001 και του 50% των κτιρίων του 2001-2010. Ξ, Ν: Για το 10% των κλιματιζόμενων κτιρίων προ-1980, το 30% των κτιρίων του 1980-2001 και το 50% των κτιρίων του 2001-2010.	Γ/Κ, Ξ & Ν: 30% της ηλεκτρικής ενέργειας και 20% της θερμικής ενέργειας
#15: Αεροστεγάνωση	Μ-Π: Σε όλα τα αμόνωτα κτίρια προ- 1990 και στο 10% των κτιρίων της δεκαετίας του '90.	Μ-Π: 16-21% της θερμικής ενέργειας για την θέρμανση των χώρων.
#16: Κλιματιστικά υψηλής απόδοσης	Μ-Π: Εφαρμογή στο 50% των κλιματιζόμενων κτιρίων που εκτιμήθηκε ότι έχουν παλιά συστήματα κλιματισμού. Αντικατάσταση με νέα υψηλής απόδοσης.	Μ-Π: 65-75% της ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη.

Στον **Πίνακα 3** παρουσιάζονται τα στοιχεία για την διάρκεια ζωής του κάθε MEE που εφαρμόστηκε στην μελέτη, καθώς και το κόστος εφαρμογής τους (τιμές 2003) για τον οικιακό και τριτογενή τομέα αντίστοιχα.

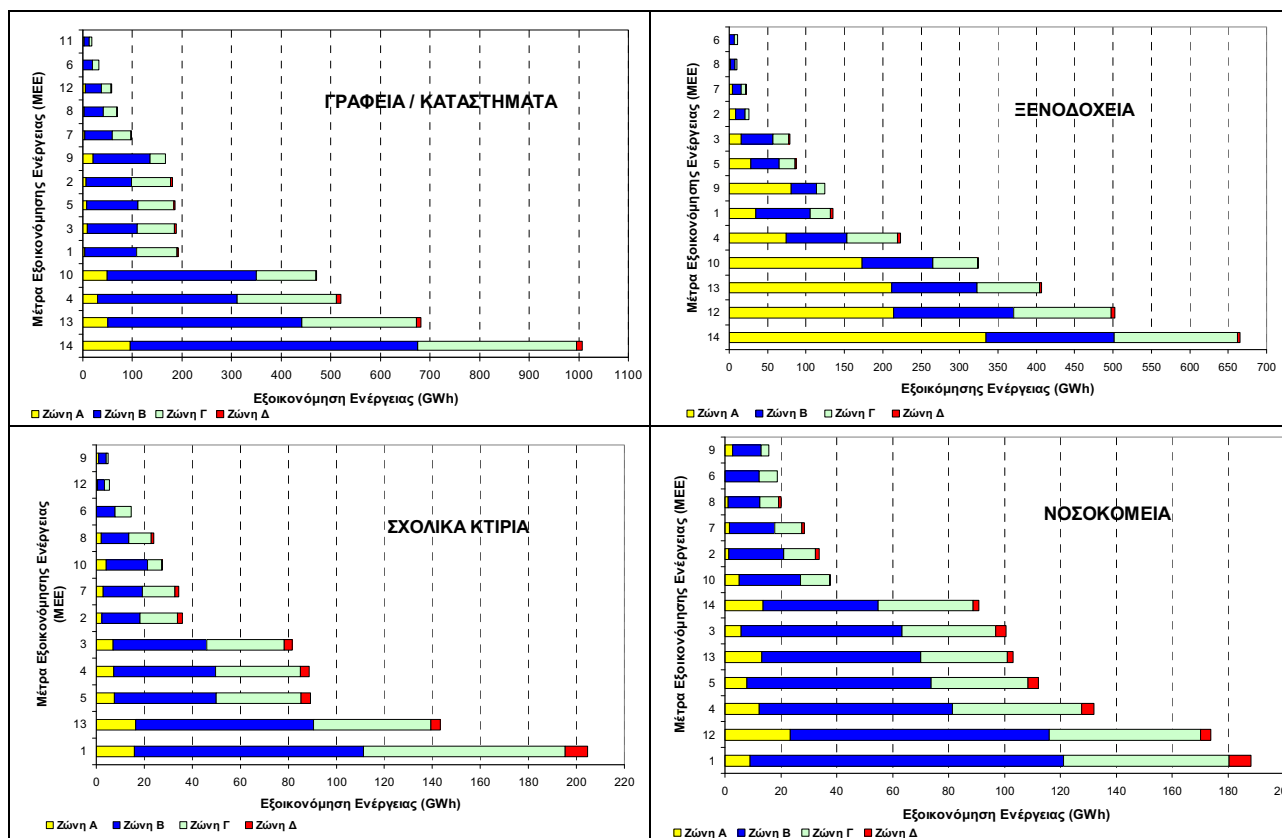
Πίνακας 3. Περίοδος αποπληρωμής και μέσο κόστος των MEE στα κτίρια, [4, 5, 6, 7, 8].			
Αριθμός M.E.E	Διάρκεια ζωής επένδυσης	Μέσο κόστος επένδυσης στον τριτογενή τομέα	Μέσο κόστος επένδυσης στον οικιακό τομέα
#1	Μόνωση: 30 χρόνια.	31.9 €/m ² μόνωσης	33 €/m ² μόνωσης
#2	Μόνωση: 30 χρόνια.	27.1 €/m ² μόνωσης	28 €/m ² μόνωσης
#3	Διπλά τζάμια: 30 χρόνια.	156 €/m ² υαλοστασίου	160 €/m ² υαλοστασίου
#4		170-500 €/κτίριο (για 1000-5000m ²)	110 €
#5	Λέβητας πετρελαίου: 25 χρόνια.	1700-6000 €/κτίριο (για 1000-5000m ²)	1180 €/Μον. 2935 €/Πολ.
#6	Λέβητας Φ.Α: 25 χρόνια.	1300-6000 €/κτίριο (για 500-5000m ²)	1180 €/Μον. 2935 €/Πολ.
#7	Θερμοστάτες αντιστάθμισης: 20 χρόνια.	800-2600 €/κτίριο (για 1000-5000m ²)	880 €/κτίριο
#8	Θερμοστάτες χώρου: 15 χρόνια.	19.3 €/θερμοστάτη	290 €/Μον. 1500 Euro/Πολ
#9	Εξωτερική σκίαση: 10 χρόνια.	24.2 €/m ² σκιάστρου	20 €/m ² σκιάστρου
#10	Ανεμιστήρα οροφής: 10 χρόνια.	48 €/ανεμιστήρα	20 €/ανεμιστήρα
#11		0.08 €/kWh	
#12	Ηλιακοί συλλέκτες: 10 χρόνια.	290 €/m ² ηλιακό συλλέκτη	740 €/ηλιακό συλλέκτη
#13	Λαμπτήρες υψηλής απόδοσης: 10 χρόνια.	0.6 €/m ² επιφάνειας κτιρίου	1 €/m ² επιφάνειας κτιρίου
#14	BMS: 10 χρόνια.	14.5 €/m ² επιφάνειας κτιρίου	
#15	Αεροστεγάνωση: 2 χρόνια.		20 €/κατοικία
#16	Νέα κλιματιστικά: 10 χρόνια.		700 €/ κλιματιστικό

Από την εφαρμογή των MEE υπολογίστηκε για κάθε κατηγορία κτιρίων η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας. Στις Εικόνες 3 και 4 παρουσιάζονται κατά σειρά αποδοτικότητας τα πιο αποτελεσματικά MEE στον οικιακό και τριτογενή τομέα για το 2010, για κάθε κλιματική ζώνη.



Εικόνα 3. Ετήσια εξοικονομούμενη ενέργεια ανά κλιματική ζώνη, για τα σημαντικότερα MEE στα κτίρια του οικιακού τομέα για το 2010, [4, 5, 6].

Για τις κατοικίες τα πιο αποδοτικά μέτρα κατά σειρά, είναι η θερμομόνωση των εξωτερικών τοίχων, η αεροστεγάνωση των ανοιγμάτων, η τοποθέτηση διπλών υαλοστασίων και η συστηματική συντήρηση του συστήματος θέρμανσης. Για τα κτίρια του τριτογενή τομέα τα πιο αποδοτικά μέτρα είναι η θερμομόνωση των εξωτερικών τοίχων για τα σχολικά κτίρια και νοσοκομεία, ενώ για τα ξενοδοχεία και γραφεία/καταστήματα είναι η εγκατάσταση συστήματος διαχείρισης ενέργειας στο κτίριο (BMS).



Εικόνα 4. Ετήσια εξοικονομούμενη ενέργεια ανά κλιματική ζώνη, για τα σημαντικότερα ΜΕΕ στα κτίρια του τριτογενή τομέα για το 2010 [4, 5, 6].

Πίνακας 4: Μείωση ρύπων CO ₂ σε (kt) για τα ΜΕΕ στα ελληνικά κτίρια το 2010, [4, 5, 6, 7, 8].					
Μέτρα Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΜΕΕ)	Μείωση ρύπων CO ₂ σε (kt) από τα κτίρια				
	Γραφεία / Καταστήματα	Ξενοδοχεία	Σχολικά κτίρια	Ξενοδοχεία	Κατοικίες
#1. Θερμομόνωση εξωτερικών τοίχων	54.1	48.7	54.0	52.8	3573.6
#2. Θερμομόνωση οροφής	10.9	12.0	9.5	10.5	549.6
#3. Διπλά ναλοστάσια	46.9	21.1	21.6	26.6	1539.2
#4. Συντήρηση κεντρικών θερμάνσεων	137.5	59.5	23.4	34.8	951.4
#5. Αντικατάσταση των παλιών κεντρικών θερμάνσεων με νέες πετρελαίου	49.2	23.1	23.5	29.6	438.6
#6. Αντικατάσταση των παλιών κεντρικών θερμάνσεων με νέες φυσικού αερίου	16.4	5.4	--	18.7	144.0
#7. Θερμοστάτες Αντιστάθμισης	26.0	5.7	9.0	7.5	156.8
#8. Θερμοστάτες Χώρων	18.4	2.6	6.3	5.3	146.9
#9. Εξωτερική σκίαση	49.6	21.1	21.6	26.6	78.2
#10. Ανεμιστήρες οροφής	488.5	292.9	28.3	38.8	93.0
#11: Νυχτερινός αερισμός	53.9	--	--	--	--
#12: Ηλιακοί συλλέκτες για ΖΝΧ	15.3	133.4	1.5	45.9	2709.7
#13: Λαμπτήρες υψηλής ενεργειακής απόδοσης	713.1	369.0	148.2	106.2	817.3
#14: BMS – Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίων	815.1	423.5	--	59.7	--
#15: Αεροστεγάνωση Ανοιγμάτων	--	--	--	--	1712.2
#16: Εγκατάσταση νέων κλιματιστικών	--	--	--	--	240.9

Στον Πίνακα 4, παρουσιάζονται οι εκτιμώμενες μειώσεις εκπομπών CO₂ από την εφαρμογή των ΜΕΕ στα ελληνικά κτίρια το 2010 [4, 5, 6, 7, 8]. Οι κατοικίες παρουσιάζουν το

μεγαλύτερο δυναμικό μείωσης εκπομπών CO₂, λόγω του μεγάλου ποσοστού συμμετοχής τους στο κτιριακό απόθεμα.

5. ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΕΤΡΩΝ

Με βάση την παραπάνω ανάλυση έγινε οικονομική αξιολόγηση των ΜΕΕ με την μέθοδο κόστους-οφέλους, καθώς και της σκοπιμότητα εφαρμογής οικονομικών υποστηρικτικών πολιτικών άμεσων (επιδότησεις) ή έμμεσων (επιβολή φόρων ενέργειας ή φοροαπαλλαγή). Από την ανάλυση αυτή προσδιορίστηκαν οι προτεραιότητες που πρέπει να δοθούν σε εθνικό επίπεδο για την εφαρμογή των ΜΕΕ με κριτήρια την ενεργειακή απόδοση και την οικονομική βιωσιμότητα των μέτρων.

Πίνακας 5: Προτεραιότητες εφαρμογής των ΜΕΕ στα ελληνικά κτίρια [4, 5, 6, 7, 8].																	
ΜΕΕ	Ποσοστιαία συνολική ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας (%)										Προτεινόμενα μέτρα για κάθε είδος κτιρίου						
	Θερμική					Ηλεκτρική											
	Γ/Κ	Ξ	Σ	Ν	Μ-Π	Γ/Κ	Ξ	Σ	Ν	Μ-Π	ΓΚ	Ξ	Σ	Ν	Μ-Π (ανά ζώνη)		
	Θέρμανση Χώρων – Κτιριακό Κέλυφος																
#1	31	40	31	37	49	4	5	4			*	✓	*	✓	* (Α, Β) ✓ (Γ,Δ)		
#2	5	6	5	6	10	2	2		2		×	*	×	*	* (Α, Β, Γ, Δ)		
#3	11	19	18	18	19						×	×	×	*	* (Γ, Δ)		
#15					20						--	--	--	--	* (Α, Β) ✓ (Γ,Δ)		
	Θέρμανση Χώρων – Παραγωγή Θερμότητας																
#4	11				11						*	✓	*	✓	✓ (Α, Β, Γ, Δ)		
#5	17				17						✓	✓	✓	✓	* (Α) ✓ (Β,Γ,Δ)		
#6	21				21						×	✓	--	✓	✓ (Β, Γ)		
#7	5				4						*	✓	×	✓	* (Α, Β) ✓ (Γ,Δ)		
#8	5				4						✓	✓	✓	✓	* (Α, Β) ✓ (Γ,Δ)		
	Ψύξη																
#9						14	17	15	14		*	*		*	×		×
#10						60	60	60	60		✓	✓	*	✓	×		×
#11						16					*	--	--	--	--		--
#16										72	--	--	--	--	✓ (Α, Β, Γ, Δ)		
	Ζεστό Νερό Χρήσης																
#12						43	76	33	64		×	*	×	*	* (Α, Β, Γ, Δ)		
	Φωτισμός																
#13						60					✓	✓	✓	✓	✓ (Α, Β, Γ, Δ)		
		Ενεργειακή Διαχείριση κτιρίου (BMS)															
#14	20	20		20		30	30		30		✓	✓	--	✓	--		--

Στον **Πίνακα 5** παρουσιάζεται το μέσο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας (για όλες τις κλιματικές ζώνες και χρονολογίες κατασκευής), ανά τελική χρήση κτιρίου, καθώς και ο προσδιορισμός των ΜΕΕ ανάλογα την ενεργειακή απόδοση και την οικονομική βιωσιμότητά τους. Αρκετά από τα ΜΕΕ είναι οικονομικά ελκυστικά και βιώσιμα (✓) και δεν απαιτούν κάποια οικονομική υποστήριξη για την εφαρμογή τους, και συμβάλουν σημαντικά στην μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας και ρύπων. Άλλα μέτρα είναι ενεργειακά αποδοτικά (*) αλλά απαιτούν άμεσα ή έμμεσα οικονομικά κίνητρα. Τέλος προσδιορίζονται και τα ΜΕΕ (×) που για ορισμένους τουλάχιστον τύπους κτιρίων είναι υψηλούς κόστους και οποιαδήποτε οικονομική υποστήριξη δεν συμβάλει στην βιωσιμότητά τους.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας στα ελληνικά κτίρια είναι αρκετά υψηλό, και μπορεί να αξιοποιηθεί με την εφαρμογή των κατάλληλων Μέτρων Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΜΕΕ) χωρίς την απαίτηση οποιασδήποτε οικονομικής υποστήριξης, αφού στην πλειονηφία τους είναι οικονομικά βιώσιμα. Αν ληφθεί υπόψη η συνεχής αύξηση του ενεργειακού κόστους (πετρέλαιο, ηλεκτρισμός), τα ΜΕΕ είναι σήμερα ακόμα πιο ελκυστικά από οικονομικής απόψεως. Εντούτοις με την εφαρμογή κατάλληλα σχεδιασμένων υποστηρικτικών πολιτικών είναι δυνατόν να επιτευχθούν ακόμη σημαντικότερες μειώσεις της καταναλισκόμενης ενέργειας και των συνεπαγόμενων εκπομπών στον τομέα των κτιρίων.

Το μεγαλύτερο δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας παρουσιάζεται στα κτίρια των κατοικιών, όπου κάποια από τα προτεινόμενα ΜΕΕ θα μπορούσαν να εφαρμοστούν από τους ιδιοκτήτες χωρίς ιδιαίτερες δαπάνες, όπως η συχνή συντήρηση και έλεγχος των Η/Μ συστημάτων (λέβητες, κλιματιστικά), η αεροστεγάνωση των ανοιγμάτων, η εγκατάσταση θερμοστατών, η αντικατάσταση των λαμπτήρων με ενεργειακούς κλπ. Με αντίστοιχες χαμηλές δαπάνες τα μέτρα αυτά μπορούν να εφαρμοστούν και στα κτίρια του τριτογενή τομέα. Τέλος, η θερμομόνωση των υφιστάμενων παλιών κτιρίων είναι το πιο ενεργειακά αποδοτικό ΜΕΕ για τις κατοικίες, νοσοκομεία και ξενοδοχεία και το δεύτερο σε σειρά ενεργειακά αποδοτικό ΜΕΕ για τα γραφεία/καταστήματα και σχολεία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Υπουργείο Ανάπτυξης - ΥΠΙΑΝ 2008, www.ypan.gr.
2. ΥΠΕΧΩΔΕ - ΕΑΑ, Αναθεώρηση του 2ου Εθνικού Προγράμματος μείωσης εκπομπών αερίων θερμοκηπίου - Εκτίμηση της ανάγκης αξιοποίησης των μηχανισμών του Πρωτοκόλλου του Κιότο. Αθήνα 2007.
3. Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδος – ΕΣΥΕ 2006, <http://www.statistics.gr/>
4. Δ. Λάλας, Κ.Α. Μπαλαράς, Α. Γαγλία, Ε. Γεωργοπούλου, Σ. Μοιρασγεντής, Ι. Σαραφίδης, Σ. Ψωμάς “Διερεύνηση Υποστηρικτικών Πολιτικών για την προώθηση των μέτρων πολιτικής του ΥΠΕΧΩΔΕ Σχετικά με Μείωση των Εκπομπών CO₂ στον Οικιακό – Τριτογενή Τομέα”, 650 σ., Τελική Τεχνική Έκθεση, Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος & Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΙΕΠΒΑ) - Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Αθήνα, Νοέμβριος 2002.
5. C.A. Balaras, A.G. Gaglia, E. Georgopoulou, S. Mirasgedis, Y. Sarafidis, D.P. Lalas. “European Residential Buildings and Empirical Assessment of the Hellenic Residential Building Stock, Energy Consumption Emissions and Potential Energy Savings”, Building & Environment, 42/3, 1298-1314 (2007).
6. A.G. Gaglia, C.A. Balaras, S. Mirasgedis, E. Georgopoulou, Y. Sarafidis, D.P. Lalas. “Empirical Assessment of the Hellenic Non-Residential Building Stock, Energy Consumption, Emissions and Potential Energy Savings”. Energy Conversion & Management, 48/4, 1160-1175 (2007).
7. S. Mirasgedis, E. Georgopoulou, Y. Sarafidis, C.A. Balaras, A. Gaglia and D.P. Lalas. “CO₂ Emission Reduction Policies in the Greek Residential Sector: A Methodological Framework for Their Economic Evaluation”. Energy Conversion and Management, 45, 537-557, (2004).
8. E. Georgopoulou, Y. Sarafidis, S. Mirasgedis, C.A. Balaras, A. Gaglia, D. P. Lalas. “Evaluating the Need for Economic Support Policies in Promoting Greenhouse Gas Emission Reduction Measure in the Building Sector: The Case of Greece”. Energy Policy, 34/15, 2012-2031, (2006).

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΓΡΑΦΕΙΩΝ ΤΟΥ ΔΗΜΟΣΙΟΥ ΤΟΜΕΑ

Κωνσταντινίδου Χ., Δημούδη Α., Κοσμόπουλος Π.

Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνική Σχολή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Βας.
Σοφίας 12, 56 100 Ξάνθη, e-mail: adimoudi@env.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή, μελετάται η ενεργειακή συμπεριφορά δημόσιων κτιρίων. Η εργασία έχει ως στόχο να γίνει αποτύπωση της ενεργειακής κατάστασης των δημοσίων κτιρίων γραφείων της Γ' κλιματικής ζώνης, και ειδικότερα στο νομό Φλώρινας, ώστε να εμπλουτίσει την υπάρχουσα γνώση για την ενεργειακή κατάσταση του κτιριακού δυναμικού στην Ελλάδα. Απώτερος στόχος είναι να προσθέσει δεδομένα που θα διευκολύνουν την πιο αντιπροσωπευτική ενεργειακή βαθμονόμηση των κτιρίων γραφείων και ειδικότερα των κτιρίων γραφείων του δημόσιου τομέα. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη είναι τα κατασκευαστικά δεδομένα του κτιρίου, τα δεδομένα για τη λειτουργία του κτιρίου, οι ενεργειακές καταναλώσεις.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή και χρήση ενέργειας είναι η αιτία για το 94% των εκπομπών CO₂, με ένα σημαντικό μερίδιο τουλάχιστον 45% να αναλογεί στον κτιριακό τομέα. Η οικοδομή ευθύνεται για το 40% της κατανάλωσης ενέργειας στην Ευρώπη, ενώ η αύξηση ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας προβλέπεται να αγγίξει μέχρι το 2020 το 42% [1].

Τα ελληνικά κτίρια απορροφούν περίπου το 1/3 της καταναλισκόμενης ενέργειας και εκπέμπουν το 45% διοξειδίου του άνθρακα [2]. Συγκεκριμένα, ο τριτογενής τομέας αντιπροσωπεύει περίπου το 25% του συνολικού αριθμού των ελληνικών κτιρίων. Η κατηγορία των γραφείων/ εμπορικών κτιρίων αποτελεί το υψηλότερο ποσοστό μεταξύ των κύριων κατηγοριών του τριτογενή τομέα και αντιπροσωπεύει το 2,74% του συνολικού κτιριακού αποθέματος, που αντιστοιχεί σε μια συνολική κατανάλωση ενέργειας ίση με 339 kWh/m² [3].

2. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΣΕ ΔΗΜΟΣΙΑ ΚΤΙΡΙΑ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΦΛΩΡΙΝΑΣ

2.1 Έρευνα σε δημόσια κτίρια στη Φλώρινα

Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε είναι ο νομός Φλώρινας και τα κτίρια εντάσσονται μέσα στα πλαίσια του νομού. Ο νομός Φλώρινας είναι από τις ψυχρότερες περιοχές της Ελλάδας. Ανήκει στην Γ' κλιματική ζώνη, που σημαίνει ότι τα κτίρια της ζώνης αυτής έχουν πολύ μικρές ανάγκες σε ψύξη και πολύ μεγάλες σε θέρμανση. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του κλίματος της περιοχής μελέτης είναι οι ψυχροί χειμώνες με ιδιαίτερα χαμηλές θερμοκρασίες, χιονοπτώσεις και συχνές βροχοπτώσεις. Αντίθετα η καλοκαιρινή περίοδος χαρακτηρίζεται από υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της ημέρας που σταδιακά ελαττώνονται καθώς πέφτει η νύχτα.

Τα κτίρια που μελετήθηκαν [4] αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα δημόσιων κτιρίων γραφείων στο Νομό Φλώρινας, από τη μελέτη των οποίων προέκυψαν συμπεράσματα όσον αφορά την ενεργειακή τους απόδοση. Το σύνολο των κτιρίων που εξετάστηκαν αφορά πέντε, εκ των οποίων το ένα (Κτίριο 1) ανήκει στην κατηγορία των παλιών κατασκευών (περίοδος κατασκευής πριν το 1950) και τα άλλα (Κτίρια 2 έως 5) στα σύγχρονα κτίρια (περίοδος κατασκευής μετά το 1980). Τα σύγχρονα κτίρια, καθώς έχουν κατασκευαστεί μετά την εφαρμογή του Κανονισμού Θερμομόνωσης (Κτίριο 2 και 5 το 2000, κτίριο το 3 2002, κτίριο 3 το 1993) θεωρούνται θερμομονωμένα. Όλα τα κτίρια έχουν κεντρικό σύστημα θέρμανσης πετρελαίου.

Επιλέχθηκαν τα συγκεκριμένα κτίρια γραφείων, διότι είναι δημόσιες υπηρεσίες και στεγάζουν μόνο γραφεία, των οποίων η λειτουργία είναι από τις 7:30 έως τις 15:00 και υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα για τις ενεργειακές καταναλώσεις τους για τα τελευταία 3 έτη. Επιπλέον, με τη μελέτη αυτή έγινε μια προσπάθεια να αναλυθούν κτίρια διαφορετικών κατασκευαστικών χαρακτηριστικών και χρονολογιών κατασκευής, αφού συμπεριλαμβάνονται νεοκλασικά κτίρια (Κτίριο 1), κτίρια τουλάχιστον μιας δεκαετίας (Κτίριο 4) και σύγχρονα κτίρια (Κτίρια 2, 3 και 5, ώστε να διαπιστωθεί η ενεργειακή τους απόδοση, σε σύγκριση με τις υφιστάμενες τοπικές κλιματολογικές συνθήκες.

2.2 Ενεργειακή κατάσταση κτιρίων γραφείων στην Ελλάδα

Με βάση την ανάλυση της ενεργειακής συμπεριφοράς των δημόσιων κτιρίων του Νομού Φλώρινας γίνεται μια σύγκριση με βάση δύο βιβλιογραφικές πηγές, που αφορούν δημόσια κτίρια.

Η πρώτη είναι μια μελέτη που αφορά δημόσια κτίρια, γενικότερα, της Περιφέρειας της Κεντρικής Μακεδονίας, που αναφέρεται στον «Οδηγό Εξοικονόμησης Ενέργειας στα Δημόσια κτίρια» [5]. Στην έρευνα αυτή εξετάστηκαν 30 κτίρια, εκ των οποίων το 14% αποτελεί δημόσιες υπηρεσίες, η επιφάνεια των οποίων καλύπτει το 37%. Επίσης, τα κτίρια που εξετάζονται είναι κατασκευασμένα στο μεγαλύτερο ποσοστό τους, την περίοδο 1960-'80 και το εμβαδόν τους κυμαίνεται από 180 m² έως 6.300 m².

Η δεύτερη είναι μια μελέτη που αφορά κτίρια του τριτογενή τομέα στην Ελλάδα [6], στην οποία συμπεριλαμβάνεται και η ανάλυση για κτίρια γραφείων/ εμπορικά (όπως αναγράφονται). Τα κτίρια της μελέτης αυτής κατατάσσονται με βάση την κλιματική ζώνη, στην οποία ανήκουν. Έτσι, η σύγκριση θα γίνει για τα κτίρια γραφείων/ εμπορικά που ανήκουν στην ζώνη Δ, η οποία ταυτίζεται με την κλιματική ζώνη των κτιρίων του νομού Φλώρινας. Τα κτίρια γραφείων/ εμπορικά της ζώνης Δ που είναι κατασκευασμένα την περίοδο 1981 – 2001 ανέρχονται σε 1.052, με συνολική επιφάνεια 420.633 m².

2.3 Συνολική αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων

Στην ενότητα αυτή γίνεται η συνολική αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων και για το σκοπό αυτό παρατίθενται οι συνολικοί πίνακες των καταναλώσεων, καθώς και οι γραφικές παραστάσεις των συνολικών ενεργειακών καταναλώσεων, ώστε να γίνει μια προσπάθεια εκτίμησης της ενεργειακής κατάστασης των δημόσιων κτιρίων στο Νομό Φλώρινας.

Επιπλέον, για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση χρειάστηκε να γίνει η μετατροπή των καταναλώσεων, ρεύματος και πετρελαίου, σε kWh/m² της συνολικής επιφάνειας του κτιρίου, καθώς οι ειδικές καταναλώσεις των κτιρίων που παρουσιάζονται στις προαναφερθείσες μελέτες, είναι με βάση τη συνολική επιφάνεια των κτιρίων.

Για το σκοπό αυτό παρουσιάζεται ο πίνακας 1 με την ετήσια ειδική κατανάλωση θερμικής ενέργειας και τη μέση τιμή για κάθε κτίριο και ο πίνακας 2 με την ετήσια ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και τη μέση τιμή για κάθε κτίριο, την περίοδο 2004 - 2006.

Πίνακας 1: Ειδική θερμική ενέργεια σε kWh/m² * για την περίοδο 2004-2006

	Κτίριο 1	Κτίριο 2	Κτίριο 3	Κτίριο 4	Κτίριο 5
2004	261,94	106,77	117,07	54,77	218,22
2005	192,69	88,83	122,92	52,61	134,16
2006	235,86	113,65	153,36	88,03	159,84
Μ. Ο. *	231,48	100,18	127,90	65,14	170,74

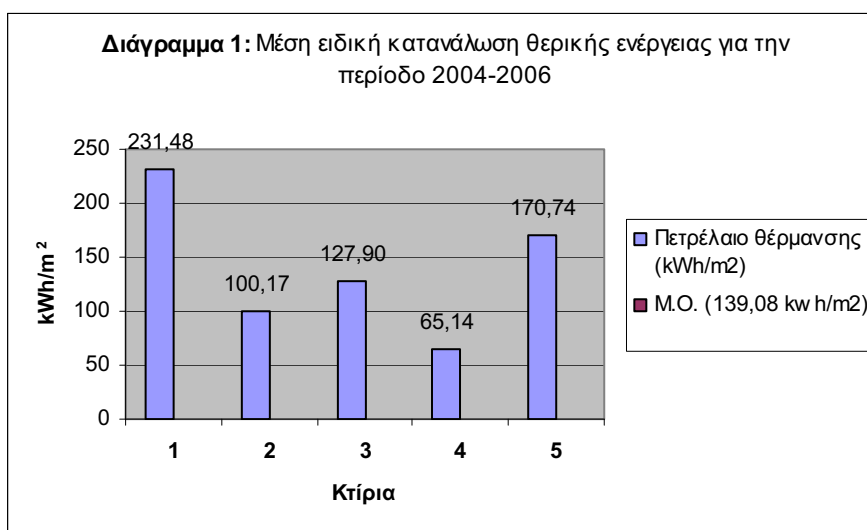
* kWh/m² Συνολικής επιφάνειας κτιρίου

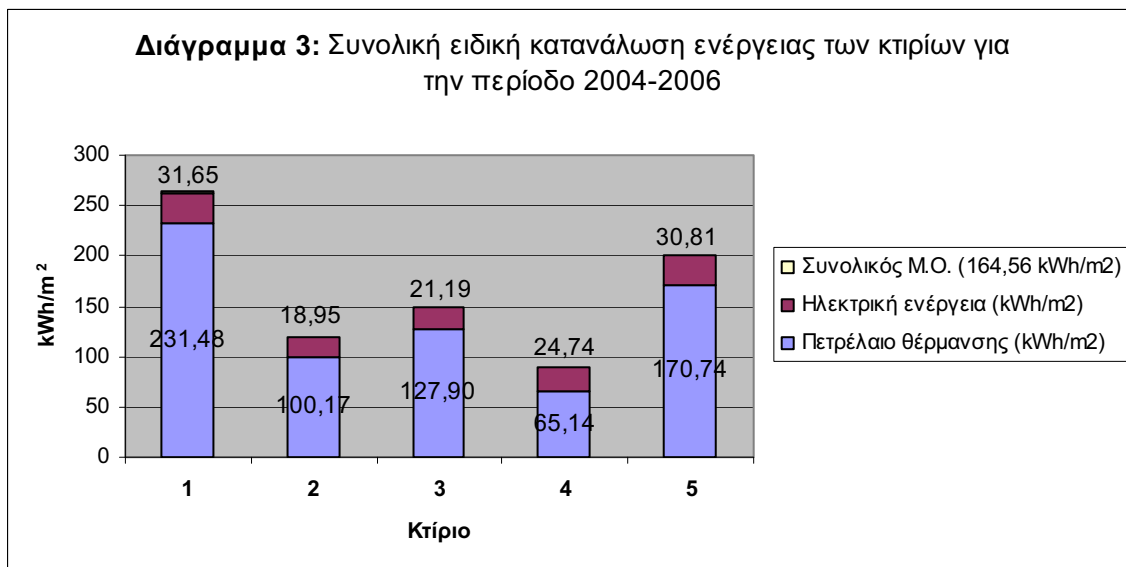
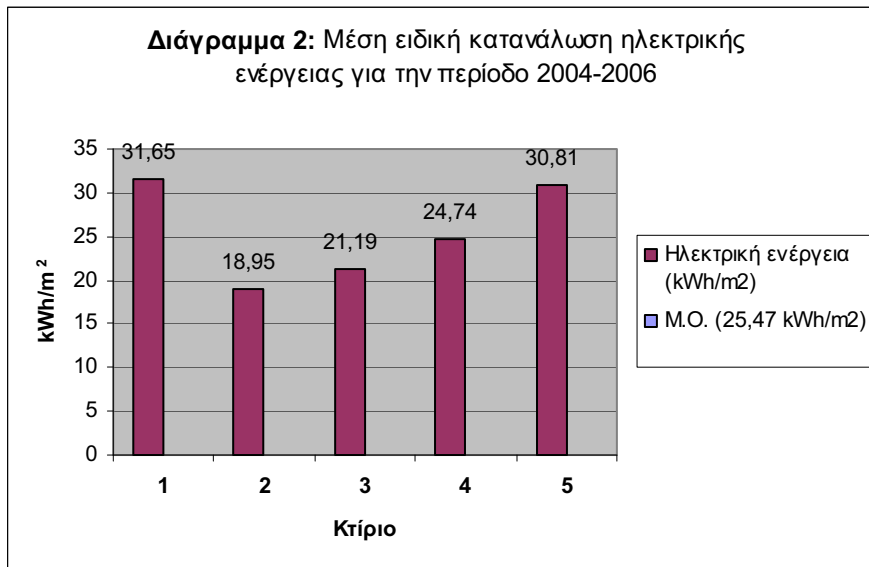
Πίνακας 2: Ειδική ηλεκτρική ενέργεια σε kWh/m² * για την περίοδο 2004-2006

	Κτίριο 1	Κτίριο 2	Κτίριο 3	Κτίριο 4	Κτίριο 5
2004	32,11	18,72	19,12	22,69	24,89
2005	32,62	19,16	20,10	25,90	29,86
2006	33,26	18,92	27,15	25,62	37,68
Μ. Ο. *	31,65	18,96	21,19	24,74	30,82

* kWh/m² Συνολικής επιφάνειας κτιρίου

Στη συνέχεια δίνονται τα διαγράμματα 1 έως 3, ώστε να γίνει η σύγκριση μεταξύ των κτιρίων.





Από το διάγραμμα 3 φαίνεται ότι η συνολική μέση ειδική κατανάλωση ενέργειας των πέντε κτιρίων του νομού Φλώρινας ανέρχεται σε $164,56 \text{ kWh/m}^2$, με μέση θερμική ενέργεια ίση με $139,08 \text{ kWh/m}^2$ και μέση ηλεκτρική ενέργεια ίση με $25,47 \text{ kWh/m}^2$. Αυτό σημαίνει ότι η θερμική ενέργεια αποτελεί το 84% της συνολικής και η ηλεκτρική το 15% μόνο.

Από τη μελέτη των δημόσιων κτιρίων της Κεντρικής Μακεδονίας παρουσιάζεται ότι η συνολική μέση κατανάλωση ενέργειας, ανοιγμένη στη μονάδα επιφάνειας των κτιρίων, ανέρχεται σε 198 kWh/m^2 , με την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση χώρων να απορροφά 167 kWh/m^2 και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας να είναι μόλις 22 kWh/m^2 . Αυτό σημαίνει ότι το 88,9% της καταναλισκόμενης ενέργειας αφορά στη θέρμανση χώρων και το υπολειπόμενο 11,1% καλύπτει όλες τις υπόλοιπες ανάγκες [5].

Επομένως, τα συμπεράσματα που εξάγονται, μεταξύ των δύο αυτών ερευνών, είναι ότι τα δημόσια κτίρια του νομού Φλώρινας, καταναλώνουν περίπου ίδιες ποσότητες με αυτές των κτιρίων της Κεντρικής Μακεδονίας.

Σύμφωνα με την έρευνα για τα κτίρια γραφείων/εμπορικά, οι ειδικές καταναλώσεις των κτιρίων παρουσιάζονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη ανήκουν τα κτίρια που κατασκευάστηκαν πριν το 1980 και στη δεύτερη αυτά που κατασκευάστηκαν κατά την περίοδο 1981 – 2001.

Τα κτίρια της πρώτης κατηγορίας καταναλώνουν κατά μέσο όρο 134 kWh/m² θερμική ενέργεια και 36 kWh/m² ηλεκτρική, δηλαδή, το 78,8% της καταναλισκόμενης ενέργειας αφορά στη θέρμανση χώρων και το υπόλοιπο 21% καλύπτει όλες τις υπόλοιπες ανάγκες [6].

Στα κτίρια με περίοδο κατασκευής 1981 – 2001, η μέση κατανάλωση της θερμικής και της ηλεκτρικής ενέργειας είναι 110 και 48 kWh/m² αντίστοιχα, που σημαίνει ότι το 69,6 % αφορά τη θερμική κατανάλωση ενέργειας και το 30% την ηλεκτρική [6].

Το Κτίριο 1 συγκρίνεται με βάση την πρώτη κατηγορία, καθώς κατασκευάστηκε πριν το 1980. Η μέση ειδική κατανάλωσή του για θέρμανση χώρων ανέρχεται σε 231,48 kWh/m² και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι 31,65 kWh/m². Επομένως, συμπεραίνεται ότι το κτίριο έχει αυξημένες απαιτήσεις σε πετρέλαιο θέρμανσης, καθώς ξεπερνάει κατά πολύ το μέσο όρο των κτιρίων της κατηγορίας του, ενώ η απαίτησή του για ρεύμα κυμαίνεται στα ίδια πλαίσια.

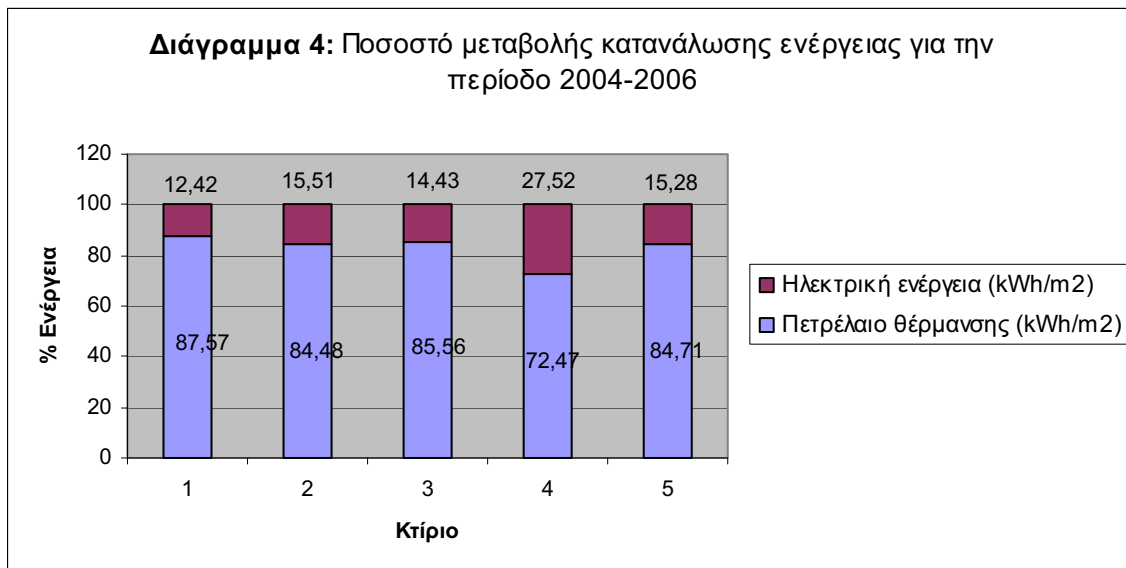
Τα υπόλοιπα κτίρια του νομού συγκρίνονται με βάση τη δεύτερη κατηγορία. Από τα διαγράμματα εξάγονται οι μέσες τιμές των ειδικών καταναλώσεων των τεσσάρων, πλέον, κτιρίων που είναι 115,98 kWh/m² θερμικής ενέργειας και 23,92 kWh/m² ηλεκτρικής. Επομένως, συμπεραίνεται ότι τα υπόλοιπα κτίρια του νομού απαιτούν περίπου την ίδια ενέργεια για θέρμανση των εσωτερικών χώρων και καταναλώνουν πολύ λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια, σχεδόν τη μισή, από τα κτίρια της δεύτερης κατηγορίας.

Εν κατακλείδι, φαίνεται ότι το μόνο κτίριο που καταναλώνει υψηλές ποσότητες ενέργειας είναι το Κτίριο 1 το οποίο είναι και το μόνο κτίριο χωρίς μόνωση.

Κρίνεται, ωστόσο, σκόπιμο να επισημανθεί ότι το Κτίριο 1 είναι το παλαιότερο κτίριο, κατασκευασμένο επί τουρκοκρατίας. Παρόλο που μετά την ανακαίνιση του κτιρίου, η εξωτερική τοιχοποιία φθάνει τα 90 cm, το κτίριο επειδή δεν είναι μονωμένο, καταναλώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Συμπεραίνεται, λοιπόν, η αναγκαιότητα της θερμομόνωσης των κτιρίων τόσο από άποψη θερμικής άνεσης των ενοίκων του κτιρίου, όσο και της εξοικονόμησης ενέργειας και χρημάτων. Εντούτοις, σημαντικό ρόλο στην εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί, κυρίως, και η σωστή διαχείριση των συστημάτων θέρμανσης και δροσισμού από τους ενοίκους του κτιρίου.

Στο διάγραμμα 4 φαίνεται η ποσοστιαία μεταβολή κατανάλωσης της θερμικής και της ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε κτίριο.

Παρατηρείται, λοιπόν, ότι η θερμική ενέργεια σε όλα τα κτίρια κυμαίνεται γύρω στα 85-87 % ενώ η ηλεκτρική ενέργεια καλύπτει περίπου το 15-13 % της συνολικής ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η ενέργεια που καταναλώνουν τα κτίρια, στο μεγαλύτερο ποσοστό τους, είναι για να καλυφθούν οι ανάγκες για θερμική άνεση και σε αρκετά μικρότερο ποσοστό καταναλώνεται ηλεκτρική ενέργεια για όλες τις υπόλοιπες χρήσεις.



3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέση κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια γραφείων του δημοσίου σε μία από τις ψυχρότερες περιοχές της Γ' κλιματικής ζώνης (σύμφωνα με τον ισχύοντα Κανονισμό Θερμομόνωσης) είναι 164,56 kWh/m², με μέση θερμική ενέργεια ίση με 139,08 kWh/m² και μέση ηλεκτρική ενέργεια ίση με 25,47 kWh/m² (συνολικής επιφάνειας κτιρίου). Με βάση τις ενεργειακές καταγραφές που πραγματοποιήθηκαν, διαπιστώνεται ότι κανένα από τα κτίρια δεν παρουσιάζει τη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση.

Κλείνοντας, πρέπει να ειπωθεί ότι τα κτίρια γραφείων γενικά αποτελούν από μόνα τους μια ιδιαίτερη περίπτωση, σαν αποτέλεσμα των ειδικών συνθηκών κατασκευής και λειτουργίας τους.

Η κατανόηση της περιβαλλοντικής συμπεριφοράς και της ενεργειακής απόδοσης αυτών των κτιρίων συμβάλλει στη μείωση των ενεργειακών τους καταναλώσεων και στη καλύτερη εκμετάλλευση της χρησιμοποιούμενης ενέργειας, αλλά και στη βελτιστοποίηση των εσωτερικών συνθηκών τους, ώστε να δημιουργείται ένα πραγματικά ικανοποιητικό περιβάλλον για τους ανθρώπους που εργάζονται και κινούνται μέσα σ' αυτά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <http://www.ergotaxiaka.gr/printArticle.php?ID=60>
- [2] Μπαλάρας Κ., 'Οδηγός εξοικονόμησης ενέργειας στις κατοικίες', Αθήνα: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών -ΥΠΕΧΩΔΕ, 2001.
- [3] NHSS. 'Results from the census of constructions – buildings of the December 1, 1990', Athens: National Hellenic Statistical Service, 2000.
- [5] Κωνσταντινίδου Χρ. 'Ενεργειακές επιθεωρήσεις – βαθμονομήσεις δημοσίων κτιρίων: Μελέτη εφαρμογής Ν. Φλώρινας', Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δ.Π.Θ., 2007.
- [4] Λιβέρης Π., Αραβαντινός Δ., Παπαδόπουλος Α., Τσακίρης Α., 'Οδηγός εξοικονόμησης ενέργειας στα δημόσια κτίρια', Θεσ/νίκη: ΑΠΘ – Δομοτεχνική, 1996.
- [5] Gaglia A.G., Balaras C.A., Mirasgedis S., Georgopoulou E., Sarafidis Y., Lalas D.P., 'Empirical assessment of the Hellenic non-residential building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings', Energy Conversion and Management, Τεύχ, 48, σ. 1160 – 1175, 2007.

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΞΕΝΟΔΟΧΕΙΑΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ

Σ.Ν. Μποέμη¹, Α.Μ. Παπαδόπουλος² και Π.Μιχαλακάκου¹

¹Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων
e-mail: boemi@aix.meng.auth.gr

²Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ
GR-541 24 Θεσσαλονίκη, Τηλ: (+302310) - 996011, Fax (+302310)-996012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η λήψη μέτρων για την προστασία του περιβάλλοντος γίνεται όλο και περισσότερο επιτακτική και τα χρησιμοποιούμενα επιχειρήματα προς την κατεύθυνση αυτή είναι δεν είναι πλέον μόνο ηθικά, αλλά ποσοτικοποιημένα κοινωνικά και πολιτικά. Επιπλέον, η ευρεία διάδοση εθελοντικών εργαλείων περιβαλλοντικής πιστοποίησης και η αποδοχή κωδικών δεοντολογίας στο τομέα του τουρισμού εστιάζουν πλέον σε περιβαλλοντικά ζητήματα. Επομένως, αναμενόμενη είναι η υιοθέτηση του διεθνούς αναγνωρισμένου ISO 14001 και του ευρωπαϊκού Eco-Label τόσο για οικονομικούς λόγους όσο και για παρουσίαση μιας πιο θετικής και περιβαλλοντικά ευαισθητοποιημένης εικόνας των ξενοδοχειακών μονάδων. Όσον αφορά τα συγκριμένα συστήματα πιστοποίησης, οι και κάτοχοι του ISO 14001 εκπληρώνουν αυτόματα και τις απαιτήσεις οικολογικής ετικέτας Eco-Label της ΕΕ. Δηλαδή, είναι δυο οικολογικές πιστοποιήσεις με παραπλήσια κριτήρια και με κοινό στόχο οι οποίες υπόσχονται, μέσω της υιοθέτησης των κριτηρίων τους, βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης των υπηρεσιών αλλά και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των ξενοδοχειακών μονάδων. Ωστόσο, μικρός αριθμός μελετών έχει πραγματοποιηθεί προς την συγκριτική ανάλυση των δύο συστημάτων αλλά και του τρόπου που επηρεάζουν την εξοικονόμηση ενέργειας στα ξενοδοχεία. Στην εργασία αυτή αναλύονται τα κριτήρια του ISO 14001 και του Eco-Label, συσχετίζονται με την ελληνική πραγματικότητα και τον τρόπο που επηρεάζουν τους πελάτες των ξενοδοχείων και το προσωπικό αυτών αλλά και συζητείται ο τρόπος με τον οποίο τα συστήματα αυτά βοηθούν στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στις ξενοδοχειακές κατασκευές.

1. ΞΕΝΟΔΟΧΕΙΑΚΟΣ ΚΛΑΔΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΝΤΙΛΗΨΗ

Με βάση έρευνα της Hellastat, όσον αφορά την ελληνική πραγματικότητα, ο ξενοδοχειακός κλάδος βρίσκεται σε συνεχή διαρκή άνοδο [1]. Πιο συγκεκριμένα, ο κύκλος εργασιών των ξενοδοχείων για το 2006, αυξήθηκε κατά 5,8% και διαμορφώθηκε σε 2,69 δις. € από 2,54 δις. € που ήταν το 2005. Το 75,7% των επιχειρήσεων ενίσχυσε τον κύκλο εργασιών σε σχέση με την προηγούμενη χρήση. Το 2007 αποτέλεσε ένα ακόμα θετικό για την εγχώρια τουριστική δραστηριότητα έτος, με βελτίωση της τάξης του 6-7% σε όρους αεροπορικών αφίξεων (ΙΤΕΠ, [2]), τη στιγμή που η αντίστοιχη μεταβολή σε παγκόσμια κλίμακα ήταν περίπου 4%, με βάση δεδομένα του Παγκόσμιου Οργανισμού Τουρισμού [3]. Ωστόσο, οι προκλήσεις για τον ξενοδοχειακό κλάδο είναι πολλές. Μεταξύ αυτών αναφέρονται η ανάπτυξη εναλλακτικών μορφών τουρισμού, η στροφή σε διαφορετικά target-group τουριστών που δαπανούν μεγαλύτερα ποσά (π.χ. Αμερικανοί) και η χρηματοδότηση επενδύσεων από το νέο αναπτυξιακό νόμο.

Ως προς την περιβαλλοντική αντίληψη, από έρευνα του Ευρωβαρόμετρου προκύπτει ότι ολοένα και περισσότερο οι Ευρωπαίοι συνειδητοποιούν τον ρόλο που διαδραματίζει το περιβάλλον στην καθημερινή τους ζωή, ενώ περισσότερα από τα δυο τρίτα των Ευρωπαίων προτιμούν οι πολιτικές αποφάσεις για το περιβάλλον να λαμβάνονται σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης. Τα πέντε περιβαλλοντικά ζητήματα που τους απασχολούν περισσότερο είναι η αλλαγή του κλίματος, η ρύπανση του αέρα και των υδάτων, οι ανθρωπογενείς καταστροφές και η χρήση χημικών ουσιών στα προϊόντα καθημερινής χρήσης [4].

Επομένως, προκειμένου να χτίσει μια θετική εικόνα η ξενοδοχειακή βιομηχανία και λαμβάνοντας υπόψη τα ηθικά, κοινωνικά και πολιτικά ζητήματα που τίθενται είναι σαφής η πρόθεση να ακολουθηθεί μια περιβαλλοντικά πιο φιλική πολιτική και να ληφθούν τα ανάλογα μέτρα. Για το σκοπό αυτό ολοένα και περισσότερες επιχειρήσεις αντιμετωπίζουν θετικά και εφαρμόζουν Συστήματα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης (ΣΠΔ) τα οποία είναι μια μεθοδολογία συστηματοποίησης των διεργασιών μιας επιχείρησης, με στόχο τη βελτίωση των περιβαλλοντικών και οικονομικών της επιδόσεων. Υπάρχουν διάφορα σχήματα περιβαλλοντικής διαχείρισης σε εθνικό, ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο τα σημαντικότερα από αυτά είναι το ISO 14001, το EMAS και το Ευρωπαϊκό οικολογικό σήμα. Παράλληλα, υπάρχουν και οικολογικά σήματα καθώς και σφραγίδες περιβαλλοντικής ποιότητας.

Τα σχήματα αυτά πέραν από τη μείωση και πρόληψη της ρύπανσης, ενισχύουν την εικόνα και την ανταγωνιστικότητα των τουριστικών καταλυμάτων, ενώ παράλληλα βοηθούν στο να γίνει πλήρως αντιληπτό ότι μακροπρόθεσμα η ικανότητα μίας περιοχής να ελκύει τουρισμό συνδέεται άμεσα με την διατήρηση του περιβάλλοντος σε καλή κατάσταση.

Επιπλέον, τον Οκτώβριο (Πρόσκληση 09.10.2008/20758) η Πανελλήνια Ομοσπονδία Ξενοδόχων (ΠΟΞ) υπέβαλε πρόταση στο Υπουργείο Τουριστικής Ανάπτυξης για την εκπόνηση μελέτης σχετικά με την πιστοποίηση των οικολογικών ξενοδοχείων στην Ελλάδα – Eco Hotels - με στόχο την ένταξη της ελληνικής ξενοδοχειακής αγοράς στη δυναμικά αναπτυσσόμενη αγορά του «πράσινου / οικολογικού τουρισμού». Πέραν αυτού, η ΠΟΞ ενημερώνει διαρκώς τα μέλη της επί των σύγχρονων τάσεων και εξελίξεων στον τομέα των εφαρμογών εξοικονόμησης ενέργειας, διαχείρισης νερού, αποβλήτων και απορριμμάτων [5].

2. ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ISO 14001

Η σειρά προτύπων ISO 1400 εκδόθηκε το 1996 από Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης διαβλέποντας τις ανάγκες της αγοράς για συστήματα περιβαλλοντικής διαχείρισης [6,7].

Από αυτά το πρότυπο ISO 14001 είναι ένα διεθνώς αναγνωρισμένο πρότυπο το οποίο αποτελεί μοντέλο για ένα Σύστημα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης που μπορεί να αξιολογηθεί και να πιστοποιηθεί από διαπιστευμένους φορείς πιστοποίησης. Συγκεκριμένα, παρέχει οδηγίες και απαιτούμενα σημεία ελέγχου που πρέπει να προσαρμόζονται στις δραστηριότητες εκείνες που έχουν επίδραση στο περιβάλλον. Τέτοιες δραστηριότητες είναι η χρήση φυσικών πόρων, ο χειρισμός και η διάθεση απορριμμάτων και η κατανάλωση ενέργειας. Όπως όλα τα διεθνή πρότυπα, έτσι και το ISO 14001 έχει σχεδιασθεί με τέτοιον τρόπο, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα μέρη του κόσμου.

Το συγκεκριμένο πρότυπο έχει αναθεωρηθεί το 2004 για να γίνει περισσότερο φιλικό στον χρήστη και περισσότερο συμβατό με τα πρότυπα ISO 9001 και OHSAS 18001, δίνοντας με αυτόν τον τρόπο τη δυνατότητα στις επιχειρήσεις να εξοικονομήσουν πόρους που θα ήταν απαραίτητοι για την ανάπτυξη και την εφαρμογή των παραπάνω προτύπων χωριστά.

Το πεδίο εφαρμογής του είναι επιχειρήσεις και οργανισμοί οποιουδήποτε μεγέθους, κλάδου και αντικειμένου δραστηριότητας.

Το ISO 14001 βασίζεται σε πέντε βασικές αρχές: (1) εφαρμογή περιβαλλοντικής πολιτικής, (2) προγραμματισμός, (3) εφαρμογή και λειτουργία, (4) έλεγχος και διορθωτικές δράσεις,

(5) διοικητική αναθεώρηση. Για να πραγματοποιηθούν οι αρχές αυτές θα πρέπει να πραγματοποιηθούν τα εξής:

1. Εφαρμογή περιβαλλοντικής πολιτικής – ανάπτυξη σαφούς και δεσμευτικής πολιτικής για την προστασία του περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένης της υποχρέωσης της συμμόρφωσης με την σχετική περιβαλλοντική νομοθεσία και κανονισμούς, και καταβολή συνεχών προσπαθειών για βελτίωση.
2. Προγραμματισμός – προγραμματισμός σε μακροπρόθεσμα και βραχυπρόθεσμα.
3. Εφαρμογή και λειτουργία – ανάπτυξη δομής και ένα σύνολο ευθυνών, διαδικασιών κατάρτισης, λειτουργικών ελέγχων, και τεκμηρίωσης.
4. Έλεγχος και διορθωτικές δράσεις – παρακολούθηση απόδοσης σε πιθανές μελλοντικές νομοθετικές αλλαγές και απαιτήσεις και λήψη ανάλογων διορθωτικών αλλά και προληπτικών μέτρων σε περιπτώσεις μη-συμμόρφωσης.

Επιπλέον, σύμφωνα με το πρότυπο εντοπίζονται οι διαδικασίες της εταιρείας που επιβαρύνουν το περιβάλλον, καθορίζονται οι στόχοι που οδηγούν στην μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ποσοτικοποιούνται και ορίζονται οι απαραίτητες διαδικασίες των οποίων η διαρκής εφαρμογή εξασφαλίζει την επίτευξη τους. Ελέγχονται, ώστε να επιτυγχάνεται η ικανοποιητική εφαρμογή τους και, αν χρειαστεί, γίνονται οι κατάλληλες διορθωτικές κινήσεις. Παράλληλα καταγράφονται οι αρμοδιότητες του προσωπικού που εκτελεί αυτές τις διαδικασίες, το οποίο και εκπαιδεύεται κατάλληλα.

Επειδή η συνεχής βελτίωση της περιβαλλοντικής επίδοσης είναι ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του προτύπου (ISO 14001), το ετήσιο κόστος που απαιτείται για την διατήρηση της πιστοποίησης και τα διάφορα κόστη του προτύπου θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν στον ετήσιο προϋπολογισμό [8]. Το ISO 14001 πολλές φορές αντιμετωπίζεται από τις μικρομεσαίες επιχειρήσεις ως μία απλή πιστοποίηση η οποία απαιτεί κάποιο χρηματικό ποσό και δεν υιοθετούν την συγκεκριμένη άποψη, δεν ωφελούνται από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει το συγκεκριμένο πρότυπο και η πιστοποίηση ουσιαστικά είναι χάσιμο χρημάτων. Επομένως, πριν την απόφαση για την ένταξη στο σύστημα του ISO 14001 είναι απαραίτητο να εξετασθεί εάν το συγκεκριμένο πρότυπο είναι πράγματι κατάλληλο για την επιχείρηση. Θα πρέπει κατά συνέπεια να εξετασθεί μήπως το ευρωπαϊκό πρότυπο EMAS (Οικολογική Διαχείριση και Οικολογικός Έλεγχος) είναι καταλληλότερο.

Επιπλέον, ο σχεδιασμός των φάσεων εφαρμογής ενός προτύπου μπορεί να είναι μία σχετικά περίπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία, με αποτέλεσμα πολλές μικρομεσαίες επιχειρήσεις να μην μπορούν να ανταποκριθούν στο οικονομικό κόστος της πλήρους ολοκλήρωσης ενός συστήματος περιβαλλοντικής διαχείρισης και, κατά συνέπεια, να χάνουν τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του προτύπου.

3. ΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΟ ΣΗΜΑ (ECO-LABEL) ΓΙΑ ΤΑ ΤΟΥΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΑΛΥΜΑΤΑ

Το Eco-LABEL βασίζεται στον Κοινοτικό Κανονισμό 880/92 και ενσωματώθηκε στην ελληνική νομοθεσία τον Απρίλιο του 2003. Αποτελεί μέχρι στιγμής τη μόνη επίσημη οικολογική πιστοποίηση η οποία αναγνωρίζεται σε όλα τα Κράτη Μέλη, μια που το πρότυπο ISO 14001 δεν ισχύει σε όλα τα Κράτη Μέλη [8, 9].

Εφαρμόζεται σε εθελοντική βάση και έχει ως σκοπό την επιβράβευση και την προβολή των καταλυμάτων (ξενοδοχείων) που υιοθετούν πρακτικές και συμβάλλουν στη μείωση της ρύπανσης και γενικότερα στην προστασία του περιβάλλοντος. Στην πραγματικότητα αναδεικνύει την περιβαλλοντικά καλή επίδοση της επιχείρησης και αποτελεί μια προστιθέμενη ποιοτική αξία για αυτήν. Οι επιχειρήσεις που έχουν επιβραβευθεί με το λογότυπο του «Λουλουδιού» έχουν διακριθεί επίσης ως οι πιο φιλικές περιβαλλοντικά στην περιοχή τους.

Πριν από οποιαδήποτε ενέργεια που πρέπει να κάνει η ενδιαφερόμενη επιχείρηση για την απόκτηση του Ευρωπαϊκού Οικολογικού Σήματος είναι να επιβεβαιώσει ότι συμμορφώνεται ή ότι μπορεί να συμμορφωθεί με όλες τις απαιτήσεις της νομοθεσίας σε θέματα αδειοδοτήσεων.

Για την απονομή του Σήματος έχουν θεσπιστεί μια σειρά από κριτήρια τα οποία έχουν ως σκοπό τον περιορισμό των κυριότερων επιπτώσεων στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια και των τριών φάσεων του κύκλου ζωής της υπηρεσίας (αγορά, παροχή υπηρεσίας, απόβλητα). Από αυτά πρέπει να πληρούνται τα τριανταεπτά (37) υποχρεωτικά κριτήρια στο σύνολό τους και από τα προαιρετικά κριτήρια να επιλεγούν αυτά που με το σύστημα βαθμολόγησης θα συγκεντρώνουν κατ' ελάχιστο 16,5 -19,5 βαθμούς (ανάλογα την περίπτωση). Ειδικότερα τα κριτήρια στοχεύουν:

- Στην εξοικονόμηση ενέργειας και νερού.
- Στον περιορισμό αποβλήτων / απορριμμάτων.
- Στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Στη διαχείριση χημικών ουσιών.
- Στην περιβαλλοντική εκπαίδευση και επικοινωνία.

Οι ειδικές απαιτήσεις όσον αφορά την εκτίμηση και την επαλήθευση αναφέρονται σε κάθε κριτήριο.

Τα υποχρεωτικά και προαιρετικά κριτήρια κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες: (1) Ενέργεια, (2) Νερό, (3) Απορρυπαντικά και απολυμαντικά / Επικίνδυνες χημικές ουσίες, (4) Άλλες υπηρεσίες, (5) Γενική Διαχείριση (τα κριτήρια αυτής της κατηγορίας πληρούνται αυτομάτως αν υπάρχει ISO 14001 ή EMAS) [10, 11].

Ωστόσο, λόγω του ότι η συγκεκριμένη εργασία ασχολείται κατά κύριο λόγο με τον τρόπο με τον οποίο τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας βοηθούν στην μείωση κατανάλωσης ενέργειας στις ξενοδοχειακές μονάδες, στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα υποχρεωτικά κριτήρια που σχετίζονται με αυτήν.

ΕΝΕΡΓΕΙΑ
ΥΠΟΧΡΕΩΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ
1. Παραγωγή ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές (ΑΠΕ)
2. Άνθρακας και βαρέα κλάσματα πετρελαίου
3. Ηλεκτρική ενέργεια για θέρμανση Απόδοση λέβητα
4. Κλιματισμός
5. Μόνωση ανοιγμάτων
6. Αυτόματη διακοπή λειτουργίας κλιματισμού ή θέρμανσης
7. Αυτόματη διακοπή λειτουργίας φωτισμού
8. Χρήση λαμπτήρων εξοικονόμησης ενέργειας
9. Χρονοδιακόπτης σάουνα

Ενώ η χρήση των Συστημάτων Περιβαλλοντικής Διαχείρισης δεν αποτελεί απαίτηση για την απονομή του Eco-Label, ωστόσο η εφαρμογή των ΣΠΔ από ένα ξενοδοχείο διευκολύνει σημαντικά την απόκτηση του Ευρωπαϊκού Οικολογικού Σήματος.

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι στην Ελλάδα και συγκεκριμένα στη Ρόδο λειτουργεί η πρώτη ξενοδοχειακή μονάδα της Ε.Ε. στην οποία απονεμήθηκε το Ευρωπαϊκό Οικολογικό Σήμα το 2004. Επιπλέον, αρκετά ακόμα ξενοδοχεία στην Ελλάδα, έχουν ενδιαφερθεί και έχουν καταθέσει αιτήσεις για την παροχή Eco-Label [9].

Κάθε ενδιαφερόμενη τουριστική επιχείρηση για να λάβει το Οικολογικό Σήμα, πρέπει να έρθει σε επαφή με τον αρμόδιο εθνικό φορέα, ο οποίος παρέχει τις πληροφορίες για τη διαδικασία αίτησης, διανέμει το πακέτο αίτησης και έχει επίσης την ευθύνη επαλήθευσης της συμμόρφωσης της τουριστικής επιχείρησης με τα κριτήρια του Οικολογικού Σήματος πριν

από την απονομή του. Οι υποψήφιος επιχειρήσεις πρέπει να ετοιμάσουν και να υποβάλουν λεπτομερή φάκελο, συνοδευόμενο από το σχετικό τέλος αίτησης, που να αποδεικνύει πώς ικανοποιούνται τα τεχνικά κριτήρια του Οικολογικού Σήματος. Για την Ελλάδα υπεύθυνος φορέας εφαρμογής του «Λουλουδιού» είναι το ΑΣΑΟΣ (Ανώτατο Συμβούλιο Απονομής Οικολογικού Σήματος) [12].

Το σήμα έχει ισχύ έως ότου τα κριτήρια λήξουν ή αναθεωρηθούν. Στην περίπτωση της αναθεώρησης κριτηρίων προβλέπεται μία απλοποιημένη διαδικασία ανανέωσης του σήματος υπό τα αναθεωρημένα κριτήρια.

4. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΣΠΔ

Με βάση την ανάλυση των δυο συστημάτων για την εφαρμογή ενός ΣΠΔ απαιτείται:

- Καθορισμός περιβαλλοντικής πολιτικής η οποία αναφέρεται στους συνολικούς στόχους και αρχές της επιχείρησης σε σχέση με το περιβάλλον. Η δημιουργία και εφαρμογή περιβαλλοντικής πολιτικής δεσμεύει την εκάστοτε επιχείρηση για τήρηση της νομοθεσίας, πρόληψη της ρύπανσης και συνεχή βελτίωση.
- Οργάνωση δραστηριοτήτων και κατανομή των αρμοδιοτήτων σχετικά με την περιβαλλοντική διαχείριση.
- Αναγνώριση και ανάλυση δραστηριοτήτων της επιχείρησης που έχουν επιπτώσεις στο περιβάλλον.
- Θέσπιση αντικειμενικών σκοπών και στόχων, περιβαλλοντικός σχεδιασμός αλλά και δημιουργία περιβαλλοντικού προγράμματος.
- Συγγραφή ενημερωτικού υλικού περιβαλλοντικής διαχείρισης
- Συγγραφή εγχειριδίου πολιτικής το οποίο θα περιλαμβάνει πρόγραμμα, οδηγίες εργασίας και χρονοδιάγραμμα ώστε να τηρείται ανάλογο αρχείο.
- Εκπαίδευση και ενημέρωση προσωπικού.
- Εσωτερικές επιθεωρήσεις και ανίχνευση μη συμμορφώσεων και ανάληψη διορθωτικών ενεργειών. Μετά την δημιουργία και λειτουργία του συστήματος απαιτείται παρακολούθηση της σωστής λειτουργίας και μέτρησης των περιβαλλοντικών μεγεθών του ώστε να ανταποκρίνεται στους στόχους που έχουν τεθεί. Σε περίπτωση που παρουσιάζονται αποκλίσεις πρέπει να ορισθούν διορθωτικές ενέργειες αλλά και να τεθούν νέοι στόχοι.

Τα βασικά σημεία και προϋποθέσεις για τη βέλτιστη οργάνωση και λειτουργία ενός ΣΠΔ είναι τα παρακάτω:

1. Η πολυπλοκότητα του Συστήματος και οι πόροι που πρέπει να διατεθούν για την ολοκλήρωση του εξαρτώνται από το μέγεθος της επιχείρησης, το υφιστάμενο επίπεδο οργάνωσης της αλλά και τις δραστηριότητες της. Σε κάθε περίπτωση, η απλότητα του συστήματος και η ευκολία εφαρμογής του αποτελούν σημαντικούς παράγοντες επιτυχούς λειτουργίας του.
2. Η δέσμευση της διοίκησης ώστε να υποστηρίξει το σύστημα το οποίο θα έχει λειτουργικά έξοδα αλλά και πιθανές απαιτήσεις σε επενδύσεις, επομένως είναι αναγκαία η διάθεση πόρων.
3. Η ενεργή συμμετοχή και εκπαίδευση όλων, τόσο της διοίκησης όσο και των εργαζομένων.
4. Η συστηματική μεθοδολογία για την ολοκλήρωση, λειτουργία και παρακολούθηση του συστήματος.
5. Η συνειδητοποίηση ότι πρόκειται για μια συνεχή διαδικασία που ενσωματώνεται στην λειτουργία της επιχείρησης.
6. Η αποδοχή και συμμετοχή από τη διοίκηση και το προσωπικό.
7. Η θετική διάθεση.

8. Η αποτελεσματικότητα και προσπάθεια για συνεχή βελτίωση του συστήματος.
9. Η σωστή επιλογή συνεργατών και συμβούλων.
10. Η εμπιστοσύνη.

Τα γενικά οφέλη της εφαρμογής ενός ΣΠΔ παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Για τις επιχειρήσεις	<ol style="list-style-type: none"> 1. Βελτίωση οργάνωσης και εικόνας του ξενοδοχείου προς του καταναλωτές, τους εργαζόμενους και την τοπική κοινωνία και συνεπώς και η ανταγωνιστικότητα της. 2. Ελαχιστοποιούνται οι κυρώσεις από τη μη τήρηση της νομοθεσίας. 3. Επιτυγχάνεται η αποδοτικότερη χρήση της ενέργειας, του νερού, των υλικών με αποτέλεσμα να περιορίζεται το κόστος πόρων και διεργασιών. 4. Μειώνονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς και το κόστος επεξεργασίας και απόρριψης των λυμάτων. 5. Βελτιώνονται οι σχέσεις και οι συνεργασίες με τις τοπικές αρχές. 6. Παραδειγματίζονται οι άλλοι οργανισμοί, προμηθευτές και επιχειρήσεις που συνεργάζονται. 7. Υπάρχει ελεγχόμενη λειτουργία και βελτιστοποίηση στις διεργασίες. 8. Υποκινείται και αναβαθμίζεται το προσωπικό.
Για τους εργαζόμενους	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ενημέρωση και εκπαίδευση σε περιβαλλοντικά θέματα. 2. Βελτίωση των συνθηκών ασφαλείας και υγιεινής στους χώρους παραγωγής μέσω της μείωσης των ρύπων, των αποβλήτων και του θορύβου, δημιουργίας σχεδίων δράσης για έκτακτα περιστατικά. 3. Σαφής κατανομή αρμοδιοτήτων και υπευθυνοτήτων.
Για την κοινωνία	<ol style="list-style-type: none"> 1. Μειώνεται η ρύπανση του εδάφους. 2. Μειώνεται η χρήση φυσικών πόρων 3. Διασφαλίζεται η τήρηση της περιβαλλοντικής νομοθεσίας.

5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Στη βάση των προαναφερθέντων βασικών αξόνων, και σύμφωνα με τις απαιτήσεις των επιμέρους προτύπων, τα βασικά σημεία και οι προϋποθέσεις για τη βέλτιστη οργάνωση και λειτουργία ενός ΣΠΔ είναι οι παρακάτω:

Βήματα	Eco - LABEL	ISO 14001
	Κόστος	
Έλεγχος τήρησης των κριτηρίων – Προετοιμασία – Τελική υποβολή φακέλου	1000 € με έκπτωση της τάξης του 25% για μικρές και μικρομεσαίες επιχειρήσεις, και 75% για πολύ μικρές επιχειρήσεις (με προσωπικό έως 10 άτομα) ή ορεινά καταφύγια.	1174 € - 1760 € (καθώς ελάχιστα ξενοδοχεία έχουν προσωπικό κάτω από 10 άτομα και πάνω από 50)
	Δεν υπάρχει κόστος αίτησης, εναπόκειται στο μελετητή και στη λειτουργία της αγοράς	Είναι προκαθορισμένο το κόστος αίτησης και η προετοιμασία.
	Δεν υπάρχει καθορισμένο κόστος επαναξιολόγησης	Δεν υπάρχει καθορισμένο κόστος επαναξιολόγησης
Διατήρηση του σήματος	Το ετήσιο κόστος για τη διατήρηση του σήματος είναι 0,15% επί του	587 € - 807 € Συν τα έξοδα των επιθεωρητών τα

Eco-label	50% της ετήσιας αξίας των πωλήσεων και έχει ανώτατο όριο 25.000 και κατώτατο όριο 100 €. Τριετής ισχύς.	οποία είναι υπολογίσιμο μέγεθος. Διετής ισχύς.
Κριτήρια	Τα κριτήρια είναι 37 υποχρεωτικά και 54 προαιρετικά. Εάν πληρούνται τα κριτήρια του ISO 14001 τότε πληρείται ένας μεγάλος αριθμός προϋποθέσεων	Τα κριτήρια διαμορφώνονται ανάλογα με την επιχείρηση.

6. ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΝΟΣ ΣΠΑ

Επειδή δεν υπάρχουν ως τώρα δημοσιοποιημένα δεδομένα για την εξοικονόμηση ενέργειας μετά από την υιοθέτηση ενός σήματος οικολογικής πιστοποίησης, θεωρήθηκε απαραίτητο να γίνει πρόβλεψη της εξοικονόμησης ενέργειας λαμβάνοντας χωριστά τη μείωση της κατανάλωσης από κάθε παρέμβαση χωριστά. Θεωρώντας ως δεδομένο το στατιστικό μέγεθος της κατανάλωσης για μια συγκεκριμένη ξενοδοχειακή μονάδα, η οποία ανέρχεται σε 273 kWh/m² μετά από προσομοίωση αυτής τα αποτελέσματα είναι τα παρακάτω [13]:

No	Περιγραφή	Εξοικονόμηση ενέργειας
1	Διαφόρων ειδών θερμικών ηλιακών συστημάτων	650 kWh/m ² /έτος ➔ 19.8%
2	Διαφόρων ειδών θερμικών ηλιακών συστημάτων για θέρμανση πισίνας	535 kWh/m ² /έτος ➔ 16.3%
3	Φ/Β σύστημα	περίπου 18 τόνους πετρελαίου κίνησης
4	Εφαρμογή αισθητήρων κίνησης στα δωμάτια για έλεγχο κλιματισμού και φωτισμού	5% και 25-30%
5	Σύστημα ηλιακού κλιματισμού	4500 kWh/RT
6	Παθητικά συστήματα θέρμανσης έμμεσου κέρδους	25%
7	Θερμομόνωση	20%
8	Χρήση διπλών υαλοπινάκων με θερμοδιακοπή	6.1%
9	Βελτίωση της απόδοσης του συστήματος θέρμανσης	12.5%
10	Αντικατάσταση καυστήρα με νέο μεγαλύτερου βαθμού απόδοσης	30%
11	Αντικατάσταση συστημάτων κλιματισμού με κεντρικό σύστημα κλιματισμού	10%
12	Χρήση λαμπτήρων εξοικονόμησης ενέργειας	9%
13	Χρήση νυχτερινού αερισμού και ανεμιστήρων οροφής	4%
14	Συστήματα σκίασης (εφαρμογές στοιχείων βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής)	30%

Ωστόσο, οι παραπάνω παρεμβάσεις δεν πραγματοποιούνται όλες ταυτόχρονα, αλλά ούτε κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο για την πιστοποίηση της ξενοδοχειακής μονάδας. Πάρ' όλ' αυτά, η δυνατότητα εφαρμογής και η δυνατότητα πραγματοποίησης κάθε ενέργειας εξαρτάται από το έτος κατασκευή του κτιρίου, την κατηγορία (αστέρια) και το μέγεθος του ξενοδοχείου, την εποχιακή ή ετήσια λειτουργία του. Επιπλέον, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η κλίμακα των παρεμβάσεων που επιθυμείται να πραγματοποιηθούν αλλά και το διαθέσιμο ποσό για τέτοιες επεμβάσεις με βάση τον προϋπολογισμό κάθε επιχείρησης.

Στην πράξη, για μια περιοχή όπως η Κρήτη, με βάση δεδομένα του ΚΑΠΕ [13], έχουν εφαρμοστεί και προτιμούνται παρεμβάσεις που σχετίζονται με την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας όπως η χρήση Φ/Β συστημάτων και διαφόρων θερμικών ηλιακών συστημάτων. Επομένως, ο κατάλληλος συνδυασμός των παραπάνω μέτρων και παρεμβάσεων σε συνεργασία με τις οργανωτικές διαδικασίες που προστάζει ένα ΣΠΔ οδηγεί στην επίτευξη των ενεργειακών στόχων, που μπορεί να φτάσουν και να ξεπεράσουν το 50%, με έναν οικονομικώς αποδοτικό τρόπο [14, 15].

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή ενός ΣΠΔ από μια επιχείρηση δημιουργεί ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα για την επιχείρηση, πέραν της προφανούς συνεισφοράς στην προστασία του περιβάλλοντος. Ωστόσο, για να μπορέσει μια ξενοδοχειακή επιχείρηση να λάβει και να διατηρήσει το ΣΠΔ είναι αναγκαίο να διαθέσει οικονομικούς πόρους, αλλά να επενδύσει και στο ανθρώπινο δυναμικό της. Το κόστος, ή καλύτερα η επένδυση αυτή, εξαρτάται από την πολυπλοκότητα των διεργασιών της επιχείρησης καθώς από το επίπεδο και την ποιότητα της περιβαλλοντικής διαχείρισης που εφαρμόζεται ήδη. Παράλληλα, υπάρχουν και συνολικότερα προβλήματα, όπως η έλλειψη κατάλληλης πληροφόρησης και ευαισθητοποίησης, κυρίως εξαιτίας της έλλειψης σχετικών ενεργειών δημοσιότητας και προβολής, του οικολογικού σήματος ή το εν γένει χαμηλό επίπεδο έμπρακτης περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης στην Ελλάδα.

Υπάρχει επίσης ένα σημαντικό έλλειμμα ενημέρωσης του στελεχιακού δυναμικού των ξενοδοχειακών επιχειρήσεων, αλλά και του τεχνικού κόσμου, σε θέματα περιβαλλοντικής νομοθεσίας και τεχνολογιών προστασίας του περιβάλλοντος.

Λαμβάνοντας όλα αυτά υπόψη αποτελεί ιδιαίτερα αισιόδοξο μήνυμα το αυξανόμενο ενδιαφέρον για υιοθέτηση ενός ΣΠΔ, όπως αυτό εκδηλώνεται την τελευταία διετία.

Βέβαια, απαιτείται προσοχή τόσο στις βασικές αρχές εφαρμογής, όπως περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, όσο και στο να μην γίνεται σύγχυση του Ευρωπαϊκού Οικολογικού Σήματος με διάφορα άλλα εθνικά ή περιφερειακά οικολογικά σήματα που ισχύουν, καθώς μόνο στην Ευρώπη εκτιμάται ότι λειτουργούν περίπου 340 τέτοιου είδους σχήματα στον τομέα του τουρισμού.

Τέλος, απαιτείται σημαντική ερευνητική δουλειά ακόμη, ώστε να μπορέσει να συσχετιστεί τεκμηριωμένα η βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς μίας ξενοδοχειακής μονάδας μετά την υιοθέτηση ενός ΣΠΔ.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Hellastat A.E. (Ελληνική Εταιρεία Στατιστικών & Οικονομικών Πληροφοριών), <http://www.hellastat.eu/index.html>
- [2] Ινστιτούτο τουριστικών ερευνών και προβλέψεων (ΙΤΕΠ), www.itep.gr
- [3] Παγκόσμιος Οργανισμός Τουρισμού (UNWTO), <http://www.unwto.org/index.php>
- [4] Έρευνα Ευρωβαρόμετρου, http://ec.europa.eu/public_opinion/index_en.htm
- [5] Πανελλήνιος Ομοσπονδία Ξενοδόχων (ΠΟΞ), <http://www.hhf.gr/>
- [6] ISO 14001, <http://www.iso14000-iso14001-environmental-management.com/>
<http://www.hellastat.eu/>
- [7] ISO 14001 Guidance manual, National centre for environmental decision making, Technical report, 1998
- [8] Eric S.W. Chan; Simon C.K. Wong; Motivations for ISO 14001 in the hotel industry, Tourism Management 27 (2006) 481–492

- [9] GreenDrachma2, <http://www.greendrachma.gr/pilot/ecolabel.php>
- [10] Eco-Label, <http://www.ecolabel-tourism.eu/>
- [11] Eco-Label, <http://www.traintoecolabel.org/desktop.php?flang=gr&mode=accomodation>
- [12] Eco-Label, <http://www.minenv.gr/1/11/113/11307/g1130700.html>
- [14] ΚΑΠΕ, http://www.cres.gr/kape/ependytes/02_HOTRES_all.pdf
- [13] Santamouris M.; Balaras C.A.; Daskalaki E.; Argiriou A.; Energy conservation and retrofitting potential in Hellenic hotels, Energy and Buildings 24 (1996)
- [14] Papadopoulos A.M.; Papageorgiou P.K. ; Giama E.; Energy conservation in the hotel sector

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΜΙΑΣ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗΣ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥΣ ΜΕ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Χ. Κωστοπούλου¹, Δ. Αραβαντινός²

Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτιρίων,
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη,
τηλ.: 2310995794, φαξ: 2310995603,
ηλεκτρ. διεύθ.:¹christinakostopoulou@yahoo.com, ²demetre@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία εξετάζει τις ανάγκες σε θέρμανση και ψύξη μιας παραδοσιακής κατοικίας της Μακεδονίας για διαφορετικούς προσανατολισμούς των όψεών της, τόσο για την αρχική διαμόρφωσή της, όσο και μετά από μια σειρά ήπιων, απλών επεμβάσεων θερμικής μόνωσης του κελύφους της.

Η κατοικία που μελετάται βρίσκεται στην πόλη της Καστοριάς, όπου η πλειονότητα των αρχοντικών κατοικιών της περιόδου της τουρκοκρατίας κατασκευαζόταν κατά μήκος του βόρειου και του νότιου παραλίμνιου μετώπου της πόλης. Για την αξιοποίηση της θέας αλλά και την εξασφάλιση ιδιωτικότητας τα κτίρια εφοδιάζονταν με πλήθος ανοιγμάτων στην όψη προς τη λίμνη, ενώ η όψη προς το δρόμο διέθετε μικρότερο αριθμό ανοιγμάτων. Παράλληλα είναι ιστορικά καταγεγραμμένο ότι ανάμεσα στις επιμέρους στάθμες των κτιρίων γινόταν σαφής διάκριση των βοηθητικών από τους κύριους χώρους και επιπλέον οι χώροι διημέρευσης και διανυκτέρευσης των ενοίκων ήταν διαφορετικοί για την ψυχρή και για τη θερμή περίοδο του έτους.

Με δεδομένη την τυπολογία των όψεων, τα δομικά υλικά, την εφαρμοζόμενη οικοδομική τεχνολογία και την κατανομή των χρήσεων στους ορόφους, η εργασία διερευνά τις ενεργειακές ανάγκες της κατοικίας, εξετάζοντας αντιπαραβολικά τις περιπτώσεις χωροθέτησής της στους δύο κυρίαρχους διαθέσιμους προσανατολισμούς με βάση τη γεωμορφολογία της πόλης της Καστοριάς.

Στην ίδια κατεύθυνση εξετάζεται η διαμόρφωση του κελύφους με τα διαθέσιμα κατά την εποχή ανέγερσης υλικά στην υφιστάμενη κατασκευή και συγκριτικά με τη συμπεριφορά που παρουσιάζει μετά τη θερμική ενίσχυση επιμέρους δομικών στοιχείων, λαμβανομένων πάντοτε υπόψη των περιορισμών που επιβάλλει ο σεβασμός των μορφολογικών και τυπολογικών χαρακτηριστικών των ιστορικών κτιρίων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε πολλές περιοχές της βόρειας και της κεντρικής Ελλάδας εντοπίζονται ακόμη σήμερα δείγματα αρχοντικών κατοικιών, που ανεγέρθηκαν κατά τους όψιμους αιώνες της τουρκοκρατίας σύμφωνα με μια ενιαία, σε μεγάλο βαθμό, αρχιτεκτονική και κατασκευαστική τυπολογία. Πρόκειται για κτίσματα πολύωροφα, οι κατώτεροι όροφοι των οποίων δομούνται από λιθοδομή, ενώ οι ανώτεροι από τσατμά και μπαγδατί. Κατά κανόνα απαντώνται σε ορεινές ή ημιορεινές περιοχές με ψυχρούς χειμώνες και δροσερά καλοκαίρια.

Την παρούσα εργασία απασχόλησε ένα από τα αποκαλούμενα αρχοντικά της Καστοριάς, που διασώζονται ως σήμερα και σφραγίζουν τη φυσιογνωμία της πόλης. Πολλά από τα κτίρια αυτά έχουν δεχθεί επεμβάσεις συντήρησης και αποκατάστασης και φιλοξενούν ποικίλες χρήσεις, εντασσόμενα λειτουργικά στον αστικό ιστό. Το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά τους συνεπάγονται πολλές φορές επαχθείς δαπάνες συντήρησης και λειτουργίας. Στο πλαίσιο αυτό, και με δεδομένη τη διαρκώς εντεινόμενη απαίτηση για περιορισμό της κατανάλωσης

ενέργειας από τα κτίρια, η εργασία επιχειρεί αφενός να διερευνήσει την ενεργειακή συμπεριφορά της συγκεκριμένης παραδοσιακής κατοικίας και αφετέρου να εκτιμήσει τα οφέλη από την εφαρμογή σε αυτήν απλών, αναστρέψιμων οικοδομικών επεμβάσεων θερμικής προστασίας.

2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

2.1. Τα αρχοντικά της Καστοριάς και το κλίμα της πόλης

Η πόλη της Καστοριάς είναι χτισμένη στο λαιμό μιας χερσονήσου, που εισέρχεται στη λίμνη της Καστοριάς. Αναπτύσσεται επάνω σε ένα αμφικλινές τμήμα στεριάς, το οποίο καταλήγει στη λίμνη στο βόρειο και στο νότιο όριό του. Βρίσκεται σε υψόμετρο 660 μέτρων και το κλίμα της ανήκει στα ψυχρότερα της ελληνικής επικράτειας. Κατά τη διάρκεια του έτους αναφοράς η μέση μηνιαία τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κυμαίνεται από τους 1,8°C τον Ιανουάριο έως τους 22,1°C τον Ιούλιο, ενώ η μέση μηνιαία τιμή της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας κυμαίνεται από 57% τον Ιούλιο έως 80% το Φεβρουάριο. Το μέσο μηνιαίο βροχομετρικό ύψος φθάνει τα 62 mm.

Κατά μήκος της βόρειας και της νότιας όχθης χτίστηκαν κατά τους τελευταίους αιώνες της τουρκοκρατίας πολλές από τις κατοικίες των πλούσιων Τούρκων και Ελλήνων. Οι παλαιότερες από εκείνες που σώζονται μέχρι σήμερα ανάγονται στα μέσα του 18ου αιώνα. Διαθέτουν αυλές που παλαιότερα έφθαναν μέχρι την όχθη, προς την οποία έστρεφαν την κύρια όψη τους, ενώ η πρόσβαση στο κτίριο εξασφαλιζόταν από τις οδούς που, κατά την εποχή ανέγερσης, διέρχονταν από την οπίσθια όψη τους. Οι όψεις των σπιτιών είναι διαμορφωμένες σε μεγάλο βαθμό ως κλειστές και απρόσιτες για τους περαστικούς και –αντίθετα– εξωστρεφείς προς την προφυλαγμένη από αδιάκριτα βλέμματα αυλή, στην οποία άλλωστε επεκτείνονταν οι δραστηριότητες της οικογένειας.

Οι κατώτεροι όροφοι διέθεταν ελάχιστα παράθυρα, που στοιχειωδώς μόνον εξασφάλιζαν φυσικό φωτισμό και αερισμό, ενώ οι ανώτεροι είχαν πλήθος ανοιγμάτων από όλες τους τις όψεις, έτσι που το φως εισερχόταν άφθονο και διαχεόταν παντού. Στο ισόγειο στεγάζονταν βοηθητικοί χώροι και αποθήκες, ενώ στον ανώτερο όροφο φιλοξενούνταν τα καλοκαιρινά δωμάτια της οικογένειας. Ανάμεσα σε αυτές τις δύο στάθμες μεσολαβούν ακόμη ένας ή δύο όροφοι, που προορίζονταν για τα χειμωνιάτικα δωμάτια και τυχόν λοιπούς βοηθητικούς χώρους.

2.2. Το αρχοντικό του Τσιατσαπά

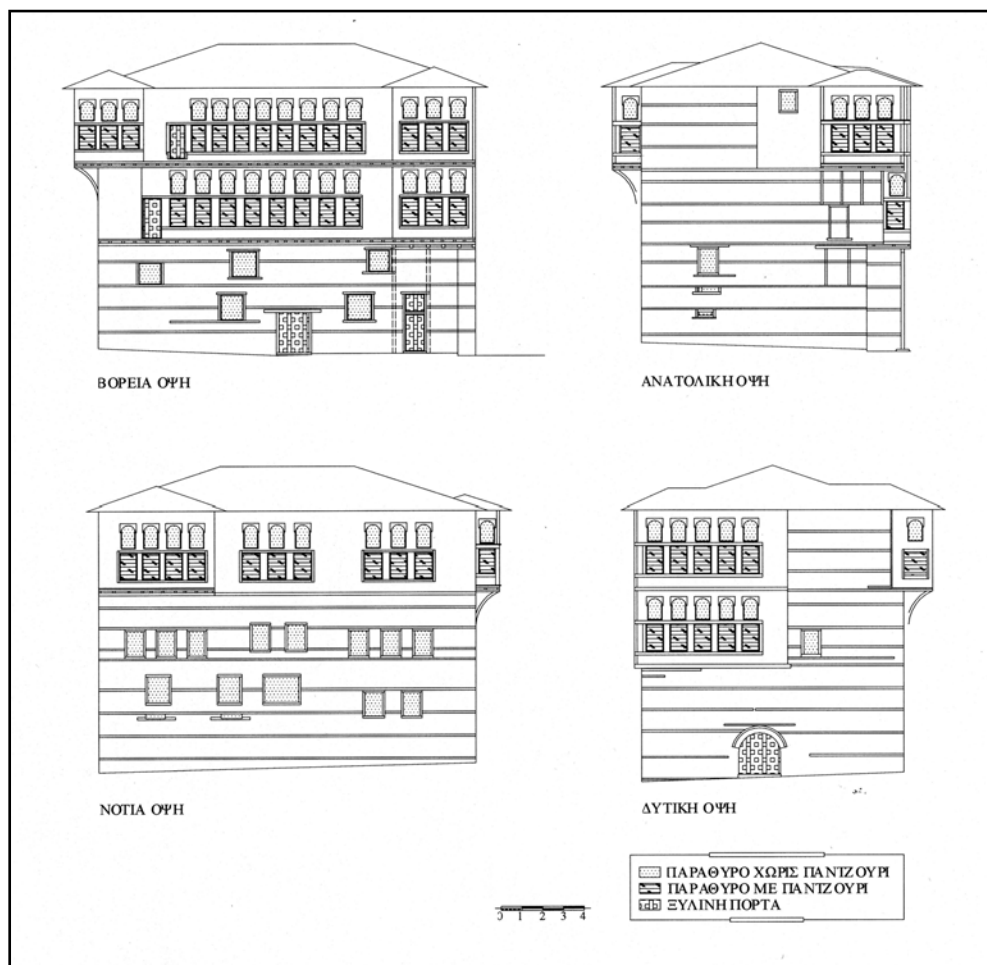
Το αρχοντικό του Τσιατσαπά είναι το παλαιότερο σωζόμενο αρχοντικό στην πόλη. Σε αγκωνάρι της ΝΔ γωνίας είναι χαραγμένη η χρονολογία 1754, έτος κατά το οποίο εκτιμάται από μελετητές [1] ότι το κτίριο επισκευάστηκε. Στα χρόνια που μεσολάβησαν η ιδιοκτησία του άλλαξε χέρια κατ' επανάληψη και διαδοχικές επεμβάσεις αλλοίωσαν την αρχική του διαμόρφωση. Σήμερα τελεί υπό καθεστώς αποκατάστασης.

Το αρχοντικό βρίσκεται στη βόρεια παραλία της Καστοριάς και διαρθρώνεται σε τέσσερις στάθμες (ισόγειο, μεσοπάτωμα, πρώτο και δεύτερο όροφο). Στο ισόγειο βρίσκονται αποθηκευτικοί χώροι και η εσωτερική, περίκλειστη αυλή με το κλιμακοστάσιο. Το μεσοπάτωμα διαιρείται στο μπροστινό, ενιαίο τμήμα, όπου βρίσκεται το κλιμακοστάσιο, και στο πίσω, που χωρίζεται περαιτέρω σε δωμάτια. Ο πρώτος όροφος διαθέτει τρεις «οντάδες» και το «δοξάτο». Σε όλο σχεδόν το μήκος της βορινής, κύριας όψης εκτείνεται ένας «ηλιακός». Αντίστοιχη είναι η διαρρύθμιση του δεύτερου ορόφου, ο οποίος διαθέτει επίσης έναν όμοιο «ηλιακό».

Οι δύο κατώτερες στάθμες είναι κατασκευασμένες αποκλειστικά από αργολιθοδομή μεγάλου πάχους (0,65 έως 0,85 m), επιχρισμένη στην εσωτερική πλευρά της. Ο πρώτος όροφος αποτελείται από ξυλόπηκτες τοιχοποιίες (τσατμάδες) στο μπροστινό τμήμα του (το βορινό) και από αργολιθοδομή στο πίσω (το νότιο). Τέλος, ο δεύτερος όροφος διαθέτει

κάποια μικρά τμήματα λιθοδομής στη δυτική και στην ανατολική όψη και στο εσωτερικό του και κατά τα άλλα διαμορφώνεται από τσατμάδες. Τα πατώματα που διαχωρίζουν τις στάθμες είναι ξύλινα, όπως και η οροφή κάτω από τη στέγη. Το δάπεδο του ισογείου είναι στρωμένο με φυσικές πλάκες στο μπροστινό τμήμα (της εσωτερικής αυλής), ενώ στους πίσω, βοηθητικούς χώρους διαμορφώνεται από πατημένο χώμα.

Οι δύο κατώτερες στάθμες διαθέτουν μικρή επιφάνεια ανοιγμάτων στο περίβλημά τους, τα οποία εντοπίζονται κυρίως στη βόρεια όψη, την απρόσιτη στα ξένα βλέμματα. Αντίθετα, στο περίβλημα των δύο ανώτερων ορόφων η επιφάνεια των ανοιγμάτων είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη, κυρίως στη βόρεια όψη αλλά και σε όλες τις υπόλοιπες (εικόνα 1). Τα ανοίγματα μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με το αν είναι εφοδιασμένα ή όχι με ξύλινο παντζούρι. Στα πρώτα (που σε πολλές περιπτώσεις μακεδονικών αρχοντικών δεν διέθεταν υαλοστάσιο) οι ένοικοι είχαν τη δυνατότητα να κλείνουν τα παντζούρια κατά τη διάρκεια της νύχτας για εξασφάλιση ιδιωτικότητας ή προστασίας, κατά τις ψυχρές περιόδους για αναχαίτιση του κρύου ή ακόμη κατά τη θερινή περίοδο για λόγους ηλιοπροστασίας.



Εικόνα 1. Οι τέσσερις όψεις του εξεταζόμενου κτιρίου.

2.3. Η προσομοίωση του κτιρίου

Η θερμική προσομοίωση έγινε με τη χρήση του προγράμματος Suncode-PC, στο περιβάλλον του οποίου δημιουργήθηκαν δύο ομοιώματα του κτιρίου. Το πρώτο (που στο εξής θα αποκαλείται χάριν συντομίας «βόρειο» μοντέλο) αναπαριστά τα γεωμετρικά και δομικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, όπως απαντώνται στην πραγματικότητα. Το δεύτερο (που αντίστοιχα θα αποκαλείται χάριν συντομίας «νότιο» μοντέλο) αναπαράγει την υπάρχουσα κατασκευή σε μια εικονική, υποθετική εκδοχή, η οποία προκύπτει από την

περιστροφή του κτιρίου κατά 180° γύρω από κατακόρυφο άξονα που διέρχεται από το γεωμετρικό του κέντρο. Στην περίπτωση αυτή η πραγματική βόρεια όψη μετατρέπεται σε νότια, αντίστοιχα η ανατολική σε δυτική κ.ο.κ.

Η δυαδική αυτή προσέγγιση αντανακλά την παρουσία παρόμοιων μεταξύ τους κτισμάτων κατά μήκος της βόρειας και της νότιας παραλίας της πόλης της Καστοριάς, τα οποία δομούνταν βάσει κοινής τυπολογίας, αλλά καλούνταν να λειτουργήσουν άλλοτε στον κατεξοχήν ευμενή προσανατολισμό (νότιο) και άλλοτε στον κατεξοχήν δυσμενή (βόρειο).

Κατόπιν τα ομοιώματα επανεπιλύθηκαν εμπλουτισμένα με επεμβάσεις που στοχεύουν στη θερμική προστασία του κελύφους. Κατά την ανάλυση τα εσωτερικά θερμικά κέρδη από την παρουσία και τη δραστηριότητα ενοίκων και από τη λειτουργία συσκευών δεν λήφθηκαν υπόψη, καθώς το κέλυφος μελετάται καθαυτό, ανεξάρτητα από την οποιαδήποτε χρήση πιθανώς θα του επιβαλλόταν.

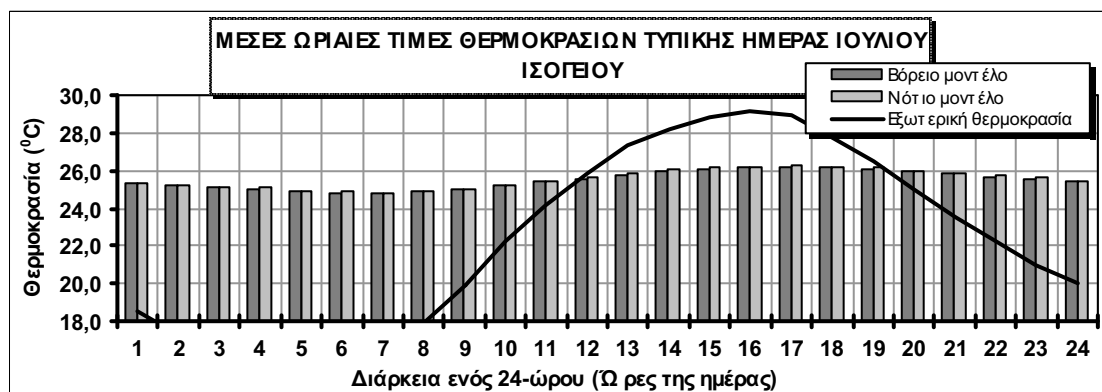
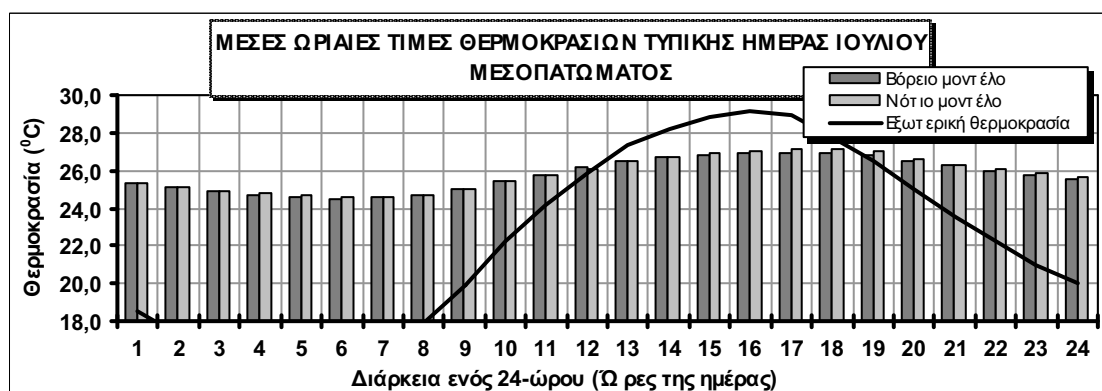
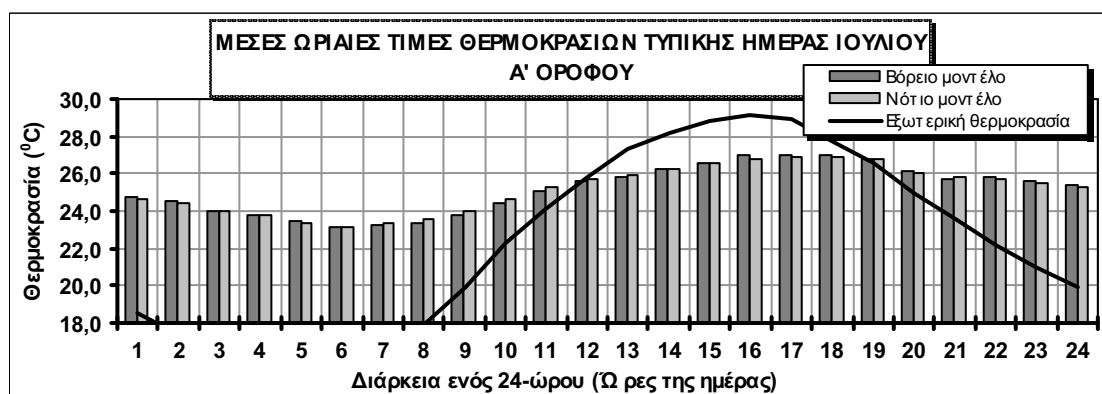
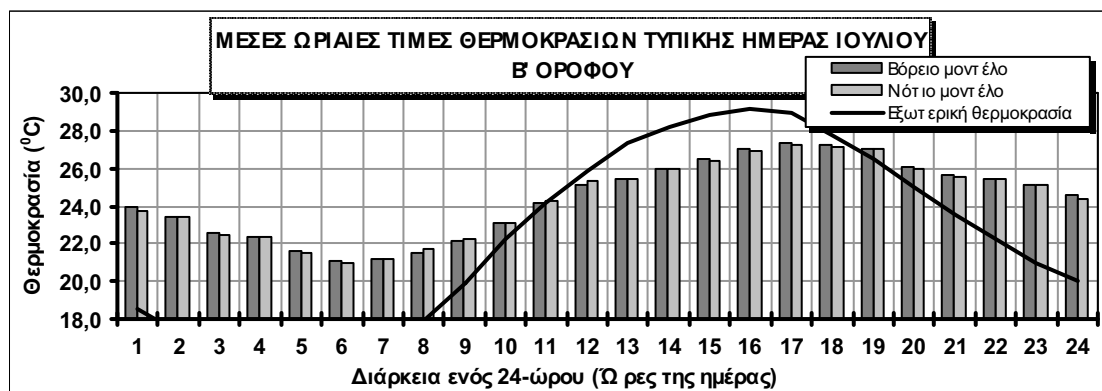
3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Από τη μελέτη της πορείας της θερμοκρασίας στη διάρκεια του 24-ώρου προκύπτει ότι αυτή παρουσιάζει κλιμακούμενη διακύμανση ημιτονοειδούς μορφής, που είναι μικρότερη στον κατώτερο όροφο και μεγαλύτερη στον ανώτερο. Έτσι, στο ισόγειο το εύρος μεταξύ μεγίστου και ελαχίστου δεν ξεπερνά τον 1°C , ενώ στο δεύτερο όροφο ανάλογα με την εποχή του έτους φθάνει τους 5 με 7°C . Ενδεικτικά, η πορεία της θερμοκρασίας σε κάθε όροφο και για τα δύο μοντέλα παρουσιάζεται για το μήνα Ιούλιο (που καταγράφεται ως ο θερμότερος κατά τη θερινή περίοδο) στα διαγράμματα της εικόνας 2.

Επιπλέον, από την ανάλυση διαπιστώνεται ότι συνολικά το κτίριο δεν αντιμετωπίζει πρόβλημα υπερθέρμανσης, ακόμη και κατά τα θερμότερα διαστήματα του έτους· γεγονός που αποδίδεται στο συνδυασμό του ψυχρού κλίματος της περιοχής με τη διαμόρφωση του κτιριακού κελύφους. Επομένως, η προσφυγή σε μηχανολογικό εξοπλισμό είναι απαραίτητη μόνο για τη θέρμανση των χώρων κατά τα ψυχρότερα διαστήματα του έτους και όχι για την ψύξη τους κατά τη θερινή περίοδο.

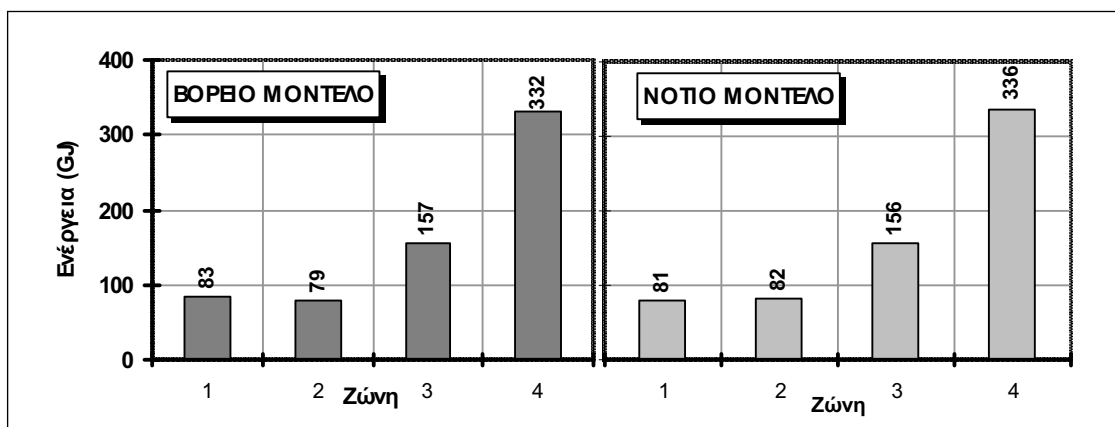
Η ετησίως απαιτούμενη ενέργεια θέρμανσης, προκειμένου να διατηρηθεί μια σταθερή θερμοκρασία γύρω στους 20°C κατά τη διάρκεια της ημέρας και 16°C κατά τη διάρκεια της νύχτας, κλιμακώνεται κατά όροφο ως εξής (εικόνα 3):

- Στο ισόγειο και στο μεσοπάτωμα οι καταναλώσεις ενέργειας για τη θέρμανση είναι πρακτικά ίσες μεταξύ τους και πολύ μικρότερες των απαιτούμενων για τη θέρμανση των υψηλότερων ορόφων. Αυτός είναι και ο λόγος που οι κάτω χώροι χρησιμοποιούνταν περισσότερο το χειμώνα, ενώ οι επάνω, που αποκαλούνταν και «καλοκαιρινοί», προσέλκυαν τις δραστηριότητες των ενοίκων περισσότερο κατά τους θερινούς μήνες.
- Για τη θέρμανση του πρώτου ορόφου απαιτείται περίπου διπλάσια κατανάλωση ενέργειας συγκριτικά με τους δύο υποκείμενους του. Η διαφορά που εντοπίζεται στα δαπανώμενα ποσά ενέργειας ερμηνεύεται από τις πολύ αυξημένες απώλειες θερμότητας από το περίβλημα του πρώτου ορόφου σε σχέση με εκείνα του ισογείου και του μεσοπατώματος, καθώς αυτό περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό ανοιγμάτων, δηλαδή περιοχών ιδιαίτερα μειωμένης αντίστασης θερμοπερατότητας. Εξάλλου, τα συμπαγή τμήματα του κελύφους στο ισόγειο και στο μεσοπάτωμα αποτελούνται εξ ολοκλήρου από παχιές λιθοδομές, οι οποίες χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα χαμηλό συντελεστή θερμοπερατότητας. Τέλος, οι διαφυγές αέρα που πραγματοποιούνται διαμέσου του κελύφους του πρώτου ορόφου είναι πολύ μεγαλύτερες από εκείνες που αντιστοιχούν στις δύο κατώτερες στάθμες.



Εικόνα 2. Ενδεικτικά διαγράμματα διακύμανσης της θερμοκρασίας αέρα κάθε ορόφου σε μία τυπική ημέρα της θερινής περιόδου.

- Στη στάθμη του δεύτερου ορόφου απαιτείται περισσότερη ενέργεια από ό,τι σ' εκείνη του πρώτου, και φυσικά πολύ περισσότερη από ό,τι σ' εκείνες του μεσοπατώματος και του ισογείου, προκειμένου να θερμανθεί στο ίδιο επίπεδο με αυτές. Συγκεκριμένα, και στις δύο περιπτώσεις η προσαύξηση ως προς την απαιτούμενη ενέργεια για τη θέρμανση του πρώτου ορόφου υπερβαίνει το 100%, αντιστοιχεί δηλαδή σε διπλασιασμό των αναγκαίων πρόσθετων θερμικών φορτίων. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην πολύ μεγαλύτερη εξωτερική επιφάνεια της στάθμης, η οποία μάλιστα συμπεριλαμβάνει την οροφή του κτιρίου, και στο διπλασιασμό του εμβαδού των ανοιγμάτων σε σχέση με του πρώτου ορόφου.



Εικόνα 3. Οι ενεργειακές καταναλώσεις κατ' όροφο στα δύο εξεταζόμενα μοντέλα (βόρειο και νότιο).

Όλα τα αποτελέσματα, τόσο αυτά που αφορούν σε τιμές θερμοκρασίας όσο και εκείνα που αναφέρονται σε απαιτούμενα ποσά ενέργειας θέρμανσης, δεν εμφανίζουν παρά ασήμαντες διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα δύο μοντέλα που εξετάστηκαν, το βόρειο και το νότιο. Η διαπίστωση αυτή ερμηνεύεται από τη δομή του κτιρίου, που σε μεγάλο βαθμό το απαλλάσσει από την ευαισθησία στον τυχόντα προσανατολισμό των όψεών του. Πράγματι, στο ισόγειο και στο μεσοπάτωμα, που χαρακτηρίζονται από τη μεγάλη θερμική αδράνεια του περιβλήματός τους και τη μηδαμινή επιφάνεια ανοιγμάτων, οι εσωκλιματικές συνθήκες ελάχιστα επηρεάζονται από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και κατά συνέπεια από τον προσανατολισμό του κτιρίου. Από την άλλη, για τον πρώτο και το δεύτερο όροφο καθοριστικό ρόλο αποδεικνύεται ότι διαδραματίζουν τα ανοίγματα του κελύφους. Η εκτεταμένη παρουσία τους σε όλες τις όψεις αφενός επιτρέπει την είσοδο ηλιακού φωτός από όλους τους προσανατολισμούς και αφετέρου καθιστά ευχερή το φυσικό αερισμό και δροσισμό, που μειώνουν την απαίτηση για ψυκτικά φορτία κατά τη θερινή περίοδο.

4. ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

4.1. Επιλογή των επεμβάσεων

Την κατεύθυνση των οικοδομικών επεμβάσεων για τη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου έδωσαν οι προσομοιωτικοί έλεγχοι που κατέγραψαν τα ενεργειακά του μεγέθη. Η επιλογή τους όμως είχε ως βασικό γνώμονα το σεβασμό του ιστορικού χαρακτήρα του κτιρίου και αυτό εκφράστηκε αφενός με τη διατήρηση των τυπολογικών και μορφολογικών του χαρακτηριστικών και αφετέρου με την αναστρεψιμότητα των επεμβάσεων και τη συμβατότητα των νέων υλικών με τα αρχικά.

Έτσι, από το σύνολο των οικοδομικών επεμβάσεων που εξετάστηκαν επιλέγησαν τελικά ως συμβατές, αναστρέψιμες και ταυτόχρονα αποτελεσματικές οι εξής:

- Η τοποθέτηση παπλώματος υαλοβάμβακα πάχους 10 cm επάνω από την οροφή του δεύτερου ορόφου (κάτω από τη στέγη). Η οροφή είναι υπεύθυνη για ένα μεγάλο μέρος

των απωλειών της ανώτερης στάθμης, καθώς ο αέρας έχει την ιδιότητα όταν θερμαίνεται να ανέρχεται σε υψηλότερα σημεία. Η επέμβαση αυτή πραγματοποιείται εύκολα, είναι αναστρέψιμη και δεν επηρεάζει τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά του κτιρίου ούτε εσωτερικά ούτε εξωτερικά.

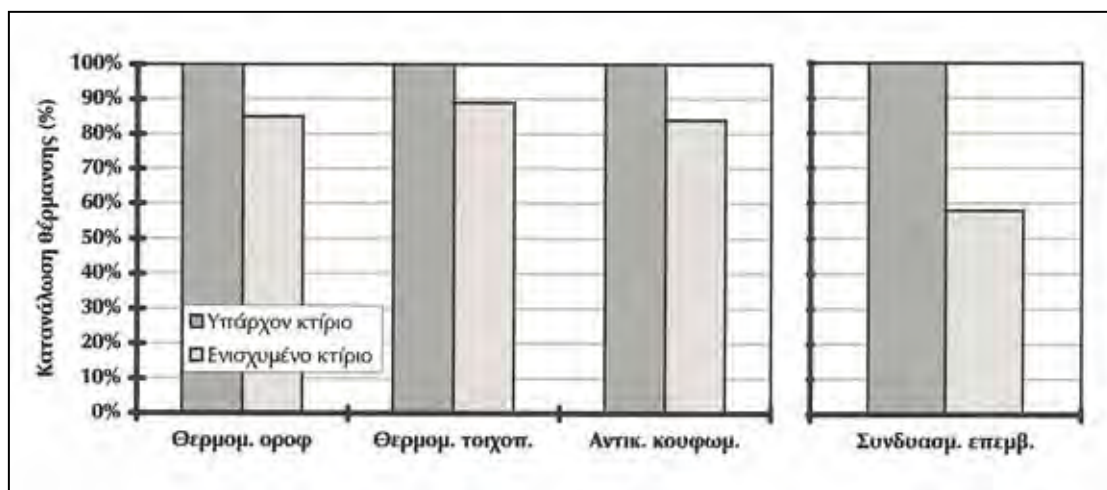
- Η τοποθέτηση πλακών υαλοβάμβακα πάχους 5 cm, καλυμμένων από γυψοσανίδα, στην εσωτερική παρειά των περιμετρικών τοίχων του ισογείου και του μεσοπατώματος. Η λύση αυτή δεν προτείνεται για τις ανώτερες στάθμες του κτιρίου, καθώς πολλές από τις κατοικίες αυτής της τυπολογίας διαθέτουν ζωγραφικό διάκοσμο στις τοιχοποιίες των ανώτερων, πιο περίτεχνων ορόφων και συνεπώς δεν επιδέχονται κάλυψη αυτών των επιφανειών με πρόσθετες οικοδομικές στρώσεις.
- Η αντικατάσταση των υπαρχόντων κουφωμάτων, με τους μονούς υαλοπίνακες, στα ανοίγματα εκείνα που διαθέτουν παντζούρια με νέα κουφώματα, όψης όμοιας με τα παλαιά, που φέρουν δίδυμους υαλοπίνακες. Η επέμβαση αυτή αποτελεί μία από τις συνηθέστερα εκτελούμενες οικοδομικές εργασίες στο πλαίσιο της συντήρησης ή της ανακαίνισης ενός υφιστάμενου κτιρίου. Από ενεργειακή άποψη, πέρα από τη μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας των ανοιγμάτων που προσφέρει, συμβάλλει επιπλέον στον περιορισμό των ακούσιων διαφυγών αέρα μέσα από τους αρμούς, καθώς τα καινούρια πλαίσια παρέχουν πολύ μεγαλύτερη αεροστεγανότητα σε σχέση με τα παλαιά.

4.2. Αξιολόγηση των επεμβάσεων

Η καθεμία από τις παραπάνω προτεινόμενες επεμβάσεις λειτουργεί συμπληρωματικά ως προς τις υπόλοιπες και συμβάλλει στον περιορισμό των διαφυγών θερμότητας προς το περιβάλλον μέσω επιμέρους δομικών στοιχείων.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιωτικών ελέγχων, που πραγματοποιήθηκαν για το υφιστάμενο κέλυφος και για τις διαδοχικές, θερμικά ενισχυμένες εκδοχές του, συνάγεται ότι (εικόνα 4):

- Η θερμική προστασία της οροφής του ανώτερου ορόφου περιορίζει σχεδόν κατά 30% την απαιτούμενη κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανσή του στο προκαθορισμένο επίπεδο θερμοκρασίας και αποδίδει εξοικονόμηση ενέργειας θέρμανσης για το σύνολο του κτιρίου της τάξης του 15%.
- Η θερμική προστασία των περιμετρικών τοιχοποιιών του ισογείου περιορίζει την απαιτούμενη ενέργεια θέρμανσης κατά 48% και του μεσοπατώματος κατά 43% . Επειδή, ωστόσο, οι δύο κατώτεροι όροφοι αποτελούν τους λιγότερο ενεργοβόρους του κτιρίου, η εξοικονόμηση ενέργειας που εξασφαλίζεται για το σύνολό του είναι της τάξης του 12%.
- Η εξοικονόμηση ενέργειας που εξασφαλίζεται με την αντικατάσταση των κουφωμάτων είναι σημαντικότερη στους ανώτερους ορόφους, στο περίβλημα των οποίων τα κουφώματα καταλαμβάνουν μεγαλύτερη επιφάνεια. Έτσι, αυτή ανέρχεται στα ποσοστά του 2,5% για τη στάθμη του ισογείου, του 6,0% για το μεσοπάτωμα και του 20,0% περίπου για τον πρώτο και το δεύτερο όροφο. Επειδή, όμως, οι ανώτεροι όροφοι είναι ούτως ή άλλως οι πλέον ενεργοβόροι του κτιρίου, η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας θέρμανσης που επιτυγχάνεται από την εφαρμογή του μέτρου ανέρχεται σε ποσοστό υψηλότερο του 15%.
- Η παράλληλη υιοθέτηση των τριών επεμβάσεων προσφέρει εξοικονόμηση της ετησίως απαιτούμενης ενέργειας θέρμανσης του κτιρίου που φθάνει το 42%.



Εικόνα 4. Η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης για καθεμία από τις προτεινόμενες επεμβάσεις και για τη συνδυασμένη εφαρμογή τους.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αντίθεση με τα σύγχρονα κτίρια, που σχεδιάζονται και οικοδομούνται πανομοιότυπα, αφηλώντας τα κατά τόπους κλιματικά και μικροκλιματικά δεδομένα, η παραδοσιακή αρχιτεκτονική βρίθει υποδειγμάτων προσαρμογής σε αυτά και αξιοποίησής τους. Όπως διαπιστώνεται από την ανάλυση που προηγήθηκε, οι αρχοντικές κατοικίες που κατασκευάστηκαν τους προηγούμενους αιώνες σε ψυχρές περιοχές της σημερινής ελληνικής επικράτειας ενσωμάτωναν χαρακτηριστικά που τους επέτρεπαν να προσαρμόζονται ακόμη και σε δυσμενείς προσανατολισμούς, δίχως να υποβαθμίζονται ενεργειακά. Με την αξιοποίηση δομικών υλικών που είναι σήμερα διαθέσιμα είναι δυνατόν τα παλαιά αυτά κτίρια να εξασφαλίσουν συνθήκες θερμικής άνεσης, χωρίς να υποστούν εκτεταμένες επεμβάσεις και χωρίς να απολέσουν τα διακριτικά μορφολογικά τους χαρακτηριστικά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Λάββας Γ. (συντονισμός) (1998), Ελληνική παραδοσιακή αρχιτεκτονική. Τόμος έβδομος: Μακεδονία Α', Αθήνα, Μέλισσα.
2. ASHRAE (1997), Handbook of Fundamentals, SI edition, Atlanta, U.S.A.
3. Λιβέρης Π., Αραβαντινός Δ., Παπαδόπουλος Α., Τσακίρης Ν. (1996), Οδηγός εξοικονόμησης ενέργειας στα δημόσια κτίρια, τεύχος προϊόντος ερευνητικού προγράμματος SAVE: Ανακαίνιση δημοσίων κτιρίων της Κεντρικής Μακεδονίας για τη βελτίωση της ενεργειακής τους συμπεριφοράς, Θεσσαλονίκη.

ΜΕΛΕΤΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Μ. Μ. Καρτέρης, Σ. Οξυζίδης, Μ. Μανταδάκης, Α. Μ. Παπαδόπουλος

Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,
54 124 Θεσσαλονίκη, ΤΘ 483, e-mail: marinos@aix.meng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το κυρίαρχο περιβαλλοντικό ζήτημα σήμερα είναι αυτό της κλιματικής αλλαγής. Βασική εξέλιξη που συντελεί σε αυτήν την αλλαγή είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο σχετίζεται άμεσα με την καύση ορυκτών καυσίμων. Το 24% των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, που αποτελεί προϊόν καύσης και ένα από τα σημαντικότερα αέρια του θερμοκηπίου, οφείλεται στην ανάγκη τροφοδότησης των κτιρίων με ενέργεια. Επιβάλλεται αφενός, λοιπόν, η αύξηση του βαθμού απόδοσης της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων, προκειμένου να σταθεροποιηθεί το κλίμα της γης και αφετέρου η μείωση της εξάρτησης των σύγχρονων κατοικιών από την ενέργεια που παράγεται από ορυκτά καύσιμα, που θα προκαλέσει μείωση της ζήτησης, η οποία με τη σειρά της θα επιφέρει και μείωση των τιμών των καυσίμων σε ολόκληρη την αγορά.

Στην παρούσα εργασία ερευνήθηκε η μελέτη, κατασκευή και απόδοση ενός κτιρίου μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας. Η ενεργειακή προσομοίωση του κτιρίου έγινε με τη χρήση του προγράμματος Energy Plus. Το κτίριο αυτό, το οποίο αποτελείται από δύο μονοκατοικίες (μεζονέτες), είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο, ως προς την ποιότητα των δομικών υλικών του, ώστε να μειώνονται στο ελάχιστο δυνατό οι απώλειες ενέργειας. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εγκαταστάθηκαν συστοιχίες φωτοβολταϊκών στοιχείων, ενώ για την κάλυψη των αναγκών σε θέρμανση και ψύξη, τοποθετήθηκε μία αντλία θερμότητας εδάφους.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μείωση της εξάρτησης των σύγχρονων κοινωνιών από την ενέργεια που παράγεται από ορυκτά καύσιμα επιβάλλεται, πέρα από τους περιβαλλοντικούς και από οικονομικούς λόγους, επειδή οι τιμές τους λόγω της αύξησης της ζήτησης σε συνδυασμό με τη μείωση της παραγωγής αυξάνονται με έντονους ρυθμούς. Κατά συνέπεια, η μείωση της ζήτησης θα επιφέρει, μεταξύ άλλων, και μείωση των τιμών σε ολόκληρη την αγορά. Στη σημερινή εποχή, που ο ρυθμός και η πυκνότητα δόμησης αυξάνονται, η κατασκευή κτιρίων που είναι σε θέση να παράγουν, ένα μεγάλο τμήμα της ενέργειας που χρειάζονται, ίσως μάλιστα και πλεόνασμα, αποτελεί ενδιαφέρουσα προοπτική και μπορεί να συνεισφέρει στην μείωση και λύση των προαναφερθέντων προβλημάτων. Σε αυτήν τη λογική εντάσσονται τα κτίρια μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας (ΚΜΚΕ), στα οποία παράγεται ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), τμήμα της οποίας πολλές φορές εγχέεται στο κεντρικό δίκτυο διανομής μετατρέποντας τα σε παραγωγούς ενέργειας.

Στην παρούσα εργασία ερευνήθηκε η κατασκευή ενός ΚΜΚΕ. Το κτίριο αυτό, το οποίο αποτελείται από δύο μονοκατοικίες συνεχούς δόμησης (μεζονέτες), είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο, ως προς την ποιότητα των δομικών υλικών του, ώστε να μειώνονται στο ελάχιστο δυνατό οι απώλειες ενέργειας. Αρχικά περιγράφηκαν οι γενικές αρχές σχετικά με το

σχεδιασμό ενός ΚΜΚΕ, ενώ στη συνέχεια σχεδιάστηκε το κτίριο αναφοράς, το οποίο προσομοιώθηκε, χρησιμοποιώντας το λογισμικό προσομοίωσης κτιρίων Energy Plus, θεωρώντας ότι για τη θέρμανση και το δροσισμό του κτιρίου χρησιμοποιείται γεωθερμική αντλία θερμότητας με ενδοδάπεδο σύστημα θέρμανσης και ψύξης, ενώ για την κάλυψη των ηλεκτρικών φορτίων, θεωρήθηκε ότι εγκαθίστανται φωτοβολταϊκές (ΦΒ) συστοιχίες στη στέγη και στις επιφάνειες σκίασης του κτιρίου. Τα αποτελέσματα της έρευνας σχετίζονται αρχικά με το κτίριο αναφοράς, στη συνέχεια θεωρούνται στο κτίριο εγκατεστημένα τα ΦΒ πλαίσια και τελικά το κτίριο προσομοιώνεται μετά το πέρας του συνόλου των παρεμβάσεων, δηλαδή μετά την τοποθέτηση και της αντλίας θερμότητας εδάφους. Τέλος, αξιολογήθηκε η οικονομική σκοπιμότητα των παρεμβάσεων στο κτίριο σε σύγκριση με το κτίριο αναφοράς, και στη βάση αυτή διαμορφώθηκαν τα τελικά συμπεράσματα.

2. ΚΤΙΡΙΑ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ως ΚΜΚΕ μπορεί κανείς να θεωρήσει μια ιδιωτική κατοικία ή ένα εμπορικό κτίριο με σημαντικά μειωμένες ενεργειακές ανάγκες, καθώς οι απαιτήσεις σε ενέργεια μπορούν να καλυφθούν μέσω της εκμετάλλευσης ΑΠΕ. Στην ακραία περίπτωση ένα ΚΜΚΕ παράγει αρκετή ενέργεια ώστε να καλύπτει ή και να υπερκαλύπτει τις ετήσιες ανάγκες του. Όταν η παραγόμενη ενέργεια δεν αρκεί για την κάλυψη των αναγκών το έλλειμμα καλύπτεται μέσω της χρήσης συμβατικών πηγών ενέργειας, ενώ, αντίστοιχα, όταν η παραγόμενη υπερκαλύπτει τις ανάγκες το πλεόνασμα διοχετεύεται στο δίκτυο διανομής [1].

Υπάρχει ένα εύρος τεχνολογιών στον τομέα των ΑΠΕ που είναι διαθέσιμες για τα ΚΜΚΕ. Τυπικά παραδείγματα αποτελούν τα φωτοβολταϊκά, οι θερμικοί ηλιακοί συλλέκτες, οι μικρές ανεμογεννήτριες, οι μικρές υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις και οι μονάδες καύσης βιοκαυσίμων. Γενικά επιλέγονται τεχνολογίες που μπορούν να εφαρμοστούν εντός των ορίων του οικοπέδου του κτιρίου. Σχετικά με το βιοκλιματικό σχεδιασμό ενός ΚΜΚΕ, η εφαρμογή τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας (ΕΞΕ) συνιστά απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχή ενσωμάτωση τεχνολογιών ΑΠΕ στα κτίρια. Η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου επιτυγχάνεται αρχικά μέσω του βιοκλιματικού αρχιτεκτονικού σχεδιασμού του, αξιοποιώντας τις τοπικές κλιματικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους για θέρμανση - ψύξη και φωτισμό, σε συνδυασμό με τη μείωση των ενεργειακών καταναλώσεων συσκευών και λαμπτήρων στο κτίριο. Ο κατάλληλος συνδυασμός προσανατολισμού, χωροθέτησης των δωματίων, θέσης των ανοιγμάτων και θερμικής προστασίας του κελύφους δημιουργεί συνθήκες θερμικής και οπτικής άνεσης και περιορίζει τις απαιτήσεις για θέρμανση και ψύξη με αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Τέλος, καθοριστική σημασία έχει η ενεργειακή συμπεριφορά του χρήστη, η οποία μπορεί να μειώσει σημαντικά τα θερμικά φορτία με τον ενεργό αερισμό και τη χρήση των διατάξεων ηλιοπροστασίας, αλλά και με τον εύλογο περιορισμό των καταναλώσεων σε ηλεκτρικές συσκευές, τεχνητό φωτισμό κλπ, με μηδενικό κόστος [2].

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Η δυνατότητα κατασκευής ενός ρεαλιστικού, «συμβατικού» ΚΜΚΕ αποτέλεσε πρωταρχικό ζητούμενο. Το κτίριο (εικόνα 1), το οποίο θεωρήθηκε ότι βρίσκεται σε αστικό δομημένο περιβάλλον και ο προσανατολισμός του είναι νότιος, αποτελείται από δυο τριώροφες μεζονέτες. Έχει θερμομονωθεί με τη λύση του ολοκληρωμένου συστήματος εξωτερικής θερμομόνωσης, με εφαρμογή θερμομονωτικού υλικού πάχους 100 mm σε όλα τα δομικά στοιχεία, καθώς η απαίτηση ήταν το κτίριο να εμφανίζει τα ελάχιστα δυνατά θερμικά και ψυκτικά φορτία. Στον πίνακα 1 καταγράφονται οι συντελεστές θερμοπερατότητας όλων των

εξωτερικών δομικών στοιχείων. Ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας του κτιρίου ανέρχεται σε $0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Παρατηρείται ότι τόσο τα επιμέρους δομικά στοιχεία όσο και το κτίριο εν γένει εμφανίζουν αισθητά μεγαλύτερους συντελεστές θερμοπερατότητας από αντίστοιχα κτίρια που καταγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Αυτό έγινε γιατί θεωρήθηκε πως δεν έπρεπε η κατασκευή να είναι εντελώς ξένη από την κατασκευαστική πρακτική στην Ελλάδα.

Η ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου διερευνήθηκε με το πρόγραμμα προσομοίωσης Energy Plus, έκδοση 2.1.0. [3]



Εικόνα 1: Το κτίριο αναφοράς

Πίνακας 1: Συντελεστές θερμοπερατότητας εξωτερικών δομικών στοιχείων	
Δομικό στοιχείο	Θερμοπερατότητα [$\text{W/m}^2\text{K}$]
Αντεστραμμένο δώμα	0.2684
Επικλινής πλάκα σκυροδέματος με κεραμίδια	0.2887
Δάπεδο πάνω από έδαφος	0.3541
Εξωτερική τοιχοποιία από οπτόπλινθο	0.3179
Εξωτερικά δοκάρια	0.3214
Εξωτερικά υποστυλώματα	0.3214
Εξωτερικά τοιχεία	0.3319
Δάπεδο πάνω από έδαφος με σωληνώσεις νερού	0.2443

Σε ό,τι αφορά στα ανοίγματα, έχουν τοποθετηθεί παντού παράθυρα και μπαλκονόπορτες με διπλούς υαλοπίνακες ενεργειακής κλάσης A (θερμοπερατότητας ίσης με $1.771 \text{ W/m}^2\text{K}$) με διάκενα αέρα και συνθετικά πλαίσια. Η σκίαση των διάφανων στοιχείων του κτιρίου πέρα από τα σταθερά σκίαστρα, πραγματοποιείται με εξωτερικά στόρια. Σχετικά με το αερισμό, ο ακούσιος αερισμός, κατ' αρχήν επιτυγχάνεται από τις χαραμάδες των παραθύρων και των θυρών και από το άνοιγμα και κλείσιμο των θυρών κατά την είσοδο και έξοδο των ανθρώπων από το κτίριο. Ο εκούσιος αερισμός επιτυγχάνεται με το άνοιγμα των παραθύρων ή με μηχανικό εξαερισμό όταν ο χώρος δεν έχει παράθυρα ή όταν υπάρχει συσκευή εξαερισμού όπως ο απορροφητήρας της κουζίνας. Να σημειωθεί ότι τέθηκαν κάποιοι πρόσθετοι λειτουργικοί περιορισμοί σχετικά με τον εκούσιο αερισμό σε σχέση με τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες (ταχύτητα αέρα, θερμοκρασία) και στις εσωτερικές συνθήκες άνεσης (θερμοκρασία αέρα).

Αναφερόμενοι στα εσωτερικά κέρδη από την κατοίκηση, το φωτισμό και τις συσκευές διαφόρων τύπων, το Energy Plus προσφέρει τη δυνατότητα στο χρήστη να υπολογίσει τα εσωτερικά φορτία από την ανθρώπινη παρουσία, το φωτισμό και τη λειτουργία των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών. Γενικά, υιοθετήθηκε η λογική πως κατά τη διάρκεια της ημέρας οι συσκευές χρησιμοποιούνται ανάλογα με την παρουσία ανθρώπων στο

χώρο στον οποίο βρίσκονται. Για τον τεχνητό φωτισμό χρησιμοποιήθηκε ένας συντελεστής χρήσης που σχετίζεται με την εποχή, την ώρα της ημέρας και το αν η τελευταία είναι καθημερινή ή αργία.

Σχετικά με τα συστήματα θέρμανσης, ψύξης και αερισμού, η θέρμανση του κτιρίου πραγματοποιείται με σύστημα κεντρικής θέρμανσης με λέβητα φυσικού αερίου και η διανομή της θερμότητας (ζεστό νερό) επιτυγχάνεται με ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης. Αναφορικά με το σύστημα ψύξης στο καθιστικό και στο γραφείο κάθε διαμερίσματος καθώς και στα τρία υπνοδωμάτια έχουν τοποθετηθεί διαιρούμενες κλιματιστικές μονάδες. Για τη θέρμανση ζεστού νερού χρήσης υπάρχουν δύο (ένας για κάθε κατοικία) θερμοσίφωνες διπλής ενέργειας (boilers).

Σε ό,τι αφορά στις συνθήκες προσομοίωσης, το κτίριο αναφοράς προσομοιώθηκε για την περιοχή της Θεσσαλονίκης. Τα κλιματικά δεδομένα προήλθαν από το μετεωρολογικό σταθμό του αεροδρομίου στη Μίκρα (γεωγραφικό πλάτος $40^{\circ} 31'$, γεωγραφικό μήκος $22^{\circ} 58'$, υψόμετρο 4 m). Για τον προσδιορισμό των ρύπων από κάθε σύστημα χρησιμοποιήθηκαν σχετικοί συντελεστές εκπομπής ρύπων για κάθε καύσιμο. Οι τιμές των κλιματικών δεδομένων υιοθετήθηκαν από τις σχετικές βιβλιοθήκες του Energy Plus. Για τις εκπομπές ρύπων κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας λήφθηκε υπόψη το ποσοστό συνεισφοράς κάθε καυσίμου στην ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του Ελληνικού ηπειρωτικού διασυνδεδεμένου συστήματος σύμφωνα με δημοσιευμένα στοιχεία για το έτος 2005.

4. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΤΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Στην παρούσα έρευνα, ο λέβητας φυσικού αερίου και τα κλιματιστικά διαιρούμενου τύπου αντικαθίστανται από γεωθερμική αντλία θερμότητας νερού – νερού κλειστού κύκλου (closed loop systems). Για τη θέρμανση ζεστού νερού χρήσης διατηρούνται οι δύο (ένας για κάθε κατοικία) θερμοσίφωνες διπλής ενέργειας (boilers).

Στο σύστημα αντλίας θερμότητας εδάφους κλειστού κύκλου, ένα δευτερεύον υγρό, κυκλοφορεί σε μια διάταξη σωληνώσεων σε κλειστό κύκλωμα και μεταφέρει θερμότητα από και προς το έδαφος. Η διάταξη αυτή αποτελεί το γεωεναλλάκτη. Η εναλλαγή θερμότητας ανάμεσα στο ρευστό που κυκλοφορεί στον γεωεναλλάκτη και στο ψυκτικό ρευστό της αντλίας θερμότητας, γίνεται στον εναλλάκτη της αντλίας θερμότητας. Σε ό,τι αφορά την κατασκευή του δικτύου γεωεναλλάκτη, εγκαθίστανται κατακόρυφο δίκτυο, όπου ο γεωεναλλάκτης υλοποιείται με την διάνοιξη κατακόρυφου φρέατος μέσω γεωτρήσεων. Ειδικότερα, στο Energy Plus η απόκριση του γεωεναλλάκτη καθορίζεται με τη μέθοδο των εξισώσεων G (G-functions) [4]. Οι τιμές των εξισώσεων G εξαρτώνται από τον αριθμό των γεωτρήσεων, τη θερμική τους αντίσταση και τη γεωμετρική τους διάταξη. Τέλος, σχετικά με την εσωτερική εγκατάσταση θέρμανσης/ψύξης, διατηρείται το ενδοδαπέδιο σύστημα του κτιρίου αναφοράς.

5. ΚΑΛΥΨΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

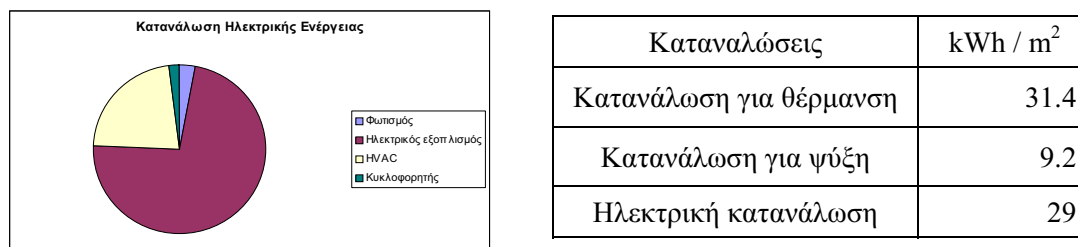
Τα ΦΒ πλαίσια, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της προσομοίωσης είναι 'υβριδικού' τύπου, τα οποία αποτελούνται από ένα κεντρικό στρώμα μονοκρυσταλλικού πυριτίου περιβαλλόμενο από ένα λεπτό στρώμα άμορφου πυριτίου. Χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση (16.1%) μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και μεγαλύτερη απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες σε σχέση με τα συμβατικά μονοκρυσταλλικά ΦΒ πλαίσια. Σε ό,τι αφορά στους αντιστροφείς του συστήματος, χρησιμοποιήθηκαν γερμανικής προέλευσης με βέλτιστο βαθμό απόδοσης ίσο με 96.1%. Ο συνολικός αριθμός των πλαισίων

που τοποθετήθηκαν στο κτίριο είναι 90, σε νότιες επιφάνειες με κλίση 30°, ιδανική για τον βορειοελλαδικό χώρο. Η συνολική ονομαστική ισχύς των ΦΒ είναι 17.1 kW και η συνολική έκταση που καταλαμβάνουν 108 m². Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν τρεις αντιστροφείς, που συνδέονται σε διαφορετική φάση του δικτύου με κοινή γείωση και ουδέτερο. Σε κάθε αντιστροφέα συνδέονται 5 παράλληλες σειρές των 6 ΦΒ πλαισίων, ώστε σε κάθε φάση να προσδίδεται η ίδια παραγόμενη ισχύς, δηλαδή 5.7 kW.

Το Energy Plus προσφέρει τρεις διαφορετικές επιλογές - μοντέλα για την πρόβλεψη των παραγόμενων ποσών ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά. Στην παρούσα εφαρμογή έγινε χρήση της επιλογής, με την ονομασία «Sandia», όπου γίνεται χρήση μεγάλου αριθμού εμπειρικών συντελεστών, που προέκυψαν μετά από έρευνες, που πραγματοποιήθηκαν στο «Sandia National Lab». Η κάλυψη των ηλεκτρικών φορτίων του κτιρίου επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ΦΒ συστοιχιών στην νότια όψη και των δύο μεζονετών πάνω στα σταθερά σκίαστρα και στην κεκλιμένη οροφή που επικαλύπτεται από κεραμίδια.

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ - ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Τα αποτελέσματα της έρευνας σχετίζονται, αρχικά, με το κτίριο αναφοράς, ενώ στη συνέχεια στο κτίριο θεωρούνται εγκατεστημένα τα ΦΒ πλαίσια και τελικά το κτίριο προσομοιώνεται μετά το πέρας του συνόλου των παρεμβάσεων, δηλαδή μετά την τοποθέτηση και της αντλίας θερμότητας εδάφους. Στην εικόνα 2 απεικονίζεται η κατανομή της συνολικής ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και οι ανηγμένες (ανά m²) καταναλώσεις ενέργειας για θέρμανση, ψύξη και η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση. Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας καταναλώνεται από τον ηλεκτρικό εξοπλισμό των κατοικιών. Οι συγκεκριμένες κατοικίες θεωρούνται κατοικίες οικογενειών υψηλότερου εισοδήματος, και κατά συνέπεια είναι εξοπλισμένες με μεγάλο αριθμό ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών.

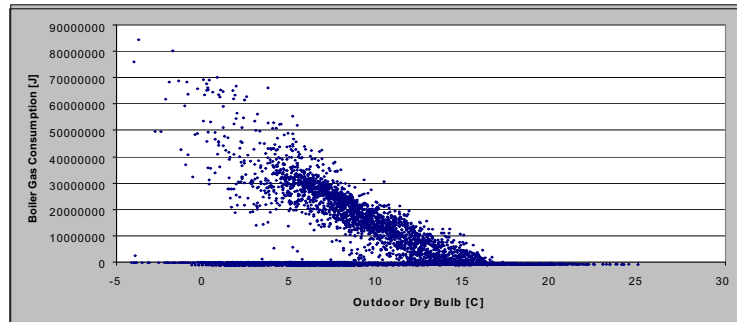


Εικόνα 2: Καταναλώσεις κτιρίου αναφοράς

Στην εικόνα 3 παρατίθεται το διάγραμμα κατανάλωσης φυσικού αερίου για θέρμανση συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας. Παρατηρείται μια πληθώρα πολύ χαμηλών και μηδενικών τιμών κατανάλωσης για χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες. Η ιδιομορφία αυτή του διαγράμματος οφείλεται στο ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης του κτιρίου. Το σύστημα αυτό χαρακτηρίζεται από μεγάλες τιμές θερμοχωρητικότητας με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η διατήρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας των χώρων του κτιρίου σε επιτρεπτά επίπεδα για αρκετή ώρα μετά την παύση λειτουργίας του καυστήρα. Ωστόσο, το σύστημα κλιματισμού των χώρων είναι πολύ πιο ευαίσθητο και αποκρίνεται άμεσα στις μεταβολές στις μεταβολές της εξωτερικής θερμοκρασίας, σε σχέση με το σύστημα θέρμανσης.

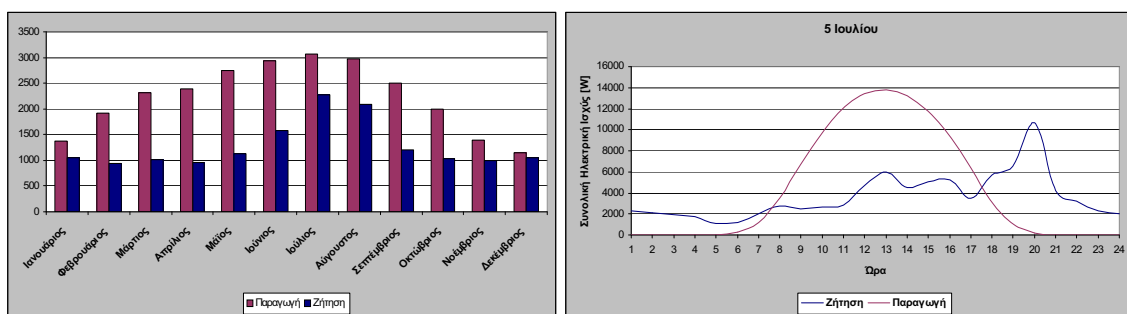
Στο ραβδόγραμμα της εικόνας 4 παρουσιάζεται η παραγόμενη μηνιαία ηλεκτρική ενέργεια από τα ΦΒ και η καταναλισκόμενη στο κτίριο ενέργεια, καθώς και το ημερήσιο προφίλ παραγωγής -ζήτησης για τις 5 Ιουλίου. Η συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια ανέρχεται στις 26,754 kWh ενώ η ζητούμενη στις 15,350 kWh. Από το διάγραμμα είναι εμφανές ότι η

παραγωγή κάθε μήνα υπερβαίνει τη ζήτηση. Η καμπύλη παραγόμενης ενέργειας από τα ΦΒ, είναι καμπανοειδούς μορφής με μέγιστο γύρω στις 1 το μεσημέρι. Τις ώρες που δεν ηλιάζονται τα ΦΒ, φυσικά δεν παράγουν. Τους καλοκαιρινούς μήνες που η μέρα είναι μεγαλύτερη το εύρος ωρών παραγωγής είναι μεγαλύτερο. Η καμπύλη της ζήτησης παρουσιάζει αυτή τη μορφή λόγω των δραστηριοτήτων των ενοίκων, όπως αυτές έχουν καταχωρηθεί στο Energy Plus.



Εικόνα 3: Καταναλώσεις θέρμανσης σε σχέση με την εξωτερική θερμοκρασία

Στην εικόνα 5 παρουσιάζεται η συνολική ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, μετά την τοποθέτηση της αντλίας θερμότητας εδάφους, και πως αυτή κατανέμεται στα επιμέρους ηλεκτρικά συστήματα του κτιρίου. Η καταναλισκόμενη αυξήθηκε στις 22,609.31 kWh ετησίως, οπότε και το συνολικό μηνιαίο ισοζύγιο σε σχέση με το προηγούμενο κτίριο έχει αλλάξει κατά πολύ. Παρόλο που η συνολική ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια παραμένει μεγαλύτερη από τη ζητούμενη, μηνιαία δεν συμβαίνει πλέον το ίδιο κατά τη διάρκεια του έτους. Τους χειμερινούς μήνες, από τον Νοέμβριο μέχρι τον Ιανουάριο, η ζήτηση υπερβαίνει την παραγωγή λόγω κύρια της κάλυψης των θερμικών φορτίων των χώρων με κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στη γεωθερμική αντλία θερμότητας.



Εικόνα 4: Μηνιαία και ημερήσια παραγωγή – ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας

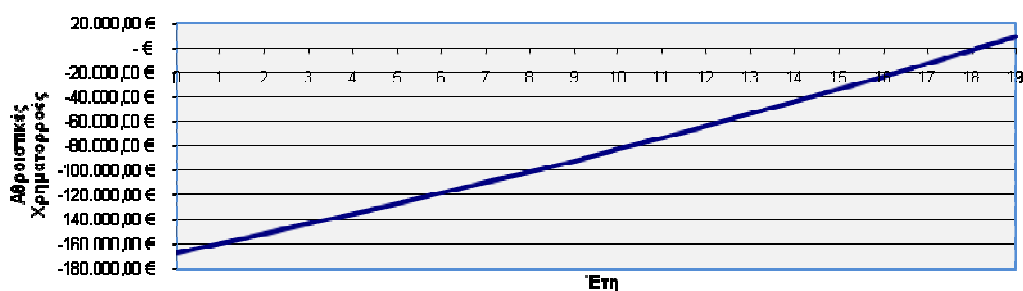


Καταναλώσεις	kWh / m ²
Κατανάλωση για θέρμανση	12.7
Κατανάλωση για ψύξη	6.7
Συνολική ηλεκτρική κατανάλωση	43.85

Εικόνα 5: Καταναλώσεις κτιρίου μετά την εγκατάσταση της αντλίας θερμότητας

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, τέλος, αξιολογήθηκαν, ως προς την οικονομική τους σκοπιμότητα, η αγορά και εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών και της αντλίας θερμότητας εδάφους στο κτίριο αναφοράς. Τα στοιχεία κόστος εγκατάστασης προέκυψαν από έρευνα αγοράς, ενώ σαν έσοδα θεωρήθηκαν η αντικατάσταση του λέβητα αερίου και των κλιματιστικών. Σε ότι αφορά τα υπόλοιπα οικονομικά δεδομένα της αξιολόγησης, λήφθηκε χρονικός ορίζοντας αξιολόγησης ίσος με 20 έτη, με βάση τη βασική σύμβαση αγοροπωλησίας ηλεκτρικής ενέργειας που υπογράφεται με το Διαχειριστή του δικτύου (ΔΕΣΜΗΕ), για 20 έτη. Το κόστος κεφαλαίου της επένδυσης θεωρείται ίσο με 6%, ενώ ο πληθωρισμός λαμβάνεται ίσος με 3%. Περαιτέρω, για την εκτίμηση της εξοικονόμησης ενέργειας, η τιμή του φυσικού αερίου λαμβάνεται σύμφωνα με το τιμολόγιο T2 της Εταιρίας Παροχής Αερίου Θεσ/νίκης (ΕΠΑΘ) για καταναλώσεις έως 33,145 kWh. Σε ό,τι αφορά στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνεται υπόψη το κλιμακούμενο τετραμηνιαίο τιμολόγιο (τιμολόγιο Γ1) οικιακής χρήσης για τριφασική παροχή της ΔΕΗ για την οικονομική αξιολόγηση των παρεμβάσεων. Σαν σενάριο αξιολόγησης θεωρήθηκε ότι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται κατά 7%, ενώ του φυσικού αερίου κατά 8.5%, συμπεριλαμβανομένου του πληθωρισμού.

Με βάση τα αποτελέσματα της οικονομικής αξιολόγησης (εικόνα 6), η συγκεκριμένη επένδυση αποδεικνύεται ασύμφορη. Ωστόσο, δεδομένου ότι λήφθηκε υπόψη μικρός χρονικός ορίζοντας για την αξιολόγηση ίσος με 20 έτη, τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορούν να θεωρηθούν απολύτως λογικά. Ένας χρονικός ορίζοντας για την αξιολόγηση παρεμβάσεων σε κτίριο, μπορεί να θεωρηθούν τα 50 χρόνια, που αποτελούν και την τυπική διάρκεια ζωής ενός κτιρίου. Εξάλλου και τα ΦΒ πλαίσια έχουν διάρκεια ζωής ίση με 30 χρόνια. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε περιπτώσεις οικονομικής αξιολόγησης παρεμβάσεων σε κτίρια, όπως η παρούσα, η οικονομική σκοπιμότητα δεν αποτελεί το πρώτο κριτήριο για την υλοποίηση των παρεμβάσεων.



ΚΠΑ	8,794.58 €
Εσωτερικό επιτόκιο απόδοσης (IRR)	6.49%
Year to positive cash flow	19

Εικόνα 6: Αποτελέσματα οικονομικής αξιολόγησης

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο αντικειμενικός σκοπός της έρευνας ήταν η προσομοίωση αρχικά ενός κτιρίου δύο μεζονετών στη Θεσσαλονίκη και, στη συνέχεια, η προσομοίωση της χρήσης αντλίας θερμότητας εδάφους και ΦΒ πλαισίων για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου, με στόχο την μετατροπή του σε κτίριο μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας. Ο

σχεδιασμός του κτιρίου των μεζονετών, από ενεργειακής άποψης, είναι «αυστηρός» με αποτέλεσμα οι απώλειες να περιορίζονται στο ελάχιστο. Σε ό,τι αφορά στην οικονομική αξιολόγηση των παρεμβάσεων, τα οικονομικά οφέλη της επένδυσης αυτή αποδείχτηκαν λίγα σε σχέση με το υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης των ΦΒ πλαισίων και της αντλίας θερμότητας εδάφους. Ωστόσο, σημαντικό ρόλο παίζει η ανυπαρξία οικονομικών κινήτρων από πλευράς της πολιτείας με τη μορφή επιδοτήσεως επί του συνολικού αρχικού κόστους της επένδυσης. Δίνεται η δυνατότητα, πλέον, να συνεχιστεί η παρούσα έρευνα, μελετώντας, αρχικά, την εφαρμογή άλλων φθηνότερων ΦΒ πλαισίων, και στη συνέχεια μπορεί, επιπλέον, να βελτιωθεί το σύστημα της αντλίας θερμότητας εδάφους. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα της ενσωμάτωσης παθητικών ηλιακών συστημάτων και στοιχείων πρόσθετης ηλιοπροστασίας, ώστε να μειωθούν περαιτέρω τα θερμικά και ψυκτικά φορτία του κτιρίου και αντίστοιχα να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Torcellini P., Pless S., and Deru M., 'Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition', National Renewable Energy Laboratory Drury Crawley, U.S. Department of Energy, 2002.
2. ΚΑΠΕ (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας), 'Ενσωμάτωση Τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Εξοικονόμησης Ενέργειας στον Οικιακό Τομέα', 2006. (διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.cres.gr>)
3. Crawley D.B., Lawrie L.K., Pedersen C.O., Liesen R.J., Fisher D.E., Strand R.K., Taylor R.D., Winkelmann R.C., Buhl W.F., Huang Y.J., Erdem A.E., ENERGYPLUS, 'A New-Generation Building Energy Simulation Program', Proceedings of Building Simulation '99, September 1999, Vol. 1. pp. 81-88, 1999.
4. Murugappan, A., 'Implementing Ground Source Heat Pump and Ground Loop Heat Exchanger Models in the Energy Plus Simulation Environment', M.S. Thesis, Oklahoma State University, 2002

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΜΕ ΦΥΤΕΜΕΝΗ ΟΡΟΦΗ

¹Μπαξεβάνου Α.Α., ¹Φείδαρος Δ.Κ., ¹Μπαρτζάνας Θ., ^{1,2}Κίττας Κ.*

¹Κέντρο Έρευνας Τεχνολογίας & Ανάπτυξης Θεσσαλίας – Ινστιτούτο Τεχνολογίας & Διαχείρισης Αγρο-οικοσυστημάτων, Τεχνολογικό Πάρκο Θεσσαλίας, 1η ΒΙΠΕ Βόλου, 38500 Βόλος, cbaxe@cereteth.gr, dfeid@cereteth.gr, bartzanas@cereteth.gr

²Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας, ckittas@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία ερευνάται η μεταβολή του θερμικού ηλιακού φορτίου ενός τυπικού δωματίου εξοπλισμένου με φυτεμένη οροφή. Το δωμάτιο θεωρείται ότι έχει δύο εξωτερικούς τοίχους δρομικούς και οροφή από πλάκα σκυροδέματος ενώ οι άλλοι δύο τοίχοι και το πάτωμα συνορεύουν με κλιματιζόμενους χώρους. Τα φαινόμενα μεταφοράς που αναπτύσσονται εντός του δωματίου περιγράφονται από τις εξισώσεις Navier-Stokes, με την εξίσωση της ενέργειας να μεταπίπτει στην εξίσωση αγωγιμότητας μέσα στα στερεά όρια. Για τη μοντελοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και για την μετάδοση αυτής στον υπολογιστικό χώρο χρησιμοποιείται το μοντέλο Discrete Ordinates το οποίο εφαρμόζεται σε δύο ζώνες μήκους κύματος. Μία που αντιστοιχεί στην ηλιακή ακτινοβολία και μία στη θερμική. Η επίδραση των θερμικών ανωστικών δυνάμεων λαμβάνεται υπόψη μέσω της προσέγγισης Boussinesq. Η ροή εντός του δωματίου θεωρείται ασυμπίεστη, 3Δ μη-μόνιμη και τυρβώδης. Για τη μοντελοποίηση της τύρβης χρησιμοποιείται το μοντέλο k- ω για υψηλό αριθμό Re. Οι εξισώσεις μεταφοράς λύνονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Εξετάζονται δύο περιπτώσεις, στην πρώτη η οροφή θεωρείται απλή μονωμένη οροφή ενώ στη δεύτερη θεωρείται φυτεμένη. Από τα αποτελέσματα προκύπτει μείωση του θερμικού φορτίου του δωματίου κατά 17%.

Key words: CFD, ταρτσόκηποι, προσομοίωση ακτινοβολίας, εξοικονόμηση ενέργειας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΦΥΣΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Στην παρούσα μελέτη ερευνάται η μεταβολή του θερμικού ηλιακού φορτίου ενός τυπικού δωματίου εξοπλισμένου με φυτεμένη ταράτσα. Στο αστικό περιβάλλον τα ψυκτικά φορτία των κτιρίων επιβαρύνουν το περιβάλλον με τρεις τρόπους. Μέσω των ενεργειακών πόρων που καταναλώνονται προκειμένου να παραχθεί η ψυκτική ενέργεια, μέσω των εκπομπών που συνοδεύουν την παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα και τέλος μέσω της επίδρασης στο μικροκλίμα του αστικού περιβάλλοντος της θερμική ενέργεια που αποβάλλουν οι εξωτερικές μονάδες των κλιματιστικών συσκευών. Μια μέθοδος για να μειωθούν οι ψυκτικές ανάγκες των κτιρίων είναι η φύτευση της οροφής προκειμένου να προστεθεί μόνωση και να μεταβληθεί το μικροκλίμα πάνω και γύρω από το κτίριο.

Δεδομένου ότι η φύτευση επιβαρύνει με κόστος τον κατασκευαστή είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το ακριβές κέρδος που μπορεί να προκύψει από μια τέτοια επέμβαση καθώς και τη μεταβολή στην κατανομή της θερμοκρασίας στον εσωτερικό χώρο που θα επιφέρει. Μέχρι στιγμής το ζήτημα των ταρτσόκηπων έχει αντιμετωπιστεί κυρίως σε επίπεδο αρχιτεκτόνων, πολιτικών μηχανικών και λιγότερο γεωπόνων. Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η κατασκευή ενός μοντέλου στο οποίο θα είναι δυνατή η μεταβολή των θερμικών και οπτικών χαρακτηριστικών του δομικού στοιχείου προκειμένου να είναι εύκολη η διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις βελτιώσεις

που μπορεί να προκύψουν από διαφορετικές αρχιτεκτονικές λύσεις καθώς και από διαφορετικές εφαρμογές φύτευσης. Η ποσοτικοποίηση του κέρδους είναι σε θέση να επιτρέψει στον πολιτικό μηχανικό να βελτιστοποιήσει τη μελέτη του.

Η επίδραση των ταρατσόκηπων στο εσωτερικό κλίμα των κτιρίων έχει μελετηθεί στο παρελθόν κυρίως με αναλυτικές και πειραματικές μεθόδους [1]. Πολύ λίγες εργασίες που να χρησιμοποιούν αριθμητικές μεθόδους για την προσομοίωση των φαινομένων μεταφοράς σε χώρους που καλύπτονται από ταρατσόκηπους έχουν δημοσιευθεί μέχρι σήμερα κυρίως με μεθόδους πεπερασμένων διαφορών [2]. Στην [1] μελετάται πειραματικά η ενεργειακή και περιβαλλοντική απόδοση ενός συστήματος ταρατσόκηπου τοποθετημένου πάνω σε νηπιαγωγείο και το ενεργειακό κέρδος υπολογίζεται με το πρόγραμμα TRNSYS. Μια παρόμοια εργασία παρουσιάζεται στην [3] για έναν ταρατσόκηπο εγκατεστημένο σε νοσοκομείο. Στην [4] παρουσιάζεται ένα μαθηματικό μοντέλο για την πραγματική δυναμική συμπεριφορά ενός ταρατσόκηπου, ενώ στην [5] αναπτύσσεται ένα αναλυτικό μοντέλο κατάλληλο για τον υπολογισμό της θερμικής συμπεριφοράς υπαρχουσών κατασκευών για φυτεμένες ταράτσες.

Ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στη μοντελοποίηση της απόδοσης ενός ταρατσόκηπου είναι η έλλειψη στοιχείων που αφορούν τις θερμικές και οπτικές ιδιότητες των υλικών στην περιοχή της ορατής και της θερμικής ακτινοβολίας. Έτσι μια σειρά εργασιών έχουν παρουσιαστεί στις οποίες εξετάζεται το πρόβλημα του προσδιορισμού των ιδιοτήτων αυτών [6,7]

Στην παρούσα εργασία η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των φαινομένων μεταφοράς που λαμβάνουν χώρα σε ένα δωμάτιο με φυτεμένη οροφή προκειμένου να υπολογιστεί αριθμητικά το ενεργειακό κέρδος που προκύπτει από την επέμβαση.

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η ροή εντός του δωματίου θεωρείται 3Δ, μη-μόνιμη ασυμπίεστη και τυρβώδης. Στην παρούσα εργασία τα φαινόμενα μεταφοράς και η μετάδοση θερμότητας περιγράφονται από τις Navier-Stokes εξισώσεις [8,9]. Εντός των στερών ορίων επιλύεται η εξίσωση Fourier η οποία αποτελεί την εκφυλισμένη μορφή της γενικευμένης εξίσωσης μετάδοσης θερμότητας.

Η επίδραση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στους εξωτερικούς τοίχους-παράθυρα και την οροφή, η εκπεμπόμενη από τα υλικά ακτινοβολία καθώς και η μετάδοση της ακτινοβολίας μέσα στο υπολογιστικό πεδίο προσομοιώνονται με το μοντέλο DO. Σε αυτό το μοντέλο η ακτινοβολία θεωρείται ότι μεταφέρεται διαμέσου του υλικού με την δική της ταχύτητα ταυτόχρονα προς όλες τις κατευθύνσεις. Το μοντέλο DO επιτρέπει την επίλυση της ακτινοβολίας σε ημι-διάφανους τοίχους. Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί σε μοντέλο στο οποίο οι οπτικές ιδιότητες των υλικών εξαρτώνται από το μήκος κύματος. Έτσι είναι κατάλληλη για να χρησιμοποιηθεί με υλικά στα οποία ο φασματικός συντελεστής απορρόφησης α_λ διαφοροποιείται με βηματικό συναρτήσει του μήκους κύματος.

Το μοντέλο ακτινοβολίας διακριτών κατευθύνσεων (Discrete ordinates – DO) επιλύει την εξίσωση μεταφοράς ακτινοβολίας (RTE) για πεπερασμένο αριθμό στερεών γωνιών, κάθε μια από τις οποίες αντιστοιχεί σε μοναδιαίο διάνυσμα κατεύθυνσης \vec{s} , σταθερό και ορισμένο σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x,y,z). Έτσι μετατρέπει την εξίσωση RTE σε εξίσωση μεταφοράς της έντασης ακτινοβολίας στις χωρικές συντεταγμένες (x,y,z). Το μοντέλο DO επιλύει τόσες εξισώσεις μεταφοράς όσες κατευθύνσεις \vec{s} ορίζονται [10, 11]. Η RTE για τη φασματική ένταση ακτινοβολίας $I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})$ παίρνει την ακόλουθη μορφή.

$$\nabla \cdot (I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (\alpha_\lambda + \sigma_s) I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = \alpha_\lambda n^2 I_{b\lambda}(\vec{r}) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (1)$$

Στην εξίσωση αυτή συντελεστής διάθλασης, n , και ο συντελεστής σκέδασης, σ , θεωρούνται ανεξάρτητοι από το μήκος κύματος. Η συνάρτηση φάσης, Φ , θεωρείται ισοτροπική. Ο υπολογιστικός χώρος 4π υπολογιστικό σημείο διακριτοποιείται σε $N\theta \times N\phi$ στερεές γωνίες μεγέθους ω_i . Οι γωνίες θ και ϕ είναι αντίστοιχα η πολική και αζιμουθιακή γωνία και μετρώνται ως προς το γενικό καρτεσιανό σύστημα (x,y,z) . Στη δική μας περίπτωση επιλέγεται μια διακριτοποίηση 3×3 . Αν και σε αυτήν την εξίσωση ο συντελεστής διάθλασης λαμβάνεται σταθερός, κατά τον υπολογισμό της εκπομπής μέλανος σώματος ακτινοβολίας καθώς και κατά τον υπολογισμό των οριακών συνθηκών που επιβάλλονται στους ημιδιαφανείς τοίχους η εξάρτησή του από το μήκος κύματος λαμβάνεται υπόψη. Η επιλεγμένη γωνιακή διακριτοποίηση μειώνει το υπολογιστικό κόστος αλλά είναι δυνατό να εισάγει σφάλματα στα όρια του υπολογιστικού πεδίου όταν οι στερεές γωνίες τέμνουν τα γεωμετρικά όρια [13]. Η επίλυση ενός προβλήματος σε 3 διαστάσεις με λεπτομερή γωνιακή διακριτοποίηση θα αύξαινε σημαντικά το υπολογιστικό κόστος.

Η εξίσωση RTE ολοκληρώνεται κατά μήκος ενός φάσματος μήκους κύματος. Έτσι η συνολική ένταση ακτινοβολίας $I(\vec{r}, \vec{s})$ σε κάθε κατεύθυνση \vec{s} στη θέση \vec{r} υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση

$$I(\vec{r}, \vec{s}) = \sum_{\kappa} I_{\lambda_{\kappa}}(\vec{r}, \vec{s}) \Delta \lambda_{\kappa} \quad (2)$$

Όπου το άθροισμα περιλαμβάνει όλα τα φάσματα μήκους κύματος που χρησιμοποιούνται.

Η εξίσωση RTE σχετίζεται με την εξίσωση της ενέργειας μέσω ενός ογκομετρικού όρου πηγής ο οποίος δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση [12]:

$$S_h = -\frac{\partial q_{r_i}}{\partial x_i} = \alpha_{\lambda} \left(4\pi I_{b\lambda}(\vec{r}) - \int_{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}) d\Omega \right) \quad (3)$$

Η ροή εντός του δωματίου είναι τυρβώδης και μοντελοποιείται με το k- ω μοντέλο τύρβης υψηλού αριθμού Re του Wilcox [14] με συναρτήσεις τοίχου.

Το φαινόμενο της θερμικής άνωσης αντιμετωπίζεται με την προσέγγιση Boussinesq. Η χρήση του μοντέλου προσφέρει ταχύτερη σύγκλιση καθώς λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή της πυκνότητας λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας μόνο κατά τον υπολογισμό του όρου πηγής f_b της εξίσωσης μεταφοράς ορμής ενώ οπουδήποτε αλλού θεωρεί την πυκνότητα σταθερή. Συγκεκριμένα προσεγγίζει την πυκνότητα από τη σχέση $\rho = \rho_0 (1 - \beta \Delta T)$ (4)

Όπου β ο συντελεστής θερμικής διαστολής και T η θερμοκρασία με αποτέλεσμα ο όρος πηγής να υπολογίζεται από τη σχέση $f_b = (\rho - \rho_0) g \approx -\rho_0 \beta (T - T_0) g$ (5)

3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Οι εξισώσεις μεταφοράς λύνονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο πλέγμα. Εξετάστηκαν δύο πλέγματα ένα των 375700 κελιών και ένα των 841500 κελιών προκειμένου να εξασφαλιστεί η ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων από το μέγεθος του υπολογιστικού όγκου. Στη δεύτερη περίπτωση εφαρμόστηκαν πρακτικές πύκνωσης του πλέγματος κοντά στα στερεά όρια προκειμένου να εξασφαλιστεί η σωστή εφαρμογή των συναρτήσεων τοίχου που απαιτεί το μοντέλο τύρβης. Για τη σύζευξη των ταχυτήτων με την πίεση χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος SIMPLEC. Η διακριτοποίηση των όρων συναγωγής των εξισώσεων μεταφοράς της ορμής γίνεται με το σχήμα QUICK, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k και της ακτινοβολίας στο μοντέλο DO γίνεται μέσω του σχήματος SOU, ενώ στην εξίσωση μεταφοράς του ειδικού ρυθμού σκέδασης χρησιμοποιείται πρώτης τάξης ανάντη σχήμα, και της ενέργειας με το τρίτης τάξης σχήμα MUSCL. Τέλος οι όροι διάχυσης όλων των εξισώσεων μεταφοράς διακριτοποιούνται με το σχήμα των κεντρικών διαφορών. Το χρονικό βήμα που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της μη-μόνιμης συμπεριφοράς κατά

τη διάρκεια μιας ηλιακής ημέρας ήταν $dt=60\text{sec}$, και πραγματοποιήθηκαν 720 βήματα προκειμένου να καλυφθεί η χρονική διάρκεια των 12 ωρών της ισημερίας. Το κριτήριο σύγκλισης τέθηκε 10^{-4} για όλες τις μεταβλητές εκτός της ενέργειας για την οποία τέθηκε 10^{-6} . Για το μοντέλο ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκαν δύο φάσματα μήκους κύματος, που αντιστοιχούν στην ορατή και την υπέρυθρη ακτινοβολία ($\lambda=0-1.1\text{ }\mu\text{m}$ και $\lambda=1.1-100\mu\text{m}$).

4. ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

4.1 Γεωμετρία

Στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης εξετάζεται δωμάτιο μεγέθους $3\times 4\times 3\text{ m}$ με ένα παράθυρο στην Ανατολή μεγέθους $1\times 1\text{ m}$, μια πόρτα στο Νότο 1.5×2.2 και δύο ελεύθερους τοίχους πάχους 20cm (Ανατολή και Νότος) στους οποίους είναι γνωστή η προσπίπτουσα ακτινοβολία καθώς και η εξωτερική θερμοκρασία. Οι άλλοι δύο τοίχοι καθώς και το πάτωμα θεωρείται ότι συνορεύουν με κλιματιζόμενους χώρους, συνεπώς επιβάλλονται ισοθερμοκρασιακές οριακές συνθήκες. Για την οροφή λαμβάνεται γνωστή η προσπίπτουσα ακτινοβολία καθώς και η θερμοκρασία και το πάχος της λαμβάνεται 30 cm .

4.2 Ιδιότητες υλικών

Ο αέρας εντός του δωματίου θεωρείται ότι έχει τις ακόλουθες θερμικές και οπτικές ιδιότητες: $\rho = 1.225\text{ Kg/m}^3$, $C_p = 1005\text{ J/KgK}$, $k = 0.0253\text{ W/mK}$, $\mu = 1.8 \times 10^{-5}\text{ Kg/ms}$, $\alpha = 0\text{ [1/m]}$, $\beta = 0.00343\text{ 1/K}$ και $n = 1$. Η πόρτα και το παράθυρο θεωρούνται γυάλινες επιφάνειες με τις ακόλουθες θερμικές ιδιότητες $k_{\text{eff}}=19.5\text{ W/mK}$, $\rho_{\text{av}} = 184.6\text{ Kg/m}^3$, $C_{p,\text{eff}} = 23\text{ J/kgK}$, ενώ οι οπτικές ιδιότητες δίνονται από τον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 1 Οπτικές ιδιότητες γυάλινων επιφανειών

Υλικό	PAR	NIR
a (Απορροφητικότητα)	0.1	0.2
τ (Περατότητα)	0.84	0.73
ρ (Ανακλαστικότητα)	0.06	0.07
n (Δείκτης διάθλασης)	1.65	1.72
Πάχος [mm]	4.	4

Οι πλαϊνοί τοίχοι θεωρούνται ότι είναι δρομικοί με την ακόλουθη σύσταση και θερμικές ιδιότητες.

Πίνακας 2. Στρώσεις και ιδιότητες δρομικού τοίχου

a/a	Στρώμα	Πάχος d [m]	Πυκνότητα ρ [Kg/m ³]	λ [kcal/mhC]	C_p [kJ/Kg]
1	Επίχρισμα	0.02	1900	0.750	0.84
2	Τούβλο	0.09	1200	0.450	0.80
3	Μόνωση	0.05	18	0.035	1.60
4	Τούβλο	0.09	1200	0.450	0.80
5	Επίχρισμα	0.02	1900	0.750	0.84

Ο συντελεστής εκπομπής λαμβάνεται $\epsilon=0.93$ ενώ ο συντελεστής αντανάκλασης $\rho=0.4$. Για λόγους υπολογιστικής οικονομίας δεν αναγνωρίζονται τα ξεχωριστά στρώματα υλικών και συνεπώς χρησιμοποιούνται τιμές θερμικών ιδιοτήτων που αντιστοιχούν στις δρώσες τιμές του παραπάνω συνόλου. Η οροφή αντίστοιχα αποτελείται από την ακόλουθη σύσταση.

Πίνακας 3. Στρώσεις και ιδιότητες απλής οροφής

a/a	Στρώμα	Πάχος d [m]	Πυκνότητα ρ [Kg/m ³]	λ [W/mk]	Cp [J/KgK]
1	Επίχρισμα	0.02	1900	0.87	840
2	Μπετό	0.30	1000	0.38	900
3	Μόνωση	0.05	35	0.06	900
4	Στεγάνωση	0.01	1200	0.17	1470
5	Κάλυψη	0.03	1600	0.7	880

Για την περίπτωση που είναι καλυμμένη με άσφαλτο και χαλίκι λαμβάνουμε $\varepsilon=0.87$ και $\rho=0.13$. Επίσης αντιμετωπίζεται ως ενιαίο υλικό.

Τέλος στην περίπτωση που η οροφή θεωρείται ταρατσόκηπος θεωρείται ότι αποτελείται από την ακόλουθη σύσταση[3]. Τα φυτά θεωρείται ότι έχουν $\varepsilon=0.7$ και $\rho=0.23$.

Πίνακας 4. Στρώσεις και ιδιότητες φυτεμένης οροφής

a/a	Στρώμα	Πάχος d [m]	Πυκνότητα ρ [Kg/m ³]	λ [W/mk]	Cp [J/KgK]
1	Greenery (sedum)	0.1	500	0.115	1380
2	Soil (για υγρό χώμα)	0.067	766	1	1000
3	Filter sheet				
4	Drainage layer (polythelene)	0.108	25	0.15	1200
5	Retention sheet				
6	Anti-root barrier				
7	Water proof sheet	0.01	1200	0.17	1470
8	Μπετό	0.30	1000	0.38	900
9	Επίχρισμα	0.02	1900	0.87	840

4.3 Οριακές συνθήκες

Το πάτωμα και οι βόρειος και δυτικός τοίχος του δωματίου θεωρούνται ισόθερμοι τοίχοι, χωρίς πάχος. Σε ότι αφορά την ακτινοβολία θεωρούνται αδιαφανείς επιφάνειες οι οποίες μπορούν να απορροφήσουν μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, να ανακλάσουν την υπόλοιπη. Επίσης μπορούν να εκπέμψουν ακτινοβολία ανάλογα με τη θερμοκρασία τους. Η θερμοκρασία τους θεωρείται σταθερή καθ όλη τη διάρκεια της ημέρας και ίση με 20 °C.

Η πόρτα και το παράθυρο θεωρούνται ότι αποτελούνται εξωτερικά από δύο συζευγμένες ημιδιαφανείς τοίχους και εσωτερικά από στερεό με τις θερμικές και οπτικές ιδιότητες που έχουν περιγραφεί. Εξωτερικά εφαρμόζεται μικτή θερμική οριακή συνθήκη που σημαίνει ότι η μετάδοση της θερμότητας γίνεται με συνδυασμό συναγωγής και ακτινοβολίας. Δίδεται λοιπόν συντελεστής συναγωγής με τον εξωτερικό αέρα $\alpha=7.1$ W/mk. Σε ότι αφορά την ακτινοβολία θεωρούνται ημι-διαφανείς επιφάνειες. Αυτό σημαίνει ότι ένα μέρος από την προσπίπτουσα ακτινοβολία ανακλάται ενώ το υπόλοιπο διαπερνά την επιφάνεια. Η απορρόφηση της διερχόμενης ακτινοβολίας γίνεται από το στερεό που θεωρείται ότι καταλαμβάνει το χώρο μεταξύ των δύο ημι-διαφανών τοίχων. Μέσα στο στερεό επιλύονται οι εξισώσεις ενέργειας και ακτινοβολίας, αλλά όχι φυσικά οι εξισώσεις ορμής και τύρβης. Οι δύο ημιδιαφανείς τοίχοι και το εσωτερικό είναι συζευγμένα με αποτέλεσμα οι τιμές των επιλυόμενων παραμέτρων να μεταφέρονται από τη μία επιφάνεια στην άλλη. Η μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας δίνεται στο σχήμα 2, ενώ η μεταβολή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο σχήμα 3 και θεωρείται ότι βρίσκεται όλη στο πρώτο φάσμα της επιλυόμενης ακτινοβολίας.

Οι τοίχοι καθώς και η οροφή επίσης θεωρούνται ότι αποτελούνται από δύο εξωτερικούς ημιδιαφανείς τοίχους και εσωτερικά από ένα στερεό το οποίο έχει τέτοιες οπτικές ιδιότητες (συντελεστή απορρόφησης) που να εξασφαλίζει ότι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία θα έχει

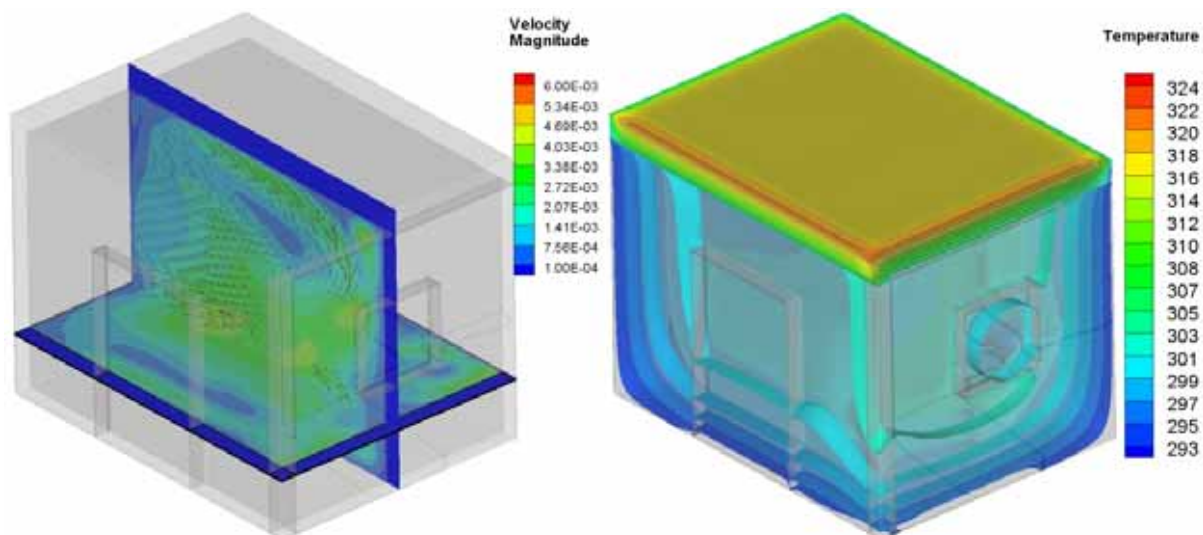
πλήρως απορροφηθεί στα πρώτα υπολογιστικά κελιά. Με αυτό τον τρόπο όμως εξασφαλίζεται η αύξηση της θερμοκρασίας του τοίχου λόγω ακτινοβολίας, η δυνατότητα να μελετηθεί η θερμοαποθήκευση καθώς και να ληφθεί υπόψη η ακτινοβολία υπέρυθρης ακτινοβολίας από τον τοίχο προς το εσωτερικό.

4.4 Παραμετρική μελέτη

Η προσομοίωση αφορά την 21^η Σεπτεμβρίου σε γεωγραφικό πλάτος που αντιστοιχεί στην Κεντρική Ελλάδα (γεωγραφικό πλάτος $L=22.57$, γεωγραφικό μήκος $\varphi=39.22$ και $GT=+2h$). Προσομοιώνονται δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση η ταράτσα θεωρείται γυμνή ενώ στην άλλη θεωρείται καλυμμένη με φυτά.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

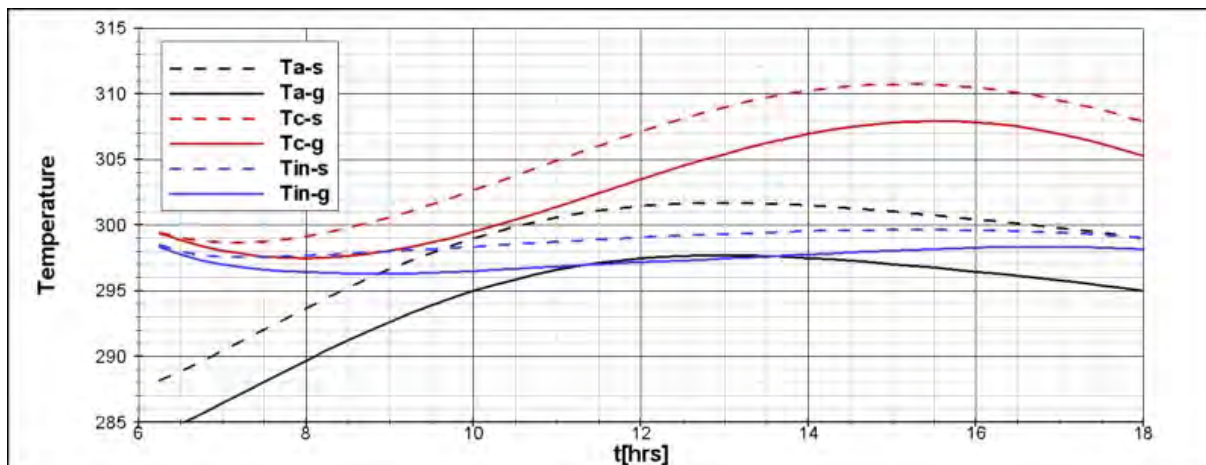
Στο σχήμα 1 δίνονται σε δύο τομές η κατανομή και τα διανύσματα ταχυτήτων καθώς και η κατανομή θερμοκρασίας στις 12 το μεσημέρι την περίπτωση της φυτεμένης οροφής. Παρατηρείται ισχυρά τυρβώδης ροή με ανακυκλοφορίες κοντά στην οροφή όπου οι θερμοκρασιακές κλίσεις είναι πιο έντονες. Οι μεγαλύτερες ταχύτητες εμφανίζονται στο κέντρο του δωματίου. Η παρούσα περίπτωση δεν μπορεί να συγκριθεί με τις συνήθεις περιπτώσεις μελέτης ροής σε κλειστές κοιλότητες δεδομένου ότι η θερμή επιφάνεια είναι από πάνω.



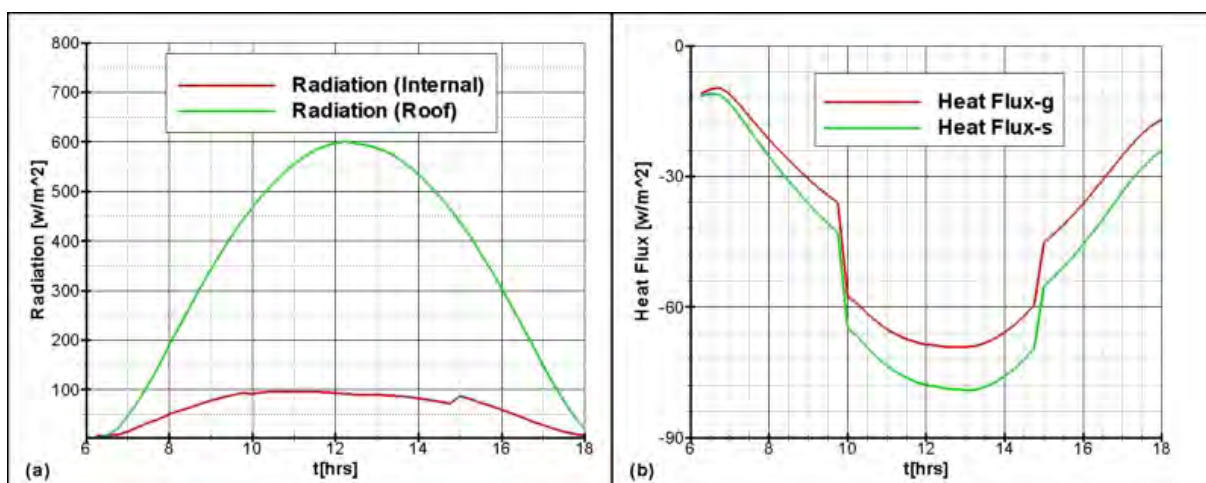
Σχήμα 1. Κατανομή ταχυτήτων και θερμοκρασίας στις 12h.

Στο σχήμα 2 δίνονται οι καμπύλες χρονικής μεταβολής των μέσων θερμοκρασιών του εξωτερικού περιβάλλοντος (T_a), της οροφής (T_c) και του εσωτερικού χώρου (T_{in}) για τις δύο περιπτώσεις της απλής οροφής (s) με διακεκομμένη γραμμή και της φυτεμένης (g) με πλήρη γραμμή.

Εφόσον θεωρήθηκε αρχική θερμοκρασία όλου του υπολογιστικού χώρου 300 K αρχικά η θερμοκρασία μειώνεται τόσο στην οροφή όσο και στο εσωτερικό. Από τις 9h και έπειτα αρχίζει να αυξάνει λόγω κυρίως της ηλιακής ακτινοβολίας και δευτερευόντως λόγω της αύξησης της εξωτερικής θερμοκρασίας για να μειωθεί ξανά τις απογευματινές ώρες. Η μείωση όμως είναι πιο αργή και η μέγιστη τιμή μετατοπίζεται προς το απόγευμα λόγω της θερμοαποθήκευσης. Στο εσωτερικό της οροφής η θερμοκρασία αυξάνεται πολύ περισσότερο από ότι στον εσωτερικό αέρα και η διαφοροποίηση ανάμεσα στους δύο τύπους οροφών είναι πολύ πιο έντονη.



Σχήμα 2. Χρονική μεταβολή μέσων θερμοκρασιών: α) Εξωτερικού περιβάλλοντος (T_a), β) Οροφής (T_c) και γ) εσωτερικού χώρου (T_{in}), για την περίπτωση της απλής οροφής (s) και της φυτεμένης (g)



Σχήμα 3. Χρονική μεταβολή (α) της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό και το εσωτερικό του δωματίου και (β) της θερμοροής για την απλή (s) και φυτεμένη (g) οροφή.

Λόγω του ανατολικού παραθύρου το μέγιστο της θερμοκρασίας παρατηρείται κατά τις πρωινές ώρες παραμένοντας όμως σε ικανοποιητικά επίπεδα σε όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Στο σχήμα 3b δίνεται η χρονική μεταβολή της μέσης τιμής της θερμοροής διαμέσου όλων των τοιχωμάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας για την περίπτωση της απλής (s) και της φυτεμένης οροφής (g). Παρατηρούμε ότι η μέση τιμή είναι πάντα αρνητική και παρουσιάζει μέγιστο λίγο μετά τις μεσημεριανές ώρες. Για την περίπτωση της απλής οροφής οι τιμές της θερμοροής είναι μεγαλύτερες και λόγω της υψηλότερης εσωτερικής θερμοκρασίας και λόγω της χαμηλότερης εξωτερικής θερμοκρασίας στην οροφή της φυτεμένης οροφής. Σε όλη τη διάρκεια της ημέρας αντιστοιχεί σε αύξηση της ενέργειας κατά 17%.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε χρονικά μεταβαλλόμενη 3Δ αριθμητική προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς ενός δωματίου με δύο εξωτερικούς τοίχους με ανοίγματα και δύο εσωτερικούς, λαμβάνοντας υπόψη την μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας, τα χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων και την κάλυψη της ανωδομής για δύο περιπτώσεις οροφής, φυτεμένης και μη, και μελετήθηκε το θερμικό ηλιακό κέρδος και η θερμοροή κατά τη διάρκεια μιας

ηλιακής ημέρας. Επιλέχθηκε να εξεταστεί η ισημερία του Σεπτεμβρίου για μια περιοχή της Κεντρικής Ελλάδας.

Σε ότι αφορά την επίδραση της φυτεμένης οροφής στον εξωτερικό περιβάλλοντα χώρο έγινε η παραδοχή ότι μειώνει τοπικά τη θερμοκρασία κατά 4 βαθμούς σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Από τα αποτελέσματα προκύπτει σημαντική μείωση της θερμοκρασίας οροφής και μικρότερη μείωση της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου για την περίπτωση της φυτεμένης οροφής. Η μείωση του θερμικού ηλιακού κέρδους οδηγεί σε μείωση των ψυκτικών αναγκών της τάξης του 17%.

Προκύπτει η ανάγκη περαιτέρω μελέτης σχετικά με τον προσδιορισμό των θερμικών και οπτικών ιδιοτήτων των φυτών της οροφής και σχετικά με την επίδραση αυτών στο εξωτερικό περιβάλλον.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Santamouris, M., Pavlou, C., Doukas, P., Mihalakakou, G., Synnefa, A., Hatzibiros, A. and Patargias, P., 'Investigating and analyzing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece', *Energy*, 32, pp.1781-1788, 2007.
2. Eumorfopoulou, K. and Aravantinos, D., 'Numerical approach to the contribution of the planted roof to the cooling of buildings', *Proceedings of the International symposium of passive cooling of buildings*, Greece, June 1995.
3. ELazzarin, M.R., Castellotti, F. and Busato, F., 'Experimental measurements and numerical modeling of a green roof', *Energy and Buildings*, 37, pp. 1260-1267, 2005.
4. Palomo del Barrio, E., 'Analysis of the green roofs cooling potential in buildings', *Energy and Buildings*, 27, pp. 179-193, 1998.
5. Theodosiou, T.G., 'Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique', *Energy and Buildings*, 35, pp. 909-917, 2003.
6. Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, A., Tsangrassoulis, A. and Mihalakakou, G., 'Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance', *Energy and Buildings*, 33, pp. 719-729, 2001.
7. Ondinu, S.N. and Murase, H., 'Combining Galerkin methods and neural network analysis to inversely determine thermal conductivity of living green roof materials', *Biosystem engineering*, 94(4), pp. 541-550, 2007.
8. Launder, B. E. and Spalding, D. B., 'The numerical computation of turbulent flows', *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3: 269-289, 1974.
9. Ferziger, J.H. and Peric, M., 'Computational Methods for Fluid Dynamics' Springer, London, 1996.
10. Chui, E.H. and Raithby, G.D., 'Computation of radiant heat transfer on a nonorthogonal mesh using the finite-volume method', *Numerical Heat Transfer. Part B, Fundamentals* 23, 269-288, 1993.
11. Raithby, G.D. and Chui, E.H., 'A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media', *Transactions of ASME Journal of Heat Transfer* 112, 415-423, 1990.
12. Kim, S.H. and Huh, K.Y., 'A new angular discretization scheme of the finite volume method for 3-D radiative heat transfer in absorbing, emitting and anisotropically scattering media', *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43, 1233-1242, 2000.
13. Raithby, G.D., 'Discussion of the finite-volume method for radiation, and its application using 3D unstructured meshes', *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals* 35, 1999.
14. Wilcox, D.C., 'Comparison of two-equation turbulence models for boundary layers with pressure gradient', *AIAA Journal*, Vol. 31, pp. 1414-1421, 1994

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΘΗΤΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΜΕ ΦΥΤΑ

¹Μπαξεβάνου Α.Α.^{*}, ¹Φείδαρος Δ.Κ., ²Τζαχάνης Α.Δ

¹Κέντρο Έρευνας Τεχνολογίας & Ανάπτυξης Θεσσαλίας – Ινστιτούτο Τεχνολογίας & Διαχείρισης
Αγρο-οικοσυστημάτων, Τεχνολογικό Πάρκο Θεσσαλίας, 1η ΒΙΠΕ Βόλου, 38500 Βόλος,

cbaxe@cereteth.gr, dfeid@cereteth.gr

²Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Λάρισας, Τμήμα Μηχανολογίας, 41110 Λάρισα, tzach@teilar.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία προσομοιώνονται φαινόμενα μεταφοράς που αναπτύσσονται στο εσωτερικό σκιαζόμενου οικίσκου και γύρω από αυτόν. Ο οικίσκος έχει ένα εξωτερικό σκίαστρο οροφής ενώ ο νότιος τοίχος του, προστατεύεται από αναρριχητικά φυτά τοποθετημένα σε μικρή απόσταση. Για τη προσομοίωση αναπτύσσεται αριθμητικό μοντέλο βασισμένο στη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων για την επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς, ενώ η μοντελοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και η μετάδοση της ακτινοβολίας μέσα στο υπολογιστικό πεδίο υλοποιείται από το μοντέλο Discrete Ordinates (DO). Στους υπολογισμούς λαμβάνεται υπόψη η φασματική φύση της ακτινοβολίας και οι οπτικές και θερμικές ιδιότητες των φυτών. Διακρίνονται δύο εύρη μήκους κύματος ακτινοβολίας, η μικρού μήκους που αντιστοιχεί στην ηλιακή ακτινοβολία και η μεγάλου μήκους που αντιστοιχεί στη θερμική ακτινοβολία. Η προσομοίωση αφορά 2Δ γεωμετρία, ασυμπίεστη, μόνιμη και τυρβώδη ροή, και εξετάζονται 6 διαφορετικές ώρες μιας ημέρας του Αυγούστου. Από τα αποτελέσματα προκύπτει μείωση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στο νότιο τοίχο, λόγω της παρουσίας των φυτών. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με πειραματικές μετρήσεις από τις οποίες διαφοροποιούνται κυρίως λόγω της θερμοαποθήκευσης. Αναδεικνύεται η ανάγκη υπολογισμού ακριβών τιμών των θερμικών και οπτικών ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων φυτών.

KEY WORDS: Παθητικό ηλιακό σύστημα, προσομοίωση ακτινοβολίας, φαινόμενα μεταφοράς, υπολογιστική ρευστοδυναμική

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση φυτών και δένδρων για σκίαση της νότιας επιφάνειας κτιρίων ως μέσο ηλιακής προστασίας είναι μια παλιά τεχνική ευρέως διαδεδομένη στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική και αποτελεί σημαντική παράμετρο της βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής. Μέχρι στιγμής οι περισσότερες μελέτες που επιχειρούσαν να ποσοτικοποιήσουν τα οφέλη σε ότι αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας μέσω μείωσης του ψυκτικού φορτίου και τη μεταβολή του μικροκλίματος εντός του σκιαζόμενου κτιρίου ήταν κυρίως πειραματικές και δευτερευόντως αναλυτικές που συχνά κατέληγαν σε μοντέλα με τη μορφή κάποιου κώδικα.

Σύμφωνα με μετρήσεις σε δύο κτίρια [1] η εξοικονόμηση ενέργειας που δαπανάται για δροσισμό, η οποία είναι δυνατό να επιτευχθεί με την τοποθέτηση δέντρων μπορεί να φθάσει το 30% της κατανάλωσης κάτι που αντιστοιχεί σε ημερήσια εξοικονόμηση της τάξης των 3.6 έως 4.8 kWh/d. Στην εργασία [2] επίσης ερευνάται πειραματικά η επίδραση των δέντρων στη μετάδοση θερμότητας μεταξύ του περιβλήματος ενός κτιρίου και του περιβάλλοντος χώρου. Ενώ στην [3] προσομοιώνεται το περιοδικό θερμικό κέρδος σε κτίριο με δυναμικό μοντέλο, υπολογίζοντας τη μετάδοση θερμότητας σε μόνιμη κατάσταση. Στην εργασία [4] χρησιμοποιείται ένα λογισμικό, η πλατφόρμα ESP-R προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση δέντρων τοποθετημένων βόρεια ενός κτιρίου στην θερμική ενεργειακή κατανάλωση.

Αριθμητικές μέθοδοι μέχρι στιγμής έχουν χρησιμοποιηθεί σε παρεμφερή προβλήματα όπως οι ηλιακές καμινάδες αλλά όχι στην αντιμετώπιση του όλου προβλήματος με τη μοντελοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας [5,6]. Αριθμητικές μέθοδοι κυρίως χρησιμοποιούνται για τη μελέτη του μικροκλίματος σε αστικές χαράδρες [7]. Τέλος στην εργασία [8] αναπτύσσεται αριθμητικό μοντέλο για τη μελέτη της επίδρασης φυτών τοποθετημένων στη νότια επιφάνεια οικίσκου χωρίς όμως να λαμβάνονται υπόψη οι οπτικές και θερμικές ιδιότητες των φυτών εφόσον θεωρούνται ότι αυτά προσφέρουν μόνο σκίαση. Στην παρούσα εργασία μελετάται αριθμητικά η ροή και τα φαινόμενα μεταφοράς σε οικίσκο του οποίου η νότια επιφάνεια σκιάζεται μερικώς από αναρριχητικά φυτά, λαμβάνοντας υπόψη και τις θερμικές και οπτικές ιδιότητες των φυτών σε δύο εύρη μήκους κύματος. Επίσης επιλύεται πλήρως η ροή εντός και εκτός οικίσκου χωρίς να επιβληθούν τιμές της ταχύτητας εισόδου του αέρα στο διάκενο μεταξύ οικίσκου και φυτών.

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η ροή εντός και εκτός του οικίσκου θεωρείται 2Δ, μόνιμη ασυμπίεστη και τυρβώδης. Στην παρούσα εργασία τα φαινόμενα μεταφοράς και η μετάδοση θερμότητας περιγράφονται από τις Reynolds Averaged Navier-Stokes εξισώσεις [9,10]. Τα φυτά που αποτελούν το μέσο σκίασης μοντελοποιούνται ως πορώδη υλικά τα οποία εισάγουν επιπλέον πτώση πίεσης [11]. Η πτώση πίεσης αυτή συντίθεται από δύο όρους, έναν ιξώδη, όρος γνωστός ως νόμος του Darcy, και έναν αδρανειακό, όπως φαίνεται στην ακόλουθη σχέση.

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} u_i + C_2 \rho u_i^2\right) \quad (1)$$

όπου, α είναι η περατότητα του πορώδους υλικού και C_2 ο συντελεστής της αδρανειακής αντίστασης. Στην εξίσωση διατήρησης της ενέργειας προστίθεται ένας όρος πηγής, S_h , ο οποίος προέρχεται από τη θερμότητα που συνεισφέρει η ακτινοβολία. Επιπλέον ο συντελεστής αγωγιμότητας στην περιοχή του πορώδους υλικού δίνεται από τη σχέση

$k_{eff} = \gamma k_{eff} + (1 - \gamma) k_s$, όπου k_{eff} η δρώσα αγωγιμότητα του ρευστού, k_s η αγωγιμότητα του εμπλεκόμενου στερεού και γ το ποσοστό του πορώδους ($\gamma=1$ σημαίνει ότι όλο υλικό είναι ρευστό). Εντός των στερεών τμημάτων του υπολογιστικού πεδίου οι ταχύτητες μηδενίζονται με αποτέλεσμα η εξίσωση μεταφοράς της ενέργειας να μετατρέπεται σε εξίσωση μετάδοση θερμότητας λόγω αγωγιμότητας $k_s \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} + S_h = 0$ (2)

Η επίδραση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στους εξωτερικούς τοίχους-στο σκίαστρο και στα φυτά, η εκπεμπόμενη από τα υλικά ακτινοβολία καθώς και η μετάδοση της ακτινοβολίας μέσα στο υπολογιστικό πεδίο προσομοιώνονται με το μοντέλο DO [15,16]. Η εξίσωση μεταφοράς της φασματικής έντασης ακτινοβολίας $I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})$ λαμβάνει την εξής μορφή.

$$\nabla \cdot (I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (\alpha_\lambda + \sigma_s) I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = \alpha_\lambda n^2 I_{b\lambda}(\vec{r}) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (3)$$

Στην εξίσωση αυτή ο συντελεστής διάθλασης, n , και ο συντελεστής σκέδασης, σ , θεωρούνται ανεξάρτητοι από το μήκος κύματος, στον υπολογισμό όμως των οριακών συνθηκών η εξάρτησή τους από το μήκος κύματος λαμβάνεται υπόψη. Η συνάρτηση φάσης, Φ , θεωρείται ιστροπική και ο υπολογιστικός χώρος 4π διακριτοποιείται σε $N_\theta \times N_\phi$ στερεές γωνίες μεγέθους ω_i . Οι γωνίες θ και ϕ είναι η πολική και αζιμουθιακή γωνία αντίστοιχα και μετρώνται ως προς το γενικό καρτεσιανό σύστημα (x,y,z) [11,12,13].

Η εξίσωση μεταφοράς της ακτινοβολίας συσχετίζεται με την εξίσωση της ενέργειας μέσω του ογκομετρικού όρου πηγής, ο οποίος δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση [14,15]:

$$S_h = -\frac{\partial q_{r_i}}{\partial x_i} = \alpha_\lambda \left(4\pi I_{b\lambda}(\vec{r}) - \int_{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}) d\Omega \right) \quad (4)$$

Η ροή εντός του δωματίου είναι τυρβώδης και μοντελοποιείται με το k-ω μοντέλο τύρβης υψηλού αριθμού Re του Wilcox [16] με συναρτήσεις τοίχου, ενώ η θερμική άνωση με την προσέγγιση Boussinesq. Η χρήση του μοντέλου προσφέρει ταχύτερη σύγκλιση καθώς λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή της πυκνότητας λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας μόνο κατά τον υπολογισμό του όρου πηγής f_b της εξίσωσης μεταφοράς ορμής ενώ οπουδήποτε αλλού θεωρεί την πυκνότητα σταθερή. Συγκεκριμένα προσεγγίζει την πυκνότητα από τη σχέση

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta \Delta T) \quad (5)$$

Όπου β ο συντελεστής θερμικής διαστολής και T η θερμοκρασία με αποτέλεσμα ο όρος πηγής να προκύπτει από τη σχέση $f_b = (\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T - T_0)g$ (6)

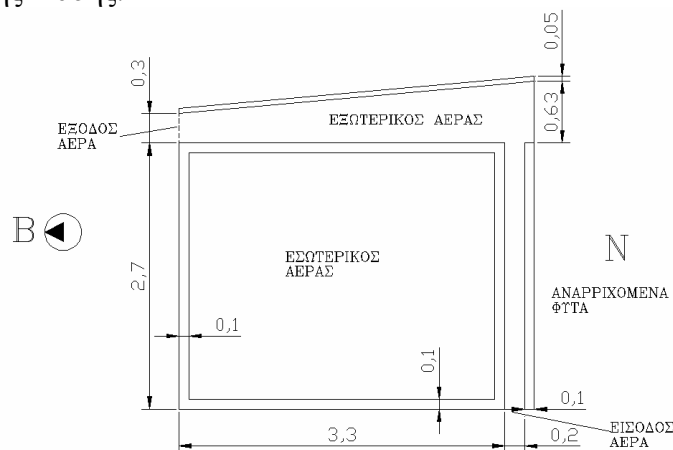
3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το προσομοίωμα επιλύει τις 2Δ εξισώσεις μεταφοράς για τις ταχύτητες, την τύρβη, την ενέργεια και τη φασματική ακτινοβολία οι οποίες διακριτοποιούνται αριθμητικά μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων όγκων σε πλέγμα δομημένο αποτελούμενο από 122040 κελιά. Για τη σύζευξη των ταχυτήτων με την πίεση χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος SIMPLEC. Η διακριτοποίηση των όρων συναγωγής των εξισώσεων μεταφοράς της ορμής γίνεται με το σχήμα QUICK, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k και της ακτινοβολίας στο μοντέλο DO γίνεται μέσω του σχήματος SOU, ενώ στην εξίσωση μεταφοράς του ειδικού ρυθμού σκέδασης χρησιμοποιείται πρώτης τάξης ανάντη σχήμα, και της ενέργειας με το τρίτης τάξης σχήμα MUSCL. Τέλος οι όροι διάχυσης όλων των εξισώσεων μεταφοράς διακριτοποιούνται με το σχήμα των κεντρικών διαφορών. Το κριτήριο σύγκλισης τέθηκε 10^{-4} για όλες τις μεταβλητές εκτός της ενέργειας για την οποία τέθηκε 10^{-6} και της ακτινοβολίας για την οποία τέθηκε 10^{-5} . Για το μοντέλο ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκαν δύο κλάσεις μήκους κύματος, που αντιστοιχούν στην ηλιακή και τη θερμική ακτινοβολία ($\lambda=0-1.1 \mu\text{m}$ και $\lambda=1.1-100\mu\text{m}$).

4. ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

4.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Η γεωμετρία της προσομοίωσης δίνεται στο Σχήμα 1. Αν και το πρόβλημα είναι τρισδιάστατο, επιλέχθηκε να αντιμετωπιστεί κατ' αρχήν σε δύο διαστάσεις για λόγους υπολογιστικού κόστους, επιλέγοντας το συμμετρικό επίπεδο της διάταξης που είναι κάθετο στον άξονα Ανατολής-Δύσης.



Σχήμα 1. Γεωμετρία οικίσκου

4.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Στη μοντελοποίηση της ακτινοβολίας λαμβάνεται υπόψη και η φασματική φύση της ακτινοβολίας και οι οπτικές και θερμικές ιδιότητες των φυτών. Ο 'τοίχος' των αναρριχώμενων φυτών θεωρείται πορώδες υλικό που αποτελείται κατά 40% από αέρα και 60% από φυτά, συνεπώς $\gamma=1$. Ο οικίσκος καθώς και το σκέπαστρο είναι κατασκευασμένα από φύλλα πολυουρεθάνης. Οι θεωρούμενες ιδιότητες των υλικών δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 1. Ιδιότητες υλικών

Ιδιότητα	Αέρας	Φυτά [17]	Τοιχώματα
Πυκνότητα, ρ [Kg/m ³]	1.225	700	30
Θερμοχωρητικότητα, C_p [J/KgK]	1006.43	2310	1500
Αγωγιμότητα, k , [W/m]	0.0242	0.036	0.173
Ιξώδες, μ , [Pasec]	1.789×10^{-5}	-	-
Απορροφητικότητα, α	0	0.71/0.95	0.56/0.48
Συντελεστής διάθλασης, n	1	2.69/1.58	5/3
Συντελεστής εκπομπής, ε	0.05	0.59	0.45
Περατότητα, τ	1	0.08/0	0/0.25

4.3 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Όλα τα ανοίγματα από τα οποία είναι δυνατόν να εισέλθει ή να εξέλθει εξωτερικός αέρας (κάτω άνοιγμα μεταξύ οικίσκου και φυτών, άνω άνοιγμα μεταξύ φυτών και σκιάστρου δεξιά και άνω άνοιγμα μεταξύ οικίσκου και σκιάστρου αριστερά) θεωρούνται θέσεις με σταθερή πίεση ίση με την ατμοσφαιρική. Η φορά της ροής καθορίζεται από την συνολική εξέλιξη του προβλήματος και συνεπώς από τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται. Η θερμοκρασία τίθεται ίση με τη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα. Το πάτωμα του οικίσκου θεωρείται ισόθερμος τοίχος. Τα αναρριχώμενα φυτά θεωρούνται πορώδες μέσο το οποίο εισάγει πτώση πίεσης στη κίνηση του αέρα και επιπλέον συμμετέχουν με τις τροποποιημένες θερμικές και οπτικές ιδιότητες στη μετάδοση θερμότητας και ακτινοβολίας. Η εξωτερική τους επιφάνεια θεωρείται τοίχος με μηδενική διατμητική τάση, στον οποίο επιβάλλεται μικτή θερμική οριακή συνθήκη (μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας και συναγωγής με συντελεστή συναγωγής $\alpha=7.1$ W/mk) και προσπίπτει κάθετα ηλιακή ακτινοβολία όλη στο πρώτο από τα δύο φάσματα, όπως δίνεται στον πίνακα 2. Το εσωτερικό πορώδες είναι συζευγμένο με την εξωτερική επιφάνεια ώστε να μεταφέρει τις τιμές των επιλυόμενων παραμέτρων. Τα τοιχώματα του οικίσκου και το εσωτερικό του σκιάστρου αντιμετωπίζονται ως αδιαφανή στερεά μέσα στα οποία επιλύονται μόνο οι εξισώσεις ενέργειας και ακτινοβολίας. Η τιμή του συντελεστή απορρόφησης στην πρώτη κλάση μήκους κύματος είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται ότι η μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία θα απορροφηθεί πλήρως από τα πρώτα υπολογιστικά κελιά. Οι εξωτερικές επιφάνειες του βόρειου τοίχου και του σκέπαστρου είναι τοίχοι με μικτή θερμική οριακή συνθήκη στις οποίες η κάθετα προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία δίνεται επίσης στον πίνακα 2 και όλοι οι εσωτερικοί τοίχοι είναι συζευγμένοι ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά των τιμών των παραμέτρων. Ο συντελεστής θερμικής συναγωγής στον εξωτερικό τοίχο του σκέπαστρου λαμβάνεται $\alpha=20$ W/mK και στον βόρειο τοίχο $\alpha=7.1$ W/mk.

4.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Εξεταστήκαν 6 περιπτώσεις που αντιστοιχούν σε 6 διαφορετικές ώρες της 22ας Αυγούστου. Οι τιμές που τέθηκαν στην εξωτερική θερμοκρασία καθώς και στην προσπίπτουσα ακτινοβολία ελήφθησαν από μετρήσεις που αφορούν την 22^η Αυγούστου 2006 και έγιναν στο πλαίσιο της εργασίας [18] σε οικίσκο με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Η μεταβολή των οριακών συνθηκών συνοψίζεται στον ακόλουθο πίνακα. Σε ότι αφορά τις ακτινοβολίες πρόκειται για την τιμή της κάθετης συνιστώσας πάνω στην κάθε επιφάνεια.

Πίνακας 2. Παραμετρική μελέτη

Ωρα	Θερμοκρασία, T [K]	Ακτινοβολία στα φυτά [W/m ²]	Ποσοστό διάχυτης ακτινοβολίας στα φυτά [%]	Ακτινοβολία Στο βόρειο τοίχο [W/m ²]	Ποσοστό διάχυτης ακτινοβολίας στο βόρειο τοίχο [%]	Ακτινοβολία στο κεκλιμένο σκέπαστρο [W/m ²]	Ποσοστό διάχυτης ακτινοβολίας στο κεκλιμένο σκέπαστρο [%]
8	297	146	100	73	100	220	70
10	302	585	52	290	100	575	30
12	305	820	53	410	100	793	25
14	307	854	48	420	100	828	18
16	307	602	53	300	100	608	21
18	305	207	74	100	100	239	41

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στον ακόλουθο πίνακα δίνονται οι μέσες θερμοκρασίες μέσα στον οικίσκο, t_{room} , στο διάκενο μεταξύ οικίσκου και φυτών, t_{gap} , στην ηλιασμένη επιφάνεια του σκέπαστρου, t_{wS} , και στη σκιασμένη επιφάνεια, t_{wsh} , όπως προκύψαν από την αριθμητική προσομοίωση για τις 6 περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

Πίνακας 3. Θερμοκρασίες επιφανειών – αριθμητική προσομοίωση

Ωρα	T_{room} [C]	T_{gap} [C]	T_{wS} [C]	T_{wsh} [C]
8	17.14	14.35	25.69	17.49
10	25.21	27.75	33.6	26.79
12	25.53	32.07	38.4	31.36
14	27.25	33.97	40.33	32.91
16	27.09	33.69	38.31	32.03
18	24.49	30.94	33.05	28.37

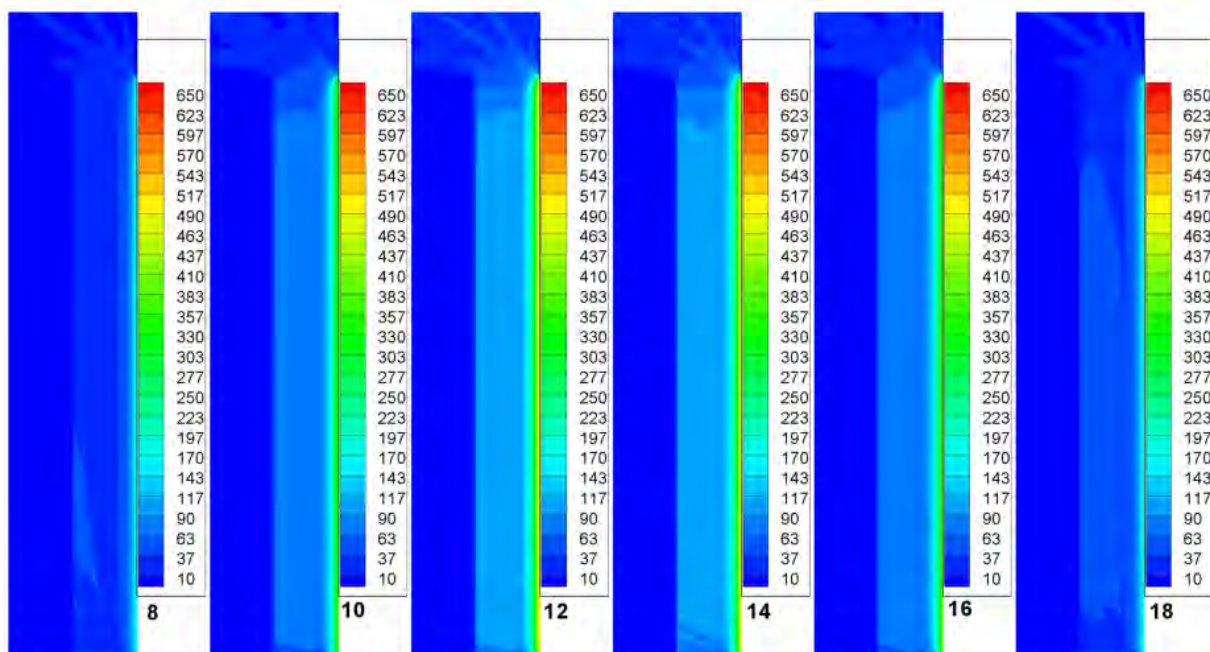
Προς σύγκριση παρατίθενται τα αποτελέσματα των αντίστοιχων μετρήσεων και της προσομοίωσης της εργασίας [18]. Από τη σύγκριση προκύπτει ότι η θερμοκρασία της ηλιαζόμενης επιφάνειας και του διάκενου τις πρωινές ώρες υπερτιμάται από την προσομοίωση ενώ τις απογευματινές υποτιμάται. Το αντίθετο συμβαίνει με τη σκιασμένη επιφάνεια. Μια βασική αιτία της συμπεριφοράς αυτής είναι ότι η προσομοίωση αφορά μόνιμη κατάσταση στην οποία δεν έχει ληφθεί υπόψη η θερμοαποθήκευση. Ένας άλλος παράγοντας είναι η ακρίβεια σε ότι αφορά τις θερμικές και κυρίως τις οπτικές ιδιότητες των υλικών και κυρίως των αναρριχητικών φυτών.

Πίνακας 4. Θερμοκρασίες επιφανειών – μετρήσεις [18]

Ωρα	T_{gap} [C]	T_{wS} [C]	T_{wsh} [C]
8	18.83	17.8	17.52
10	22.95	31.63	23.99
12	27.77	38.81	28.05
14	33.37	51.07	33.61
16	37.95	48.88	36.91
18	39.21	38.08	39.13

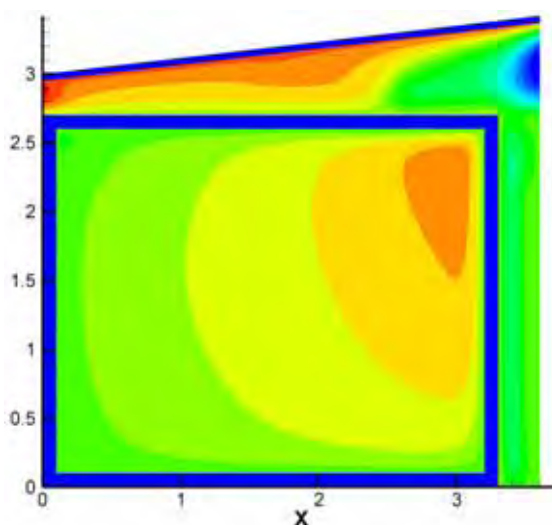
Στο σχήμα 2 δίνεται η προσπίπτουσα ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος ($\lambda=0-1.1 \mu m$) στο νότιο τοίχο του οικίσκου που σκιάζεται από τα φυτά, σε διαφορετικές ώρες της ημέρας. Από το σχήμα προκύπτει ότι τα φυτά αποτρέπουν τη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας σε

σημαντικό βαθμό επιτρέποντας μόνο μικρές ποσότητες να φτάσουν μέχρι το νότιο τοίχο. Η ακτινοβολία δίνεται σε $[W/m^2]$.

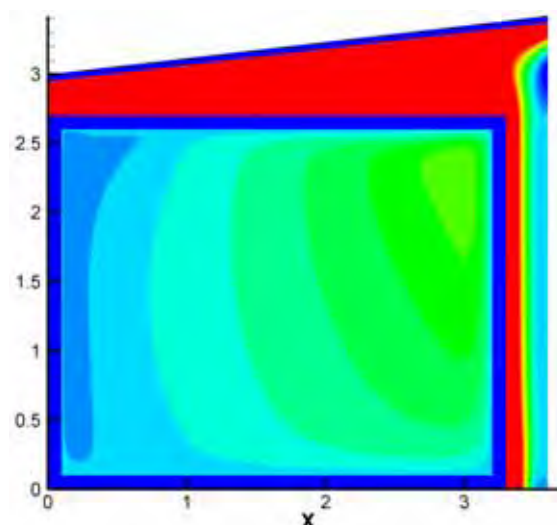


Σχήμα 2. Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ($\lambda=0-1.1 \mu m$) διαμέσου των αναρριχητικών φυτών στο Νότιο τοίχο

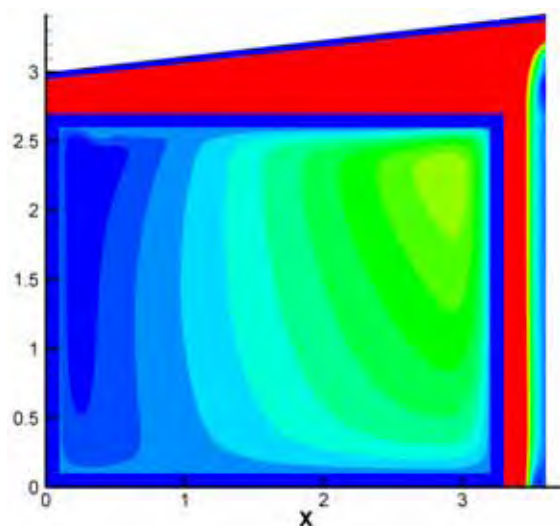
Στο σχήμα 3 δίνονται οι κατανομές της ροϊκής συνάρτησης ροής (stream function) μέσα και έξω από τον οικίσκο σε διαφορετικές ώρες της ημέρας. Σε ότι αφορά το διάκενο μεταξύ οικίσκου και σκιάστρων εμφανίζεται μια λειτουργία που προσομοιάζει την ηλιακή καμινάδα με τον εξωτερικό αέρα να θερμαίνεται ανάμεσα στον οικίσκο και τα φυτά και να ανυψώνεται λόγω άνωσης. Αρκετά πιο περίπλοκη είναι η ροή κάτω από το σκίαστρο με ανακυκλοφορίες να αναπτύσσονται (περισσότερες τις πρωινές και απογευματινές ώρες παρά τις μεσημεριανές) και να ωθούν τον αέρα έξω από τα ανοίγματα. Σε ότι αφορά το εσωτερικό του οικίσκου το πρότυπο της ροής είναι πιο απλό με μια μεγάλη ανακυκλοφορία κοντά στο νότιο τοίχο και μια μικρή στην άνω γωνία του βόρειου τοίχου. Η μικρή ανακυκλοφορία μεγαλώνει προς τις μεσημεριανές ώρες καταλαμβάνοντας σημαντικό μέρος του οικίσκου και μειώνεται ξανά τις απογευματινές.



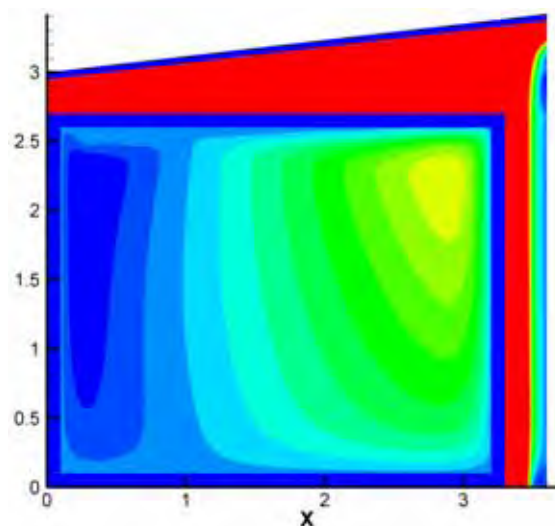
Ροϊκή συνάρτηση 8h



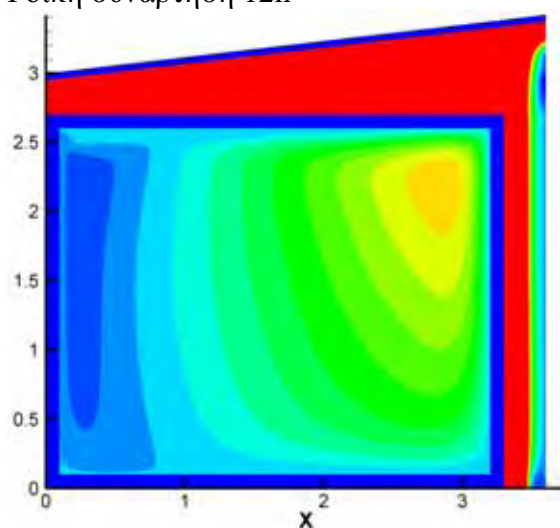
Ροϊκή συνάρτηση 10h



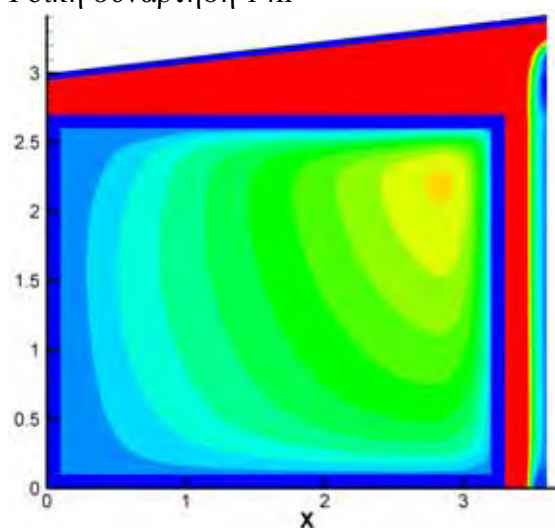
Ροϊκή συνάρτηση 12h



Ροϊκή συνάρτηση 14h



Ροϊκή συνάρτηση 16h



Ροϊκή συνάρτηση 18h

Σχήμα 3. Κατανομή ροϊκής συνάρτησης στο υπολογιστικό πεδίο

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία προσομοιώθηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων τα φαινόμενα μεταφοράς, που λαμβάνουν χώρα μέσα και γύρω από έναν οικίσκο με σκίαστρο του οποίου η νότια πλευρά σκιάζεται επιπλέον από αναρριχητικά φυτά. Η προσομοίωση έλαβε υπόψη τις θερμικές και οπτικές ιδιότητες των φυτών τα οποία επιτρέπουν μόνο εν μέρει τη διέλευση της μικρού μήκους κύματος ηλιακής ακτινοβολίας. Για την προσομοίωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και της μετάδοσης αυτής μέσα στο υπολογιστικό πεδίο χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο DO. Η παρούσα μελέτη μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένα πρώτο βήμα πριν τη μελέτη της μη-μόνιμης 3Δ πραγματικής ροής και των φαινομένων που σχετίζονται με αυτή.

Σε ότι αφορά τη ροή αυτή αναπτύσσεται αποκλειστικά λόγω της θερμικής άνωσης με αποτέλεσμα η ροή στο διάκενο μεταξύ οικίσκου και σκιάστρων (φυτά και άνω σκίαστρο) να συμπεριφέρεται σαν ηλιακή καμινάδα ενώ εσωτερικά σαν κλειστή θερμαινόμενη κοιλότητα.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει σημαντική μείωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά μέσο όρο της τάξης του 50% με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά το θερμικό φορτίο

του οικίσκου. Η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας από την πειραματική οφείλεται κυρίως στο φαινόμενο της θερμοαποθήκευσης που δε λαμβάνεται υπόψη στη μόνιμη ροή καθώς και στις πραγματικές τιμές των θερμικών και οπτικών ιδιοτήτων των φυτών.

Μελλοντική εργασία μπορεί να αφορά παραμετρική μελέτη της 3Δ μη-μόνιμης ροής κατά τη διάρκεια μιας πλήρους ηλιακής ημέρας καθώς και των θερμικών και οπτικών ιδιοτήτων των δομικών υλικών και των φυτών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Akbari, H., Kurn, D.M., Breatz, S.E. & Hanford, J.W., 'Peak power and cooling energy savings of shade tress', *Energy and Building*, 25, 139-148, 1997.
2. Papadakis, G., Tsamis, P. & Kyritsis, S., 'An experimental investigation of the effect of shading with plants for solar control of buildings', *Energy and Buildings*, 33, 831-836, 2001.
3. Tzachanis, A. & Sdravopoulou, C., 'Simulation of the periodic steady heat gain in buildings', *Proc. 2nd IASTED International Conference on Power and Energy Systems (Euro PES 2002)*, 388-394.
4. Liu, Y. & Harris, D.J., 'Effects of shelterbelt tress on reducing heating-energy consumption of office buildings in Scotland', *Applied Energy*, 85, 115-127, 2008.
5. Miyazaki, T., Akisawa, A., & Kashwagi, T., 'The effects of solar chineys on thermal load mitigation of office buildings under the Japanese climate', *Ren. Energy*, 31, 987-1010, 2006.
6. Guohui, Gan, 'Simulation of buoyancy – induced flow in open cavities for natural ventilation', *Energy and Buildings*, 38, 410-420, 2006.
7. Ali-Toudert, F. & Mayer, H., 'Effects of asymmetry comfort in urban street canyons', *Solar Energy*, 81, 742-754, 2007.
8. Baxevanou, C.A., Fidaros, D.K. and Tzachanis, A.D., 'Plant's shading effect in a test cell – a CFD study', *Proc IASTED 'Applied Simulation and Modelling'*, 23-25/6/08, Corfu, 2008.
9. Launder, B. E. and Spalding, D. B., 'The numerical computation of turbulent flows', *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3, 269-289, 1974.
10. Ferziger, J.H. & Peric, M., 'Computational Methods for Fluid Dynamics', Springer, London, 1996.
11. Chui, E.H., Raithby, G.D., 'Computation of radiant heat transfer on a nonorthogonal mesh using the finite-volume method', *Num. Heat Transfer. Part B*, 23, 269-288, 1993.
12. Raithby, G.D., Chui, E.H., 'A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media', *Transactions of ASME Journal of Heat Transfer* 112, 415-423, 1990.
13. Murthy, J.Y., Mathur, S.R., 'Finite Volume Method For Radiative Heat Transfer Using Unstructured Meshes', *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 12, 313-321, 1998.
14. Raithby, G.D., 'Discussion of the finite-volume method for radiation, and its application using 3D unstructured meshes', *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals* 35, 1999.
15. Kim, S.H., Huh, K.Y., 'A new angular discretization scheme of the finite volume method for 3-D radiative heat transfer in absorbing, emitting and anisotropically scattering media', *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43, 1233-1242, 2000.
16. Wilcox, D.C., 'Comparison of two-equation turbulence models for boundary layers with pressure gradient', *AIAA Journal*, Vol. 31, pp. 1414-1421, 1994.
17. Chou, S.K., Chua, K.J., Ho, J.C., Ooi, C.L., 'On the study of an energy-efficient greenhouse for heating, cooling and dehumidification applications', *Applied Energy* 77, 355–373, 2004.
18. Tzachanis, A., 'The contribution of natural shading with climbing plants to the energy balance of a building', *Geotechnical Scientific Topics of GEOTEE*, 2008, accepted for publication.

Η ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΦΥΤΕΜΕΝΩΝ ΔΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΦΥΤΕΜΕΝΩΝ ΟΨΕΩΝ ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΝΗΣΟΥ ΣΤΗ Β' ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

Ελευθερία Αλεξανδρή

Τμήμα Κτιρίων, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, 19009 Πικέρμι,
e-mail: alexandri@cres.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

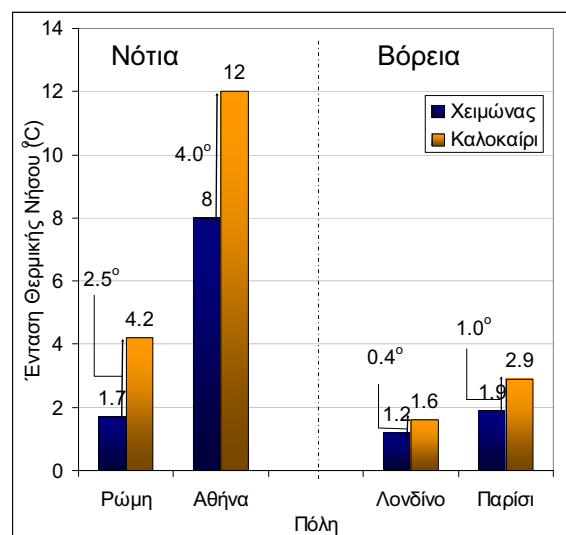
Σε αυτό το άρθρο εξετάζεται κατά πόσο θα μπορούσε να μετριάσει το φαινόμενο θερμικής νήσου στην Αθήνα, εάν τα κτιριακά κελύφη στο κέντρο της πόλης καλύπτονταν με χαμηλή βλάστηση (φυτεμένα δώματα και φυτεμένες όψεις). Για να εξεταστεί αυτό το φαινόμενο, αναπτύχθηκε ένα δισδιάστατο, μικροκλιματικό μοντέλο μεταφοράς θερμότητας και μάζας, το οποίο συγκρίθηκε και με πειραματικές διατάξεις, ικανό να περιγράψει με ακρίβεια τις επιρροές των δομικών στοιχείων και των φυτών στο δομημένο περιβάλλον. Τα αποτελέσματα για διάφορες γεωμετρίες κτιρίων, προσανατολισμούς, και γεωμετρίες φύτευσης εξετάζονται αναλυτικά και άγονται συμπεράσματα σχετικά με το κατά πόσο και σε ποιες περιπτώσεις τα φυτεμένα δώματα και οι φυτεμένες όψεις μπορούν να μειώσουν κατά τη θερινή περίοδο τις αυξημένες θερμοκρασίες στο κέντρο της πόλης. Τα αποτελέσματα αυτά ανάγονται στην εξοικονόμηση ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί για κλιματισμό, λόγω των χαμηλότερων αστικών θερμοκρασιών καθώς και στο κατά πόσο τα φυτεμένα δώματα και οι φυτεμένοι τοίχοι μπορούν να βελτιώσουν τις συνθήκες θερμικής άνεσης στο κέντρο της πόλης και κατά συνέπεια να μειωθούν οι απώλειες ανθρώπινων ζώων που σχετίζονται με υψηλές θερμοκρασίες.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οποιαδήποτε αλλαγή στην επιφάνεια της Γης μπορεί να αποφέρει σημαντικές αλλαγές στο τοπικό ή το συνολικό κλίμα του πλανήτη. Αλλαγές μπορεί να οφείλονται είτε σε φυσικά αίτια (π.χ. τεκτονική δραστηριότητα) ή σε ανθρωπογενή αίτια. Μία από τις μεγαλύτερες αλλαγές στην επιφάνεια της Γης με ανθρωπογενή αίτια, με άμεσο αντίκτυπο στο ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη, ήταν η αποψίλωση των δασών του Βορείου Ημισφαιρίου, η οποία ξεκίνησε σε μικρή κλίμακα πριν από 5.000 χρόνια, προκειμένου να μετατραπούν τα δάση σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις, γεγονός που προκάλεσε κλιματική αλλαγή εκείνη την περίοδο [1]. Σε πιο τοπική κλίμακα, η μετατροπή φυτεμένων εκτάσεων (δασών ή καλλιεργειών) σε αστικό περιβάλλον, μοιραία προκαλεί κλιματικές αλλαγές τοπικού χαρακτήρα, φαινόμενο γενικώς γνωστό με τον όρο «φαινόμενο θερμικής νήσου». Αν και οι αλλαγές μεταξύ του αστικού και του αγροτικού περιβάλλοντος, από άποψη ποιότητας του αέρα, είχαν επισημανθεί από τα Ρωμαϊκά χρόνια [2], οι θερμοκρασιακές διαφορές της αστικής κλιματολογίας καταγράφηκαν επιστημονικώς το 1820 από τον Luke Howard, ο οποίος μελέτησε το φαινόμενο θερμικής νήσου του Λονδίνου [3]. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του φαινομένου θερμικής νήσου είναι οι γενικά αυξημένες θερμοκρασίες στο κέντρο της πόλης. Για μεγάλα αστικά κέντρα, σε θερμά κλίματα, η περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας στις πόλεις τη θερινή περίοδο, δεν είναι καθόλου βιώσιμη, τόσο από πλευράς κατανάλωσης ενέργειας, όσο και από πλευράς υγείας και ασφάλειας των κατοίκων. Η μεγαλύτερη αστική συγκέντρωση στον Ελλαδικό χώρο παρατηρείται στη Β' κλιματική ζώνη, στην περιοχή της Αθήνας, η οποία έχει και μικρή

αναλογία ανοιχτών χώρων μόνο 2,7 m²/κεφαλή, και συνεπώς πολύ λίγους πράσινους χώρους στον αστικό της ιστό. Εν συγκρήσει, οι ανοιχτοί χώροι στη Ρώμη είναι 9,9 m²/κεφαλή, στο Παρίσι 8,4 m²/κεφαλή και στο Λονδίνο 15,0 m²/κεφαλή [4]. Η μέση ετήσια ένταση της θερμικής νήσου της Αθήνας έχει καταγραφεί στους +10,0°C [5]. Εν συγκρίσει, η μέση ετήσια ένταση θερμικής νήσου του Λονδίνου έχει καταγραφεί στους +1,4°C [3].

Η ένταση θερμικής νήσου δεν είναι μία σταθερή τιμή, αλλά διαφοροποιείται στο χώρο (π.χ. εάν υπολογίζεται σε μια πυκνοκατοικημένη ή αραιοκατοικημένη περιοχή ή σε πάρκο) και το χρόνο (τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας, όσο και κατά τις διάφορες εποχές του χρόνου). Γενικά, τείνει να έχει μεγαλύτερη τιμή το καλοκαίρι, σε σχέση με το χειμώνα. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η ένταση θερμικής νήσου για το χειμώνα και το καλοκαίρι, για δύο μεγαλουπόλεις του Νότου και δύο μεγαλουπόλεις του Βορρά της Ευρώπης. Παρατηρείται ότι η διαφορά μεταξύ της έντασης θερμικής νήσου του χειμώνα και του καλοκαιριού είναι μεγαλύτερη για τις πόλεις του Νότου σε σχέση με του Βορρά. Στην Αθήνα, η ένταση θερμικής νήσου τη θερινή περίοδο φτάνει τους +12,0°C, 4,0°C παραπάνω από ό,τι το χειμώνα, ενώ σε αντίθεση, στο Λονδίνο, η διαφορά μεταξύ χειμερινής και θερινής έντασης είναι μόνο 0,4°C. Είναι λοιπόν σημαντικό, ιδιαίτερα για τις μεγαλουπόλεις του Νότου, όπως η Αθήνα, να βρεθούν τεχνικές που να μειώνουν σε ικανοποιητικά επίπεδα την αστική θερμοκρασία κατά τη θερινή περίοδο. Μια τέτοια τεχνική είναι η φύτευση των δωματίων και των όψεων των κτιρίων με χαμηλή βλάστηση.

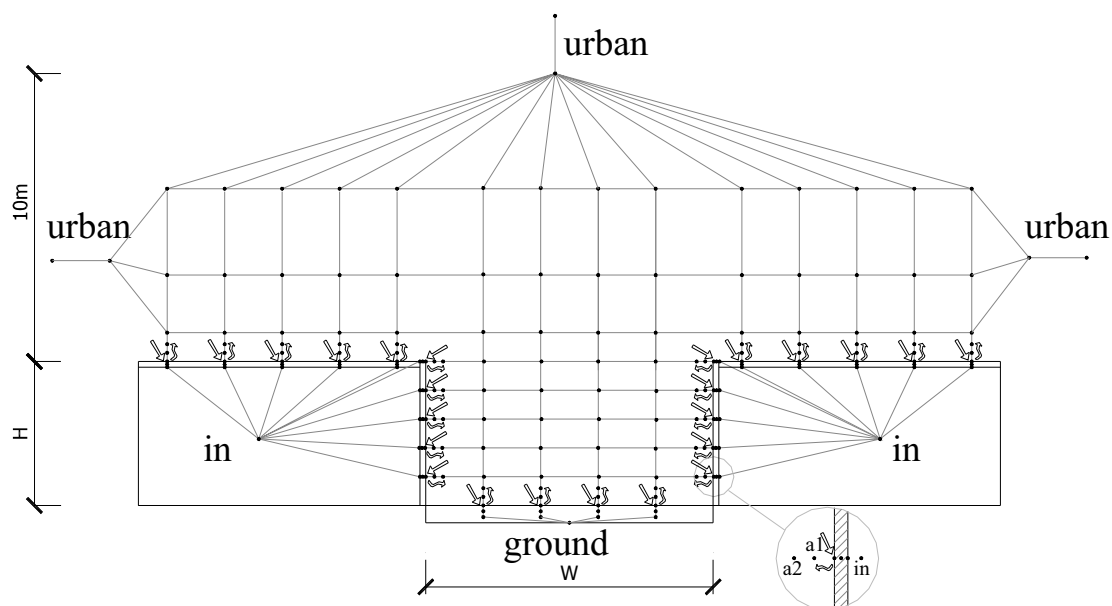


Εικόνα 1: Θερινή και χειμερινή ένταση θερμικής νήσου για πόλεις της Νότιας και Βόρειας Ευρώπης (Πηγές: [3], [5], [6], [7])

2. ΑΝΑΛΥΣΗ

Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί το δυναμικό της μείωσης της θερμοκρασίας της πόλης της Αθήνας τη θερινή περίοδο μέσω των φυτεμένων όψεων και δωματίων, εκπονήθηκε παραμετρική μελέτη, σχετικά με το πώς η ποσότητα και γεωμετρία της φύτευσης, καθώς και η αστική γεωμετρία επηρεάζουν τις θερμοκρασιακές μειώσεις. Με τη δημιουργία ενός δισδιάστατου, μικροκλιματικού, δυναμικού μοντέλου μεταφοράς θερμότητας και μάζας, ο οποίος ελέγχθηκε με πειραματική διάταξη [8], περιγράφεται το προφίλ θερμοκρασίας μεταξύ δύο οικοδομικών τετραγώνων για ένα εικοσιτετράωρο του πιο θερμού μήνα της περιοχής, του Ιουλίου. Τα κλιματικά χαρακτηριστικά (θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία, ταχύτητα ανέμου) εισάγονται στους οριακούς κόμβους του μοντέλου, 10m πάνω από τις οροφές των κτιρίων. Η ηλιακή ακτινοβολία εισάγεται στους κόμβους των επιφανειών, ανάλογα με τον

προσανατολισμό τους, την κλίση και τη σκίασή τους. Η σκίαση υπολογίστηκε από το λογισμικό ECOTECT [9], ενώ η ταχύτητα του αέρα σε κάθε κόμβο, μέσω του κώδικα CFD WinAir4 [10].



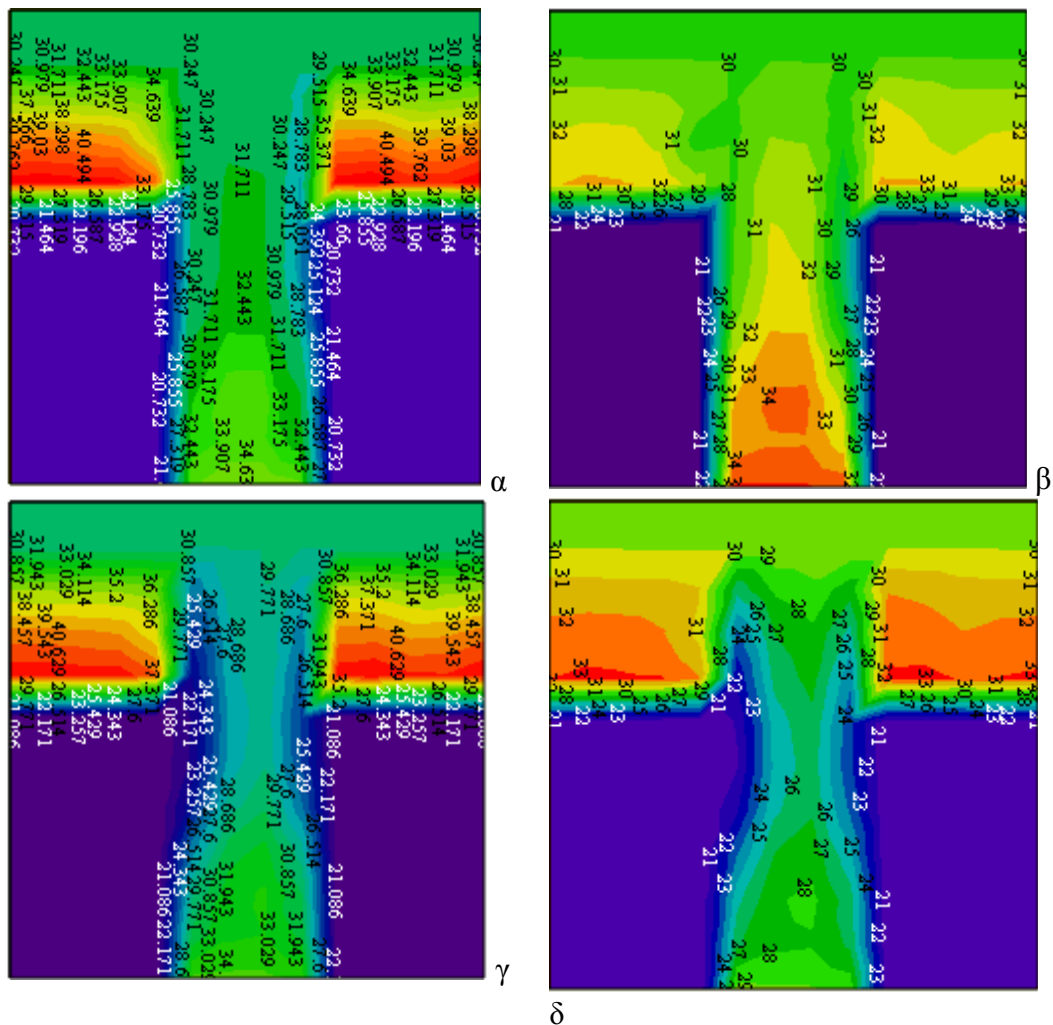
Εικόνα 2: Δυσδιάστατο, δυναμικό, μικροκλιματικό μοντέλο μεταφοράς θερμότητας και μάζας

Εξετάστηκαν τέσσερα σενάρια φύτευσης του κτιριακού κελύφους: ένα όπου δεν υπάρχει καθόλου φύτευση [no gr], ένα όπου μόνο τα δώματα είναι καλυμμένα με γρασίδι [gr r], ένα όπου οι τοίχοι μόνο είναι καλυμμένοι με αναρριχητικά φυτά [gr w] και ένα όπου και οι τοίχοι και τα δώματα είναι καλυμμένα με φυτά [gr a]. Ο λόγος του ύψους των κτιρίων (H) προς το πλάτος του δρόμου (W) επιλέγεται σύμφωνα με τη ροή του αέρα που δημιουργείται, έτσι επιλέγεται η περίπτωση που ο λόγος H/W ισούται με 2,00 (πολύ χαμηλές ταχύτητες αέρα και μεγάλες σκιάσεις), η περίπτωση όπου $H/W=0,50$, όπου έχουμε μεγαλύτερη ανάμειξη των αέριων μαζών και μικρότερες σκιάσεις και η περίπτωση όπου $H/W=0,33$ (μεγαλύτερες ταχύτητες αέρα, μικρότερη σκίαση). Οι γεωμετρίες αυτές εξετάζονται με δύο προσανατολισμούς: α) ο κύριος άξονας του δρόμου είναι παράλληλος με τον άξονα Ανατολής-Δύσης και β) ο κύριος άξονας του δρόμου είναι παράλληλος με τον άξονα Βορρά-Νότου.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

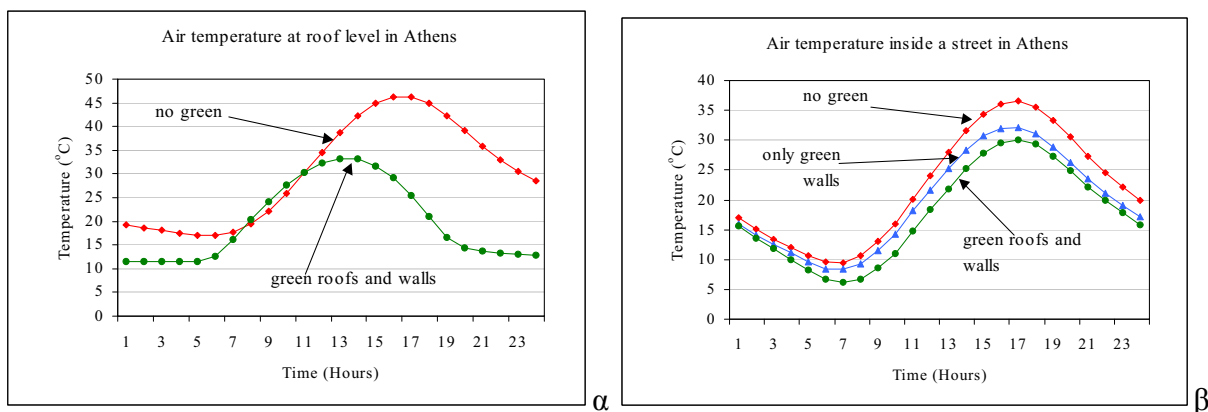
Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η θερμοκρασιακή κατανομή στον αέρα μέσα στο δρόμο και πάνω από τις οροφές των κτιρίων, στις 14:00, για μια τυπική ημέρα του Ιουλίου, στην Αθήνα. Παρατηρείται ότι όταν δεν υπάρχει καθόλου βλάστηση (περίπτωση α), η θερμοκρασία του αέρα πάνω από τα ασκίαστα δώματα ξεπερνά τους 40°C , ενώ η θερμοκρασία του αέρα στο ύψος του δρόμου ξεπερνά τους 34°C . Στην περίπτωση (β), όπου τα δώματα είναι φυτεμένα, η θερμοκρασία του αέρα πάνω από τα δώματα πλέον μειώνεται στους 33°C , ενώ στο επίπεδο του δρόμου εξακολουθεί να είναι της τάξης των 34°C , χωρίς να επηρεάζεται από την ύπαρξη των φυτεμένων δωματίων. Στην περίπτωση (γ), όπου μόνο οι όψεις είναι φυτεμένες, η θερμοκρασία στα αφύτευτα δώματα ξεπερνά τους 40°C , ενώ η θερμοκρασία του αέρα στο ύψος του δρόμου μειώνεται στους 33°C . Στην περίπτωση που και τόσο οι όψεις και τα δώματα είναι φυτεμένα (περίπτωση δ), παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες μειώσεις θερμοκρασίας αέρα, καθώς οι αέριες μάζες που ψύχονται από τα δώματα και εισέρχονται ψυχρότερες στην αστική χαράδρα και, σε συνδυασμό με το δροσισμό από τους

φυτεμένους τοίχους, καταφέρνουν να μειώσουν αισθητά τη θερμοκρασία στο επίπεδο του δρόμου στους 28°C, ενώ στα δώματα η θερμοκρασία του αέρα είναι μειωμένη στους 33°C.



Εικόνα 3: Θερμοκρασίες αέρα γύρω από κτίρια και δρόμο, στις 14:00, τυπική μέρα του Ιουλίου στην Αθήνα για γεωμετρία H/W=0,50, με άξονα δρόμου παράλληλο με τον άξονα Ανατολής – Δύσης για (α) κτίρια χωρίς φύτευση, (β) κτίρια με φυτεμένα δώματα, (γ) κτίρια με φυτεμένους τοίχους, (δ) κτίρια με φυτεμένα δώματα και φυτεμένους τοίχους

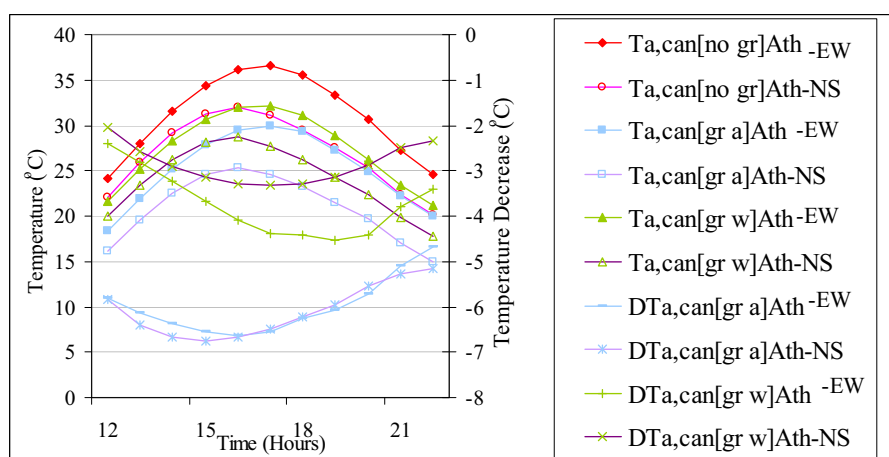
Οι θερμοκρασιακές αυτές διαφορές μπορούν να παρατηρηθούν και στα επόμενα διαγράμματα, όπου παρουσιάζονται οι θερμοκρασιακές κατανομές στον αέρα 1m πάνω από το δώμα και στον αέρα 1m πάνω από το επίπεδο του δρόμου, αντίστοιχα, για τις διάφορες καταστάσεις φύτευσης που εξετάζονται. Για ένα τυπικό εικοσιτετράωρο του Ιουλίου, η μέγιστη θερμοκρασία του αέρα 1m πάνω από το δώμα από ωπλισμένο σκυρόδεμα φτάνει μέγιστη τιμή 46,2°C, με μέση τιμή κατά τη διάρκεια της ημέρας στους 35,3°C. Όταν το δώμα φυτεύεται, οι τιμές αυτές ελαττώνονται στους 33,2°C και 25,4°C, αντίστοιχα. Ομοίως, στο επίπεδο του δρόμου, όταν δεν υπάρχει φύτευση στο κτιριακό κέλυφος, η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται 1m πάνω από την επιφάνεια του δρόμου είναι 36,5°C, με μέση τιμή κατά τη διάρκεια της ημέρας στους 25,7°C. Όταν μόνο οι όψεις καλύπτονται με φυτά, η θερμοκρασία στο επίπεδο του δρόμου ελαττώνεται, με μέγιστη τιμή 32,1°C και 22,7°C μέση ημερήσια. Όταν και τα δώματα και οι όψεις φυτεύονται, η θερμοκρασία του αέρα 1m πάνω από το επίπεδο του δρόμου μειώνεται σε 29,9°C μέγιστο και 20,1°C μέση ημερήσια τιμή.



Εικόνα 4: Θερμοκρασία αέρα (α) 1m πάνω από το δώμα και (β) 1m πάνω από το επίπεδο του δρόμου

3.1. Προσανατολισμός

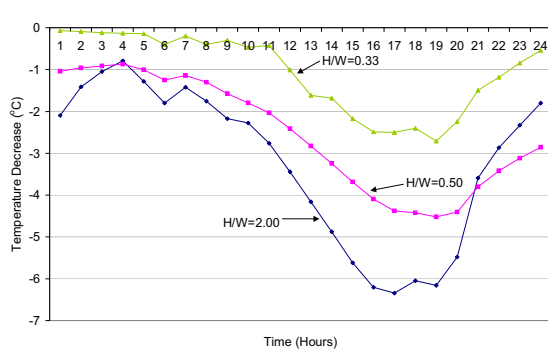
Ο προσανατολισμός του δρόμου καθορίζει την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνουν οι επιφάνειες των κατακόρυφων επιφανειών. Στην Αθήνα, μια τυπική μέρα του Ιουλίου, οι Νότια προσανατολισμένες κατακόρυφες επιφάνειες λαμβάνουν μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία της τάξης των 374W/m^2 , ενώ οι Ανατολικά προσανατολισμένες επιφάνειες λαμβάνουν μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία της τάξης των 617W/m^2 . Αυτές οι διαφορές έχουν άμεσο αποτελέσματα στο πώς επιδρά η φύτευση των επιφανειών στη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα. Για τους δύο εξεταζόμενους προσανατολισμούς, όταν και τα δώματα και οι όψεις είναι φυτεμένα, η επιρροή αυτή ελαχιστοποιείται, με τη θερμοκρασία του αέρα στο επίπεδο του δρόμου να μειώνεται κατά $5,6^\circ\text{C}$ για το δρόμο με άξονα Ανατολής-Δύσης και $5,5^\circ\text{C}$ για τον άξονα Βορρά-Νότου, για τις μέσες τιμές και κατά $6,6^\circ\text{C}$ και $6,8^\circ\text{C}$, αντίστοιχα, για τις μέγιστες τιμές. Όταν μόνο οι όψεις είναι φυτεμένες, η επιρροή του προσανατολισμού είναι μεγαλύτερη, με τη μέση θερμοκρασία αέρα να μειώνεται κατά $3,0^\circ\text{C}$ στο δρόμο με άξονα Ανατολής-Δύσης και κατά $2,2^\circ\text{C}$ στο δρόμο με άξονα Βορρά-Νότου, με αντίστοιχες τιμές για τα μέγιστα $4,5^\circ\text{C}$ και $3,3^\circ\text{C}$.



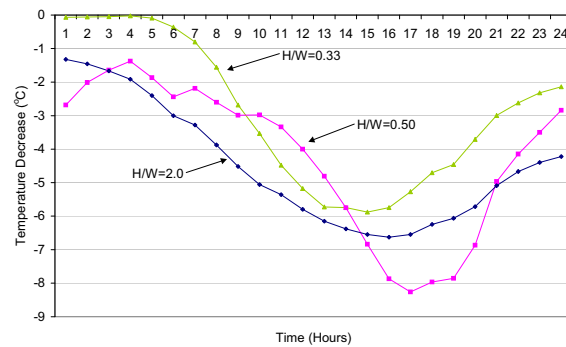
Εικόνα 5: Θερμοκρασίες αέρα και μείωση της θερμοκρασίας αέρα για διαφορετικούς προσανατολισμούς για λόγο $H/W=0,50$, στην περίπτωση που δεν υπάρχει φύτευση [no gr], στην περίπτωση που και τα δώματα και οι όψεις είναι φυτεμένα [gr a] και στην περίπτωση που μόνο οι όψεις είναι φυτεμένες [gr w], για τους προσανατολισμούς Ανατολής-Δύσης (EW) και Βορρά-Νότου (NS)

3.2 Γεωμετρία

Όσο πιο μικρή είναι η αναλογία ύψους κτιρίου προς πλάτος δρόμου, τόσο μικρότερη είναι η επιρροή των φυτεμένων δωμάτων και όψεων στη μείωση των αστικών θερμοκρασιών. Η μείωση της θερμοκρασίας για λόγο ύψους κτιρίων προς πλάτος δρόμου (H/W) ίσο με 0,33, ισούται με $1,5^{\circ}\text{C}$ για τη μέση ημερήσια τιμή και $2,7^{\circ}\text{C}$ για τις μέγιστες τιμές, όταν μόνο οι όψεις είναι φυτεμένες (Εικόνα 6α). Όταν και τα δώματα και οι όψεις έχουν φυτευθεί, η επιρροή τους είναι μεγαλύτερη με τα παραπάνω νούμερα να γίνονται $4,2^{\circ}\text{C}$ και $5,9^{\circ}\text{C}$, αντίστοιχα (Εικόνα 6β). Για τη γεωμετρία με λόγο H/W ίσο με 0,50, η μείωση της θερμοκρασίας του αέρα είναι πιο αισθητή λόγω φυτεμένων δωμάτων και όψεων. Όταν μόνο οι όψεις είναι φυτεμένες, η μέση ημερήσια τιμή μειώνεται κατά $3,0^{\circ}\text{C}$, και κατά $4,5^{\circ}\text{C}$ μέγιστο. Όταν και τα δώματα και οι όψεις φυτεύονται, οι τιμές αυτές γίνονται $5,6^{\circ}\text{C}$ και $6,6^{\circ}\text{C}$, αντίστοιχα. Για τη γεωμετρία με λόγο H/W ίσο με 2,00, η επιρροή των φυτεμένων όψεων είναι μεγαλύτερη, με μείωση θερμοκρασίας αέρα κατά $4,2^{\circ}\text{C}$ για το μέσο ημερήσιο, και $6,3^{\circ}\text{C}$ μέγιστο. Όταν και τα δώματα και οι όψεις φυτεύονται, η ελάττωση της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη, με αντίστοιχες τιμές $5,3^{\circ}\text{C}$ και $8,3^{\circ}\text{C}$.



α

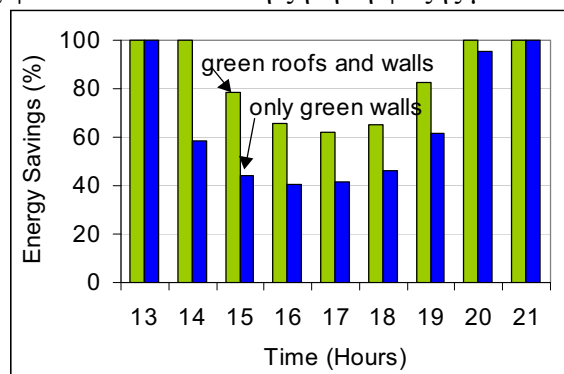


β

Εικόνα 6: Μείωση της θερμοκρασίας αέρα για διάφορους λόγους H/W όταν (α) μόνο οι όψεις καλύπτονται με φυτά και (β) και οι όψεις και τα δώματα καλύπτονται με φυτά

3.3 Εξοικονόμηση ενέργειας

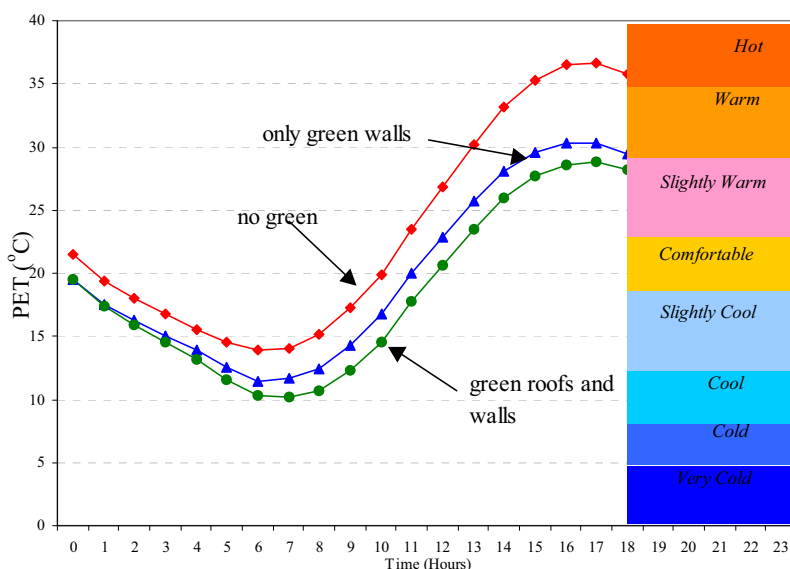
Η ελάττωση της θερμοκρασίας αέρα, σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν παραπάνω, οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για κλιματισμό τη θερινή περίοδο και σε βελτίωση της θερμικής άνεσης στους αστικούς χώρους. Η μείωση του ψυκτικού φορτίου για μια τυπική μέρα του Ιουλίου όταν είναι φυτεμένες οι όψεις κι όταν είναι φυτεμένα και τα δώματα και οι όψεις φαίνεται στην Εικόνα 7. Η μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται στην περίπτωση που φυτεύονται και τα δώματα και οι όψεις, με μείωση της ψυκτικής ζήτησης κατά 84% και κατά 4 ώρες για τη γεωμετρία $H/W=0,50$ και προσανατολισμό κατά τον άξονα Ανατολής-Δύσης. Όταν μόνο οι όψεις είναι φυτεμένες, η εξοικονόμηση ενέργειας φτάνει το 65% και η ζήτηση ψύξης μειώνεται κατά 2 ώρες.



Εικόνα 7: Εξοικονόμηση ενέργειας για κλιματισμό για τη γεωμετρία $H/W=0,50$ με προσανατολισμό Ανατολή-Δύση, όταν μόνο οι όψεις είναι φυτεμένες κι όταν και οι όψεις και τα δώματα είναι φυτεμένα

3.4 Θερμική Άνεση

Κάνοντας χρήση της Φυσιολογικής Ισοδύναμης Θερμοκρασίας (PET), η θερμική άνεση στο επίπεδο του δρόμου με γεωμετρία $H/W=0,50$ και διαφορετικές φυτεύσεις φαίνεται στην Εικόνα 8. Όταν δεν υπάρχει καθόλου φύτευση, η Φυσιολογικής Ισοδύναμης Θερμοκρασίας βρίσκεται για 4 ώρες στη ζώνη “πολύ θερμά”, για 4 ώρες στη ζώνη “θερμά” και για 5 ώρες στη ζώνη “ελαφρώς θερμά”. Βρίσκεται για μόνο 3 ώρες στη ζώνη “άνετα” και για 7 (νυχτερινές) ώρες στη ζώνη “ελαφρώς δροσερά”. Όταν φυτεύονται μόνο οι όψεις, η θερμική άνεση βελτιώνεται θεαματικά, χωρίς να περιλαμβάνεται καθόλου η ζώνη “πολύ θερμά”. Για 4 ώρες βρίσκεται στη ζώνη “θερμά”, για 5 στην “ελαφρώς θερμά” ζώνη και για 4 ώρες στη ζώνη “άνετα”. Τις πρώτες πρωινές και τις βραδινές ώρες βρίσκεται στην “ελαφρώς δροσερά” για 6 ώρες και στη “δροσερά” ζώνη για 4 ώρες. Όταν και τα δώματα και οι όψεις είναι φυτεύονται, η θερμική άνεση βελτιώνεται ακόμα περισσότερο, με τις ζώνες “πολύ θερμά” και “θερμά” να μην περιλαμβάνονται καθόλου στη θερμική αίσθηση. Η PET βρίσκεται στη ζώνη “ελαφρώς θερμά” για 8 ώρες και στη ζώνη “άνετα” για 4 ώρες. Τις πρώτες πρωινές και τις βραδινές ώρες βρίσκεται στην “ελαφρώς δροσερά” και “δροσερά” ζώνη για 6 και 5 ώρες, αντίστοιχα. Βελτιώσεις της θερμικής άνεσης στον αστικό χώρο, μπορούν να σημαίνουν πιο υγιή αστικά περιβάλλοντα, με χαμηλότερη αστική θνησιμότητα κατά την περίοδο αυξημένων θερινών αστικών θερμοκρασιών.



Εικόνα 8: Φυσιολογικής Ισοδύναμης Θερμοκρασίας (PET) για γεωμετρία $H/W=0,50$ με προσανατολισμό Ανατολή-Δύση, όταν δεν υπάρχει βλάστηση, όταν μόνο οι όψεις καλύπτονται με φυτά κι όταν και τα δώματα και οι όψεις είναι φυτεμένες

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη δείχθηκε ότι οι αστικές αυξημένες θερμοκρασίες για τα κλιματικά χαρακτηριστικά της Αθήνας (B' κλιματική ζώνη) μπορούν να μετριαστούν σε μεγάλο βαθμό, χωρίς παρεμβάσεις στον αστικό ιστό, αλλά με παρεμβάσεις στο κέλυφος των αστικών κτιρίων. Η ποσότητα της βλάστησης που τοποθετείται, καθώς και η θέση της (δώματα, όψεις ή και στα δύο) έχουν πολύ πιο ισχυρό αποτέλεσμα, από ό,τι ο προσανατολισμός των κτιρίων. Η γεωμετρία του δρόμου και ιδιαίτερα ο λόγος του ύψους του κτιρίου προς το πλάτος του δρόμου παίζει πιο σημαντικό ρόλο από τον προσανατολισμό, με τα φυτεμένα δώματα και τους φυτεμένους τοίχους να παίζουν μικρότερο ρόλο στη θερμοκρασία του αέρα σε

γεωμετρίες όπου το πλάτος του δρόμου είναι μεγαλύτερο από το ύψος των κτιρίων. Η μέγιστη μείωση της θερμοκρασίας αέρα που παρατηρήθηκε στην παρούσα μελέτη είναι στην περίπτωση που είναι φυτεμένες και οι οροφές και οι όψεις και κυμαίνεται από 5,9°C για την περίπτωση με τον πιο πλατύ δρόμο που εξετάστηκε έως 8,3°C για τον πιο στενό δρόμο. Η μείωση της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας κυμαίνεται από 4,2°C έως 5,6°C. Όταν μόνο οι όψεις είναι φυτεμένες, η ελάττωση της θερμοκρασίας μειώνεται, με τα μέγιστα να κυμαίνονται από 2,7°C έως 6,3°C and και τα μέσα ημερήσια από 1,5°C έως 4,2°C. Οι ελαττώσεις αυτές των αστικών θερμοκρασιών μπορούν να οδηγήσουν σε εξοικονόμηση ενέργειας για κλιματισμό τον μήνα του Ιουλίου στην Αθήνα από 65% (περίπτωση φυτεμένων όψεων) έως 84% (περίπτωση φυτεμένων όψεων και δωμάτων). Εκτός αυτού, η αίσθηση θερμικής άνεσης στον αστικό χώρο βελτιώνεται δραστικά, με τη θερμική αίσθηση να βρίσκεται πιο κοντά σε ζώνες θερμικής άνεσης, όταν φυτεύονται τα δώματα και οι όψεις, δημιουργώντας έτσι πιο ευχάριστες και ασφαλείς θερμοκρασίες διαβίωσης για τους κατοίκους των πόλεων.

EΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα εκπονήθηκε με χρηματοδότηση από το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (IKY).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Lamb, H.H., 'Climate, History and the Modern World', Routledge, 2nd Edition, London and New York, 1995.
2. Watkins, R., 'The Impact of the Urban Environment on the Energy Demand for Cooling Buildings. Literature Review', Report, written as part of a research project carried out at Brunel University and the Building Research Establishment Ltd. Ιστοσελίδα: <http://www.brunel.ac.uk/research/solvent/>, 2000.
3. Chandler, T. J., 'The Climate of London. London', Hutchinson & Co, 1965.
4. Allard, F., (Ed) 'Natural Ventilation in Buildings', James & James, London, 1998.
5. Santamouris, M., (Ed) 'Energy and Climate in the Urban Built Environment', James & James, London, 2001.
6. Cantat, O., 'Contribution à l'Étude des Variations du Bilan d'Énergie en Région Parisienne', Διδακτορική Διατριβή, Université Paris-Sorbonne, 1989.
7. Bonacquisti, V., Casale, G. R., Palmieri, S. et al., 'A Canopy Layer Model and its Application to Rome', Science of the Total Environment, Vol. 364, pp 1–13, 2006.
8. Alexandri, E., and Jones, P., 'Developing a One-Dimensional Heat and Mass Transfer Algorithm for Describing the Effect of Green Roofs on the Built Environment: Comparison with Experimental Results', Building and Environment, Vol. 42, pp 2835-2849, 2007.
9. Marsh, A., 'Ecotect, Version 5.20(b)', Square One Research PTY LTD, 2003.
10. Welsh School of Architecture, Cardiff University 'WinAir4', Cardiff, 2003.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ & ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕ ΑΝΑΡΡΙΧΩΜΕΝΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ

Αικ. Α. Ευμορφοπούλου, Κ. Ι. Κοντολέων

Εργαστήριο Οικοδομικής & Δομικής Φυσικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.),
Τ.Κ. 541 24 Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, τηλ.: +30 2310 995815, e-mail: dimitrio@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή αναφέρεται στη διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς ενός κτιρίου με αναρριχώμενη βλάστηση σε συγκεκριμένες επιφάνειες του κελύφους του. Στόχος της είναι ο έλεγχος και η αξιολόγηση της θερμικής απόκρισης μίας κτιριακής ζώνης που ενσωματώνει τοιχοποιία με ανατολικό προσανατολισμό καλυμμένη με αναρριχώμενη βλάστηση σε αντιδιαστολή με μία ανάλογη κτιριακή ζώνη, του ίδιου κτιρίου χωρίς βλάστηση.

Η ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς του κτιριακού κελύφους πραγματοποιήθηκε με μία πειραματική διάταξη κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης. Με την προτεινόμενη διάταξη υπολογίζονται οι θερμοκρασίες στο εξωτερικό και εσωτερικό περιβάλλον των δύο ζωνών, οι θερμοκρασίες στην εξωτερική και εσωτερική παρειά για τα καλυπτόμενα και τα μη καλυπτόμενα με βλάστηση τμήματα των τοιχοποιιών και, τέλος, οι θερμοκρασίες εντός του φυλλώματος της κτιριακής ζώνης που περιλαμβάνει την καλυμμένη με βλάστηση τοιχοποιία. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα στις χαρακτηριστικές θέσεις των δύο κτιριακών ζωνών εστιάζονται: (α) στις ελάχιστες ημερήσιες θερμοκρασίες, (β) τις μέγιστες ημερήσιες θερμοκρασίες και (γ) τις ημερήσιες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της περιόδου εξέτασης, ενώ παράλληλα επισημαίνονται, με μορφή διαγραμμάτων, οι μειώσεις των τιμών των μέγιστων ημερησίων θερμοκρασιών (στην εξωτερική και εσωτερική παρειά), λόγω των φυλλωμάτων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο άρτιος βιοκλιματικός σχεδιασμός και η εκμετάλλευση του φυσικού περιγύρου, συμπεριλαμβανομένης και της βλάστησης, έχουν ως στόχο τη διαμόρφωση ενός άνετου θερμικού εσωκλίματος. Η χωροθέτηση, το σχήμα, ο προσανατολισμός, το μέγεθος των ανοιγμάτων, η χρήση και η διαρρύθμιση των εσωτερικών χώρων του κτιρίου επιλέγονται κατάλληλα ώστε η συνεργασία τους με το φυσικό περιβάλλον να περιορίζει τις ανεπιθύμητες ροές θερμότητας. Επιπροσθέτως, για να λειτουργεί αποδοτικά ένα κτίριο πρέπει το κέλυφος: (α) να ελαχιστοποιεί τις θερμικές απώλειες αγωγιμότητας από τον εσωτερικό προς τον εξωτερικό χώρο και (β) να αποθηκεύει σε ορισμένο βαθμό θερμότητα εντός της θερμικής μάζας την οποία στη συνέχεια αποδίδει με χρονική υστέρηση [1, 2]. Προς αυτήν την κατεύθυνση, τα φυλλώματα της αναρριχώμενης βλάστησης που ενσωματώνονται στο κτιριακό περίβλημα μπορούν να αναβαθμίσουν σε σημαντικό βαθμό τη θερμική τους συμπεριφορά [3, 4].

Ο στόχος αυτής της εργασίας, είναι ο προσδιορισμός και η εκτίμηση της συνεισφοράς της αναρριχώμενης βλάστησης στη ανατολική πρόσοψη μίας κτιριακής ζώνης, σε σχέση με μία κτιριακή ζώνη στην ίδια πρόσοψη που δεν ενσωματώνει βλάστηση. Η παραπάνω θερμική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με μία πειραματική διάταξη κατά τη θερμή περίοδο του καλοκαιριού στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης. Τα αποτελέσματα εστιάζονται στον καθορισμό του θερμοκρασιακού πεδίου σε συγκεκριμένες χαρακτηριστικές θέσεις των ζωνών του

υπό εξέταση κτιρίου. Όπως εξάγεται η συμβολή της αναρριχώμενης βλάστησης είναι ουσιώδης και βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό το μικροκλίμα και τη θερμική άνεση στο εσωτερικό των κτιριακών ζωνών.

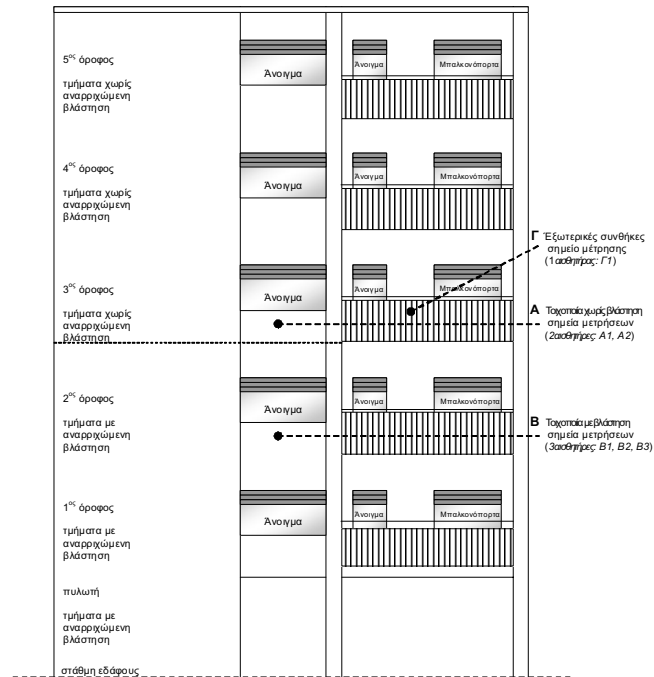
2. ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΑΝΑΡΡΙΧΩΜΕΝΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΩΝ

Η συμβολή της αναρριχώμενης στο περίβλημα των κτιρίων βλάστησης είναι σημαντική για τη βελτίωση της θερμικής κατάστασης και της αειφορίας του δομημένου περιβάλλοντος. Η βλάστηση με τον σκιασμό συμβάλλει στη μείωση των θερμικών φορτίων που αναπτύσσονται στο περίβλημα των κτιρίων, κατά τη θερινή περίοδο, λόγω της δράσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπλέον, τα φυτά απορροφώντας μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας για την ανάπτυξή τους και τις βιολογικές τους λειτουργίες, όπως η φωτοσύνθεση, η αναπνοή, η διαπνοή και η εξάτμιση, ρυθμίζουν τη θερμοκρασία και την υγρασία στο περιβάλλον των κτιρίων και βελτιώνουν το κλίμα στους παρακείμενους εσωτερικούς χώρους. Παράλληλα τα φυλλώματα της βλάστησης μειώνουν την ένταση του ανέμου (μηχανισμός διάδοσης θερμότητας με συναγωγή), με αποτέλεσμα να μειώνονται σημαντικά και οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στην εξωτερική επιφάνεια των κτιρίων.

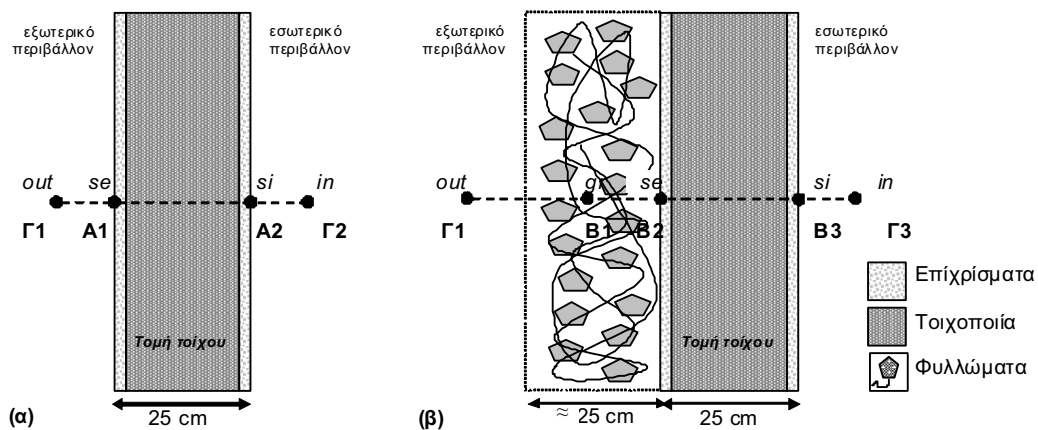
Στην περιοχή της Μεσογείου, και ιδιαίτερα στην Ελλάδα, οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες επιφάνειες των κτιριακών κελυφών υπόκεινται σε μεγάλες ημερήσιες και ετήσιες διακυμάνσεις των θερμοκρασιών λόγω της έκθεσής τους στην ηλιακή ακτινοβολία. Οι διακυμάνσεις αυτές μπορούν να μειωθούν σε μεγάλο βαθμό με την ανάπτυξη φυτών στις όψεις και τα δώματα των κτιρίων. Με τον τρόπο αυτόν, μειώνονται δραστικά τα θερμικά φορτία και αποφεύγονται τα φαινόμενα υπερθέρμανσης στο εσωτερικό των κτιρίων, κατά τη θερινή περίοδο [3].

3. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ & ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΚΤΙΡΙΑΚΗΣ ΖΩΝΗΣ

Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση των αναρριχώμενων φυτών στη θερμική συμπεριφορά του κελύφους των κτιρίων έγινε συγκριτική μελέτη μεταξύ μιας καλυμμένης με φυτά και μιας συμβατικής τοιχοποιίας, με τη χρήση μιας πειραματικής μεθόδου, σε ένα πεντάοροφο κτίριο κατοικιών στη Θεσσαλονίκη. Η θερμική ανάλυση εστιάστηκε σε δύο ισοδύναμους ορόφους, δεύτερο και τρίτο, στην ανατολικά όψη του κτιρίου (σχήμα 1). Ο 2^{ος} όροφος καλύπτεται από αναρριχώμενα φυτά με πυκνό και παχύ φύλλωμα (~ 25 cm) ενώ η τοιχοποιία του 3^{ου} ορόφου είναι ακόμα ακάλυπτη. Όσον αφορά στην κατασκευή του κτιρίου, ο φέρων οργανισμός είναι κατασκευασμένος με οπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ οι τοιχοποιίες από θερμομονωτικά τούβλα πάχους 20cm. Το συνολικό πάχος των τοιχοποιιών φθάνει τα 25 cm. Στα σχήματα 2(α) και (β) φαίνονται οι διατομές των τοιχοποιιών του κτιρίου που μελετήθηκαν χωρίς αναρριχώμενη βλάστηση και με αναρριχώμενη βλάστηση αντίστοιχα. Στα ίδια σχήματα φαίνονται και οι θέσεις των αισθητήρων που τοποθετήθηκαν προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Οι μετρήσεις έγιναν κατά τη θερινή περίοδο, από 16 Ιουλίου έως 15 Αυγούστου 2006, ανά ώρα. Μετρήθηκαν οι θερμοκρασίες του εξωτερικού περιβάλλοντος *o*, αισθητήρας Γ1, του εσωτερικού *in*, αισθητήρας Γ2 για τον 3^ο όροφο και Γ3 για τον 2^ο όροφο, οι επιφανειακές έξω *se* και μέσα *si*, αισθητήρες Α1 και Α2 αντίστοιχα, της τοιχοποιίας χωρίς αναρριχώμενη βλάστηση και οι επιφανειακές έξω *se* και μέσα *si*, αισθητήρες Β2 και Β3 αντίστοιχα, της τοιχοποιίας με βλάστηση. Επιπλέον στην τοιχοποιία με την αναρριχώμενη βλάστηση του 2^{ου} ορόφου μετρήθηκαν και οι θερμοκρασίες *gr* Β1 που αναπτύχθηκαν στην περιοχή του φυλλώματος.



Σχήμα 1. Απεικόνιση της ανατολικής πρόσοψης του κτιρίου, που μελετήθηκε πειραματικά.



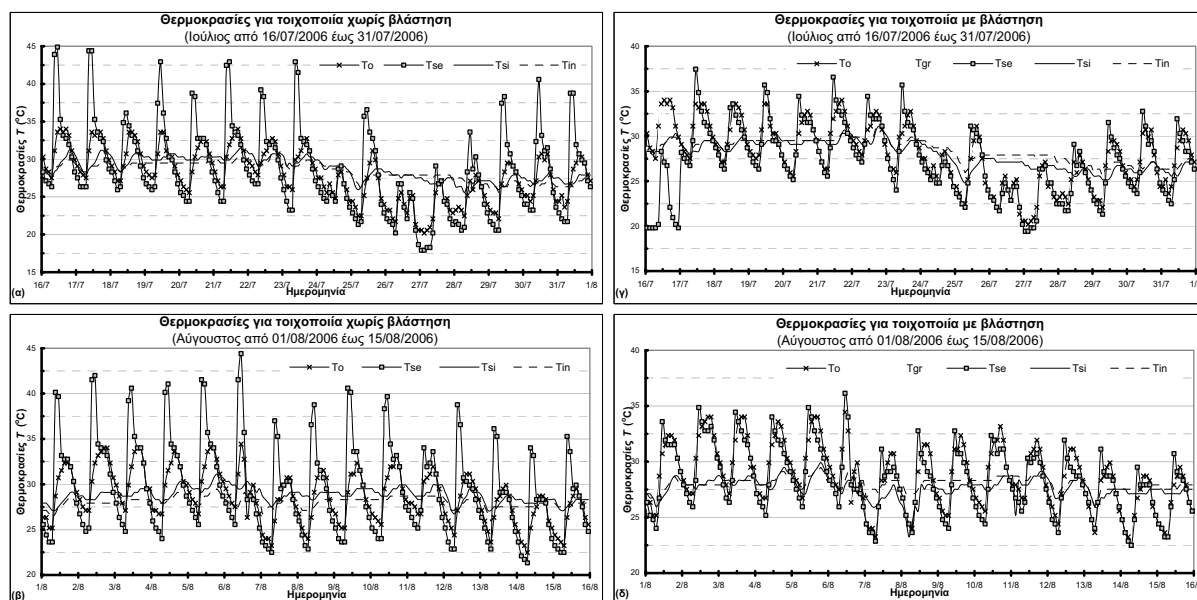
Σχήμα 2. Χαρακτηριστικές διατομές των τοιχοποιιών του κτιρίου που θεωρήθηκε:
(α) χωρίς αναρριχώμενη βλάστηση και (β) με αναρριχώμενη βλάστηση.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΤΙΡΙΑΚΩΝ ΖΩΝΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΡΡΙΧΩΜΕΝΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ

Οι τιμές των θερμοκρασιών στις χαρακτηριστικές θέσεις των δύο κτιριακών ζωνών παραθέτονται στα διαγράμματα του σχήματος 3. Ειδικότερα, στο σχήμα 3(α) και (β) απεικονίζονται οι τιμές των θερμοκρασιών για την κτιριακή ζώνη που δεν ενσωματώνει βλάστηση στην τοιχοποιία με ανατολικό προσανατολισμό, ενώ στο σχήμα 3(γ) και (δ) δίνονται οι τιμές των θερμοκρασιών για την κτιριακή ζώνη που ενσωματώνει βλάστηση. Τα πιο σημαντικά αποτελέσματα που εξάγονται από την πειραματική διερεύνηση είναι τα ακόλουθα:

- Οι ελάχιστες ημερήσιες θερμοκρασίες T_{min} [°C] που αναπτύσσονται σε όλες τις χαρακτηριστικές θέσεις των κτιριακών ζωνών που μελετήθηκαν.

- Οι μέγιστες ημερήσιες θερμοκρασίες T_{max} [°C] που εμφανίζονται σε όλες τις χαρακτηριστικές θέσεις των κτιριακών ζωνών που εξετάστηκαν.
- Οι τιμές των ημερήσιων θερμοκρασιακών διακυμάνσεων $T_{se,min} - T_{si,min}$ και $T_{se,max} - T_{si,max}$ [°C], κατά τη διάρκεια της περιόδου θερμικής ανάλυσης.
- Οι μειώσεις των τιμών των μέγιστων ημερησίων θερμοκρασιών ΔT_{max} (δυσμενέστερες τιμές των θερμοκρασιών στην εξωτερική και εσωτερική παρειά των τοιχοποιιών), λόγω των φυλλωμάτων της αναρριχώμενης βλάστησης.



Σχήμα 3. Τιμές των θερμοκρασιών σε όλες τις χαρακτηριστικές θέσεις του κτιρίου.

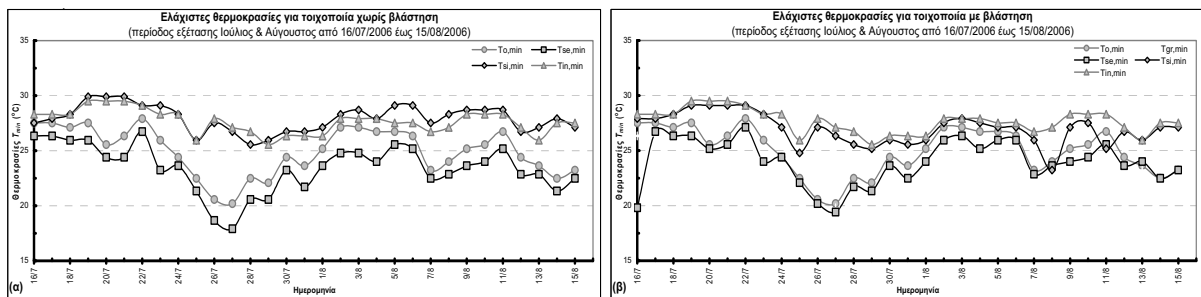
4.1. Ελάχιστες ημερήσιες θερμοκρασίες

Οι ελάχιστες τιμές των θερμοκρασιών T_{min} στη διάρκεια της ημέρας δίνονται στο σχήμα 4(α) και (β). Τα διαγράμματα αναφέρονται στις τιμές των θερμοκρασιών στο εξωτερικό και εσωτερικό περιβάλλον των δύο ζωνών του κτιρίου, στην εξωτερική και εσωτερική παρειά για τα μη καλυπτόμενα και τα καλυπτόμενα με βλάστηση τμήματα των τοιχοποιιών και, τέλος, εντός του φυλλώματος της κτιριακής ζώνης με βλάστηση στην τοιχοποιία με αναρριχώμενη βλάστηση.

Όσον αφορά την τοιχοποιία που δεν ενσωματώνει βλάστηση οι τιμές των ελάχιστων θερμοκρασιών στην εξωτερική παρειά είναι σημαντικά χαμηλότερες σε σύγκριση με τις θερμοκρασίες στο εξωτερικό περιβάλλον, $T_{se,min} < T_{o,min}$. Εν αντιθέσει με πριν, για την τοιχοποιία με βλάστηση οι ελάχιστες θερμοκρασίες στην εξωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας με αναρριχώμενη βλάστηση είναι σχεδόν ταυτόσημες με αυτές στο εξωτερικό περιβάλλον, $T_{se,min} \approx T_{o,min}$. Περαιτέρω, η διαφορά στις ελάχιστες ημερήσιες θερμοκρασίες εντός του φυλλώματος και της εξωτερικής επιφάνειας (για την τοιχοποιία που καλύπτεται με βλάστηση) είναι ανεπαίσθητη, $T_{gr,min} \approx T_{se,min}$. Όπως είναι φανερό από τα ανωτέρω συμπεράσματα, η απουσία της βλάστησης έχει ως συνέπεια τον ταχύ δροσισμό της εξωτερικής παρειάς της τοιχοποιίας. Ήτοι, μέσω συναγωγής και εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (μηχανισμοί διάδοσης θερμότητας) οι επιφάνειες των τοιχοποιιών δροσίζονται με φυσικό τρόπο κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου της νύχτας. Ωστόσο, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι σε συνολική βάση, στη διάρκεια του ημερήσιου κύκλου, οι θερμοκρασίες εντός του φυλλώματος είναι χαμηλότερες κατά 1°C με 2°C σε σχέση με τις θερμοκρασίες στο εξωτερικό περιβάλλον. Αυτό οφείλεται στους μηχανισμούς ανάπτυξης και τις βιολογικές λειτουργίες της βλάστησης.

Σε σχέση με την κτιριακή ζώνη που δεν καλύπτεται με βλάστηση, οι ελάχιστες θερμοκρασίες στο εσωτερικό περιβάλλον αυτής είναι χαμηλότερες σε σύγκριση με τις ελάχιστες θερμοκρασίες στην εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας, $T_{in,min} < T_{si,min}$. Αντιθέτως, για την κτιριακή ζώνη με βλάστηση, οι ελάχιστες θερμοκρασίες στο εσωτερικό περιβάλλον αυτής είναι υψηλότερες σε σύγκριση με τις ανάλογες θερμοκρασίες στην εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας, $T_{in,min} > T_{si,min}$.

Από τα παραπάνω συμπεράσματα, προκύπτει ότι οι ελάχιστες θερμοκρασίες στην εξωτερική παρειά της ακάλυπτης τοιχοποιίας είναι μικρότερες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές για την τοιχοποιία με αναρριχώμενη βλάστηση. Επίσης, συνάγεται ότι οι ελάχιστες θερμοκρασίες στην εσωτερική παρειά της ακάλυπτης τοιχοποιίας είναι μεγαλύτερες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές για την τοιχοποιία με αναρριχώμενη βλάστηση. Από το συμπέρασμα αυτό συνεπάγεται ότι η ενσωμάτωση αναρριχώμενης βλάστησης σε μία τοιχοποιία περιορίζει αισθητά το εύρος των ελάχιστων θερμοκρασιών μεταξύ των δύο παρειών της τοιχοποιίας. Ως εκ τούτου τα φυλλώματα της βλάστησης αναβαθμίζουν δραστικά τις θερμοκρασιακές συνθήκες εντός του κτιρίου κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου του καλοκαιριού.



Σχήμα 4. Ελάχιστες ημερήσιες θερμοκρασίες, στις χαρακτηριστικές θέσεις του κτιρίου.

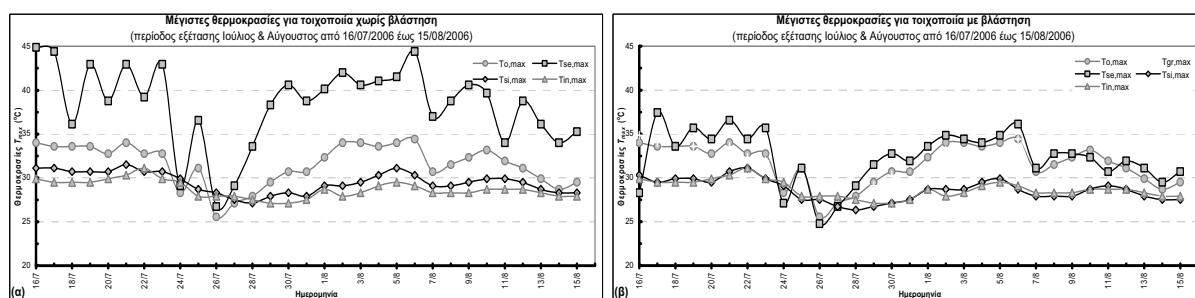
4.2. Μέγιστες ημερήσιες θερμοκρασίες

Στο σχήμα 5(α) και (β) απεικονίζονται οι τιμές των μέγιστων ημερήσιων θερμοκρασιών. Ειδικότερα, τα γραφήματα σκιαγραφούν τις τιμές των θερμοκρασιών στο εξωτερικό και εσωτερικό περιβάλλον των δύο κτιριακών ζωνών που θεωρήθηκαν, στην εξωτερική και εσωτερική επιφάνεια για τις εκτεθειμένες και τις μη εκτεθειμένες προσόψεις, λόγω της βλάστησης των φυλλωμάτων, και, τέλος, εντός του φυλλώματος της κτιριακής ζώνης με βλάστηση για την πρόσοψη με ανατολικό προσανατολισμό.

Όσον αφορά τα τμήματα της κτιριακής ζώνης χωρίς αναρριχώμενη βλάστηση οι τιμές των θερμοκρασιών αιχμής στην εξωτερική παρειά είναι ιδιαίτερα υψηλότερες σε σχέση με τις μέγιστες θερμοκρασίες στο εξωτερικό περιβάλλον, $T_{se,max} > T_{o,max}$. Η διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ της εξωτερικής παρειάς και του εξωτερικού περιβάλλοντος στη διάρκεια της περιόδου ανάλυσης είναι κατά μέσο όρο 6.8°C , με τη μέγιστη διαφορά να αγγίζει τους 10.8°C . Για την κτιριακή ζώνη με αναρριχώμενη βλάστηση ισχύει $T_{se,max} > T_{o,max}$, με το εύρος της θερμοκρασιακής διακύμανσης μεταξύ της εξωτερικής παρειάς και του εξωτερικού περιβάλλοντος κυμαίνεται από 1°C έως 3.9°C . Όπως φαίνεται καθαρά η θερμοκρασιακή διαφορά $T_{se,max} - T_{o,max}$ για τα καλυπτόμενα με βλάστηση τμήματα είναι σημαντικά μικρότερη σε σχέση με τα ακάλυπτα τμήματα. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι οι θερμοκρασίες εντός του φυλλώματος είναι χαμηλότερες σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον και την εξωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας. Ως εκ τούτου, ισχύει $T_{gr,max} < T_{o,max} < T_{se,max}$. Επιπροσθέτως, οι μέγιστες θερμοκρασίες στο εσωτερικό περιβάλλον για την τοιχοποιία χωρίς αναρριχώμενη βλάστηση είναι μικρότερες σε σύγκριση με την εσωτερική παρειά, $T_{in,max} < T_{si,max}$. Αντιθέτως, για την τοιχοποιία με αναρριχώμενη βλάστηση έχουμε $T_{in,max} \approx T_{si,max}$. Όπως συνάγεται από τα ανωτέρω διαγράμματα, η απουσία της στρώσης των φυλλωμάτων έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση πολύ

υψηλών θερμοκρασιών και ανεπιθύμητων ροών θερμότητας δια μέσου του κτιριακού κελύφους. Οπότε γίνεται αντιληπτή η θετική επιρροή της αναρριχόμενης βλάστησης όσον αφορά την επίτευξη ευνοϊκότερων συνθηκών εντός της κτιριακής ζώνης. Η συνεισφορά των φυλλωμάτων θα ήταν ακόμα περισσότερο αισθητή εάν ο συντελεστής ηλιακής απορρόφησης α_s της εκτεθειμένης τοιχοποιίας ήταν μεγαλύτερος (στην παρούσα ανάλυση η πρόσοψη είναι ανοιχτόχρωμη και αντανακλά μεγάλο μέρος της ηλιακής ενέργειας). Τα σκούρα χρώματα λόγω της μεγάλης απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας θερμαίνονται περισσότερο από τα ανοιχτά χρώματα. Ήτοι, ο βαθμός της δράσης των φυλλωμάτων είναι σε συνάρτηση με το χρώμα και την υφή του εξωτερικού επιχρίσματος, καθώς επίσης και τη συνολική θερμική αντίσταση και θερμοχωρητικότητα των δομικών στοιχείων που συνθέτουν την διατομή της τοιχοποιίας [5].

Παράλληλα, από τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων προκύπτει ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες αιχμής τόσο στην εξωτερική, όσο και στην εσωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας χωρίς βλάστηση είναι σημαντικά υψηλότερες σε σύγκριση με την τοιχοποιία με βλάστηση. Έτσι, όπως φάνηκε τα φυλλώματα της αναρριχόμενης βλάστησης μειώνουν σημαντικά την υπερθέρμανση στο εσωτερικό των κτιρίων κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου του καλοκαιριού (αναβάθμιση θερμοκρασιακού πεδίου). Επιπροσθέτως, είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι οι θερμοκρασίες που υπολογιστήκαν στην εξωτερική παρειά της τοιχοποιίας χωρίς βλάστηση είναι περίπου κατά 2°C υψηλότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες για την τοιχοποιία με βλάστηση. Κατά τη διάρκεια μίας τυπικής ημέρας με ηλιοφάνεια η διαφορά των μέγιστων τιμών της θερμοκρασίας μπορεί να κυμανθεί από 10°C έως 15°C . Στον αντίποδα, κατά τη διάρκεια των ημερών χωρίς εκτεταμένη ηλιοφάνεια αυτή η διαφορά κυμαίνεται από -2°C έως $+2^{\circ}\text{C}$.

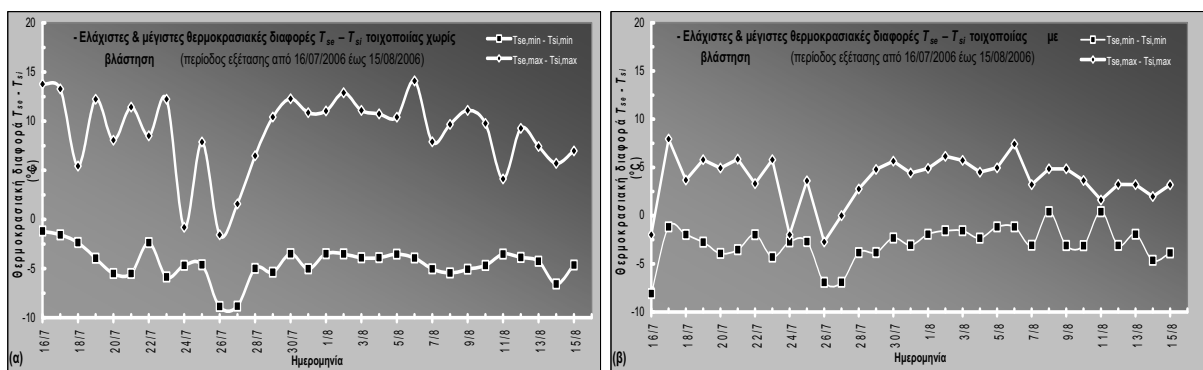


Σχήμα 5. Μέγιστες ημερήσιες θερμοκρασίες, στις χαρακτηριστικές θέσεις του κτιρίου.

4.3. Ημερήσιες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις

Οι ημερήσιες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις $T_{se,min} - T_{si,min}$ [$^{\circ}\text{C}$] και $T_{se,max} - T_{si,max}$ [$^{\circ}\text{C}$] ανάμεσα στην εξωτερική και την εσωτερική παρειά των τοιχοποιιών, όσον αφορά τις δύο κτιριακές ζώνες που εξετάστηκαν, δίνονται στα διαγράμματα του σχήματος 6(α) και (β).

Από τα σχήματα συνάγεται ότι η ενσωμάτωση βλάστησης μειώνει δραστικά τις θερμοκρασιακές διαφορές $T_{se,min} - T_{si,min}$ και $T_{se,max} - T_{si,max}$. Ειδικότερα, για την τοιχοποιία που δεν ενσωματώνει βλάστηση η διαφορά $T_{se,min} - T_{si,min}$ φτάνει έως και -8.9°C , ενώ η διαφορά $T_{se,max} - T_{si,max}$ έως και 14.1°C . Από την άλλη, για την κτιριακή ζώνη που ενσωματώνει αναρριχόμενη βλάστηση οι τιμές των διαφορών $T_{se,min} - T_{si,min}$ και $T_{se,max} - T_{si,max}$ είναι -6.9°C και 7.9°C , αντιστοίχως. Οι τιμές των ανωτέρω θερμοκρασιακών διαφορών είναι παραπλήσιες με ανάλογες εργασίες [6-10].



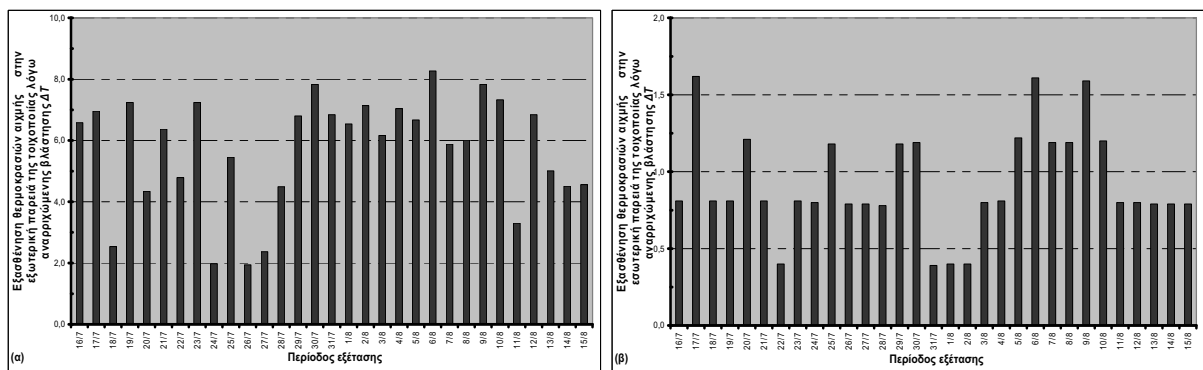
Σχήμα 6. Ελάχιστες και μέγιστες ημερήσιες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.

4.4. Μείωση επιφανειακών θερμοκρασιών αιχμής λόγω αναρριχώμενης βλάστησης

Τα γραφήματα του σχήματος 7(α) και (β) απεικονίζουν την ημερήσια μείωση των μέγιστων τιμών της θερμοκρασίας στην εξωτερική και εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας λόγω της ενσωμάτωσης της αναρριχώμενης βλάστησης. Αυτές οι μεταβολές των θερμοκρασιών αιχμής υποδηλώνουν την ωφέλιμη επένεργεια δροσισμού, λόγω της αναρριχώμενης βλάστησης.

Όπως συνάγεται από τα αποτελέσματα της πειραματικής διερεύνησης, η μείωση των θερμοκρασιών αιχμής στην εξωτερική παρειά της τοιχοποιίας με ανατολικό προσανατολισμό κυμαίνεται από 1.9°C έως και 8.3°C. Κατά μέσο όρο αυτή η μείωση των μέγιστων θερμοκρασιών είναι 5.7°C, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι γενικώς σε συμφωνία με ανάλογες πειραματικές και αναλυτικές εργασίες από τον διεθνή χώρο που διεξήχθησαν σε προγενέστερο χρόνο. Εντούτοις, είναι κρίσιμο να αναφερθεί ότι αποτυπώνονται αξιόλογες διακυμάνσεις των θερμοκρασιακών μειώσεων λόγω διαφορετικών συνθηκών όπως είναι: (α) η περιοχή διεξαγωγής της μελέτης και των μετρήσεων, (β) τα κλιματολογικά δεδομένα, (γ) η περίοδος της θερμικής ανάλυσης, (δ) ο προσανατολισμός της τοιχοποιίας, (ε) το ποσοστό και τα θερμοτεχνικά χαρακτηριστικά των ανοιγμάτων, (στ) η διατομή και τα υλικά σύνθεσης των δομικών στοιχείων (γεωμετρικές και θερμοφυσικές ιδιότητες) και (ζ) το είδος, η πυκνότητα και η απόσταση της βλάστησης από την τοιχοποιία του κτιριακού περιβλήματος. Κατά συνέπεια δεν είναι πολύ δόκιμο να γίνει απευθείας σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Όσον αφορά τη μείωση των θερμοκρασιών αιχμής στην εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας εξαιτίας των φυλλωμάτων της αναρριχώμενης βλάστησης, αυτή μεταβάλλεται από 0.4°C έως 1.6°C. Ειδικότερα, αυτή η μείωση των μέγιστων θερμοκρασιών είναι κατά μέσο όρο 0.9°C, στη διάρκεια των θερμοκρασιακών καταγραφών.



Σχήμα 7. Μείωση επιφανειακών θερμοκρασιών αιχμής λόγω αναρριχώμενης βλάστησης.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως προέκυψε από την παραπάνω μελέτη, αλλά και από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων (αναφορικά με τις δύο κατηγορίες κτιριακών ζωνών με ή χωρίς αναρριχώμενη βλάστηση) η συνεισφορά των φυλλωμάτων στην πρόσοψη της τοιχοποιίας είναι σημαντική σε σχέση με τη βελτίωση του μικροκλίματος και της θερμικής άνεσης εντός της εξεταζόμενης κτιριακής ζώνης. Αυτό συνεπάγεται ότι σε κάθε περίπτωση οι ανεπιθύμητες επιφανειακές θερμοκρασίες αιχμής είναι αισθητά χαμηλότερες και το εύρος της διακύμανσης των ωριαίων τιμών των θερμοκρασιών είναι ευνοϊκά μικρότερο. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι από μελέτη σε μελέτη παρουσιάζονται διακυμάνσεις στο εύρος της επιθυμητής συνεισφοράς της βλάστησης, λόγω διαφορετικών περιβαλλοντικών συνθηκών σε κάθε μία περίπτωση. Εν κατακλείδι, η ενσωμάτωση της αναρριχώμενης βλάστησης στα κτιριακά κελύφη (υφιστάμενων ή νέων κατασκευών), καθιστά δυνατή τη διαμόρφωση και επίτευξη ενός αειφόρου δομημένου περιβάλλοντος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Santamouris, M., Asimakopoulos D., 'Passive cooling of buildings', London: James & James, 1996.
2. Goulding, J. R., Owen, Lewis J., Steemers, T. C., 'Energy conscious design: a primer for architects', London: Batsford for the Commission of the European Communities, 1992.
3. Eumorfopoulou, E. A., Axarli, K., 'Energy efficient vegetation design for temperate climate', 18th International Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA) 2001; (1): 517-521.
4. Axarli, K., Eumorfopoulou, E. A., 'The impact of the vegetation on building facades on microclimatic modification in temperate climates in summer', 4th ISES Europe Solar Congress on Renewable Energy for local Communities of Europe (EUROSUN) 2002: paper 202.
5. Kontoleon, K. J., Bikas, D. K., 'The effect of south wall's outdoor absorption coefficient on time lag, decrement factor and temperature variations', Energy and Buildings 2007; 39(9): 1011-1018.
6. Meier, Alan K., 'Strategic landscaping and air-conditioning savings: A literature review', Energy and Buildings 1990/91; 15-16: 479-486.
7. Hoyano, A., 'Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building', Energy and Buildings 1988; 11: 181-199.
8. McPherson, Gregory E., Herrington, Lee P., Heisler, Gordon M., 'Impacts of vegetation on residential heating and cooling', Energy and Buildings 1988; 12(1): 41-51.
9. Holm, D., 'Thermal improvement by means of leaf cover on external walls - A simulation model', Energy and Buildings 1989; 14(1): 19-30.
10. Zaiyi, Liao, Niu, J. L., 'Thermal function of ivy-coverings on residential buildings', Building Simulation'99 1999; Kyoto University, Japan.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΙΟΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕ ΠΕΡΣΙΔΕΣ: ΕΠΙΡΡΟΗ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΓΡΑΦΕΙΑΚΩΝ ΧΩΡΩΝ

Κ. Αξαρλή, Κ. Τσικαλουδάκη και Χ. Βαϊτση

Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτιρίων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 541 24 Θεσσαλονίκη, e-mail: axarli@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η εκτίμηση της διαπερατότητας του συστήματος περσίδων-υαλοπίνακα για διαφορετικές κλίσεις και ανακλαστικότητες των ελασμάτων τους σε συνδυασμό με τη μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης της ακτινοβολίας και προσδιορίζεται το μέγεθος των ηλιακών κερδών κατά τη διάρκεια της θερμαντικής και ψυκτικής περιόδου. Παράλληλα, μελετάται και η επιρροή τους στη διαμόρφωση των επιπέδων φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό του χώρου, ώστε να γίνει εφικτή η αξιολόγηση των χαρακτηριστικών τους με γνώμονα τη συνολική τους ενεργειακή απόδοση.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εφαρμογή ηλιοπροστατευτικών διατάξεων στα κτίρια συνεισφέρει στη βελτίωση της ενεργειακής τους απόδοσης το καλοκαίρι και στον έλεγχο της έντασης του φυσικού φωτός καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, αυξάνει όμως το θερμικό φορτίο το χειμώνα, καθώς αποκόπτεται και τμήμα των επιθυμητών -για τη συγκεκριμένη περίοδο- ηλιακών κερδών. Η τοποθέτηση εξωτερικών σταθερών περσίδων συναντάται ολοένα και συχνότερα στη σύγχρονη αρχιτεκτονική, ιδιαίτερα σε κτίρια γραφείων με μεγάλες γυάλινες προσόψεις, καθώς η συγκεκριμένη διάταξη μπορεί να συμβάλει στη διαμόρφωση συνθηκών θερμικής και οπτικής άνεσης.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η ποσοτικοποίηση της επίδρασης του συστήματος εξωτερικών περσίδων στην ενεργειακή συμπεριφορά τυπικών γραφειακών χώρων. Σκοπός της εργασίας είναι να διερευνηθεί η επίδραση του τύπου και της κλίσης των σκιάστρων σε συνδυασμό με τη διεποχιακή μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στη διαπερατότητα του συστήματος περσίδων-υαλοπίνακα σε άμεση και διάχυτη ακτινοβολία και κατ' επέκταση στα ηλιακά κέρδη, καθώς και στη διαμόρφωση των επιπέδων φυσικού φωτισμού στον εσωτερικό χώρο.

Η επίδραση των εξωτερικών περσίδων στη διαμόρφωση του θερμικού και οπτικού εσωκλίματος μελετήθηκε με τη θεώρηση μοντέλου πειραματικού κτιρίου χωροθετημένου στη Θεσσαλονίκη και την προσομοίωσή του με το υπολογιστικό εργαλείο energy plus. Η εκτίμηση της επίδρασης των χαρακτηριστικών των περσίδων στην ενεργειακή συμπεριφορά του μοντέλου γίνεται με τη βοήθεια παραμετρικής ανάλυσης, στην οποία μεταβλητές είναι η γωνία κλίσης και η ανακλαστικότητα των περσίδων.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για το σκοπό της μελέτης λήφθηκε ως χώρος αναφοράς μία τυπική αίθουσα γραφείου με διαστάσεις 3.55m x 7.05m και ύψος 3.00m. Θεωρήθηκε ότι το κέλυφος του μοντέλου είναι κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα και είναι θερμομονωμένο με αφρώδη εξηλασμένη

πολυστερίνη πάχους 0.05m. Ο χώρος φωτίζεται από ένα πλευρικό άνοιγμα στη νότια πλευρά του διαστάσεων 2.20m x 1.70m, το οποίο καλύπτεται με δίδυμο καθαρό υαλοπίνακα (πάχος κάθε υαλοπίνακα 0.004m και διάκενο 0.012m) και δεν φέρει ηλιοπροστασία.

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς των περσίδων δημιουργήθηκαν επιπλέον μοντέλα, τα οποία έχουν όμοια γεωμετρία με το χώρο αναφοράς, αλλά φέρουν στην εξωτερική πλευρά του ανοίγματος σταθερές περσίδες με πλάτος 0.20m, πάχος 0.027m, μεταξύ τους απόσταση 0.1875m και απόσταση από το υαλοστάσιο 0.25m (σχήμα 1). Τα μοντέλα της παραμετρικής ανάλυσης διαφοροποιούνται ως προς την κλίση και την ανακλαστικότητα των περσίδων. Δημιουργήθηκαν 12 μοντέλα, τα οποία αντιπροσωπεύουν περσίδες με κλίση 30°, 45°, 60° και 90° και με χαμηλή, μέση και υψηλή ανακλαστικότητα (0.2, 0.5 και 0.8 αντίστοιχα).

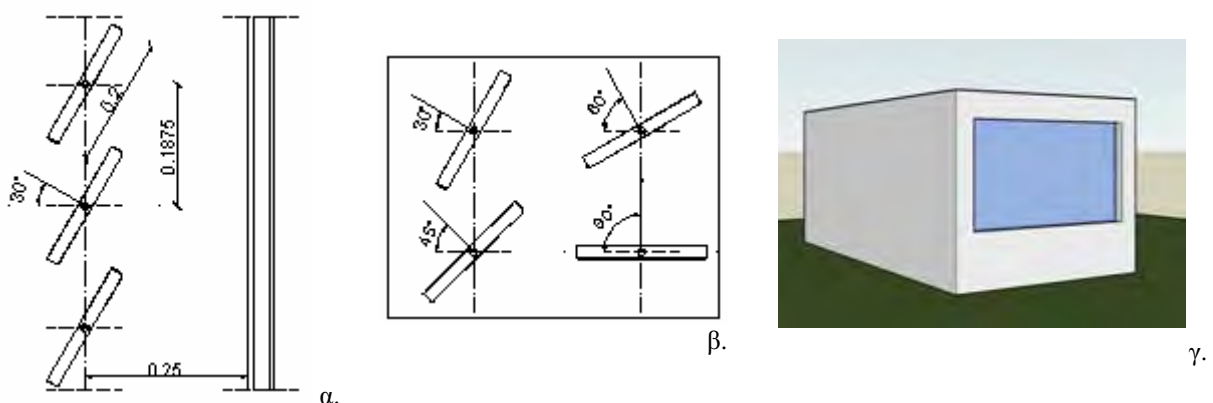
Η θερμική συμπεριφορά του χώρου αναφοράς και των μοντέλων της παραμετρικής ανάλυσης διερευνήθηκε με τη βοήθεια του προσομοιωτικού προγράμματος energy plus. Συγκεκριμένα, εκτιμήθηκαν:

- η διαπερατότητα των περσίδων σε άμεση και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία,
- τα ηλιακά κέρδη,
- η ένταση του φυσικού φωτός και η θάμβωση.

Στην παραμετρική ανάλυση έγινε η παραδοχή ότι το μοντέλο λειτουργεί χωρίς εσωτερικά θερμικά φορτία από άτομα, μηχανήματα, τεχνητό φωτισμό και αερισμό. Τα ηλιακά κέρδη υπολογίστηκαν για τη θερμαντική περίοδο (1 Οκτωβρίου έως 30 Απριλίου) και για την ψυκτική περίοδο (1 Μαΐου έως 30 Σεπτεμβρίου). Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από το αρχείο IWEC (International Weather for Energy Calculations) για τη Θεσσαλονίκη [1].

Παράλληλα με τη θερμική συμπεριφορά, μελετήθηκε η επιρροή των περσίδων στη διαμόρφωση των επιπέδων φυσικού φωτισμού, θεωρώντας 2 σημεία ελέγχου στην επιφάνεια εργασίας (σε ύψος 0.90m από το δάπεδο), τα οποία ανήκουν στον άξονα συμμετρίας του χώρου και βρίσκονται σε απόσταση 2.20m και 5.20m από το άνοιγμα. Στα σημεία αυτά υπολογίστηκε από το energy plus η ένταση του φυσικού φωτός και ο δείκτης θάμβωσης για όλα τα μοντέλα της παραμετρικής ανάλυσης.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων έγινε σε δύο χαρακτηριστικές ημέρες του έτους, σύμφωνα με το κλιματικό αρχείο που χρησιμοποιήθηκε, μία για τη χειμερινή περίοδο (11 Ιανουαρίου: σκοτεινότερη και ψυχρότερη μέρα του χειμώνα) και μία για τη θερινή περίοδο (4 Ιουλίου: φωτεινότερη και θερμότερη μέρα του καλοκαιριού), ώστε να γίνει εμφανής η επίδραση της μεταβολής της θέσης του ήλιου στον καθορισμό της διαπερατότητας του συστήματος και της ενεργειακής του συμπεριφοράς.



Σχήμα 1. α) Η γεωμετρία των περσίδων για γωνία κλίσης 30° στο σύστημα περσίδων-υαλοπίνακα β) Οι εξεταζόμενες γωνίες κλίσης περσίδων στην παραμετρική ανάλυση. γ) Το μοντέλο μελέτης,

3. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η διαπερατότητα του συστήματος περσίδων-υαλοπίνακα εκφράζει την ποσότητα της προσπίπτουσας στο άνοιγμα ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στο χώρο και διακρίνεται:

- στη διαπερατότητα στην άμεση ακτινοβολία, η οποία εκφράζει την άμεση ηλιακή ακτινοβολία που διέρχεται ανεμπόδιστα διαμέσου του συστήματος περσίδων-υαλοπίνακα στον εσωτερικό χώρο,
- στη διαπερατότητα στην άμεση-ανακλώμενη ακτινοβολία, η οποία εκφράζει την άμεση ηλιακή ακτινοβολία που διέρχεται από το σύστημα, αφού ανακλαστεί στην επιφάνεια των περσίδων,
- στη διαπερατότητα σε διάχυτη ακτινοβολία, η οποία εκφράζει τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία που διέρχεται ανεμπόδιστα διαμέσου του συστήματος από το άνοιγμα,
- στη διαπερατότητα σε διάχυτη-ανακλώμενη ακτινοβολία, η οποία προσδιορίζει τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία που διέρχεται από το άνοιγμα, αφού ανακλαστεί στην επιφάνεια των περσίδων.

Ο υπολογισμός της διαπερατότητας συστημάτων με περσίδες έγινε στο πρόγραμμα energy plus με τη χρήση του μοντέλου εκτίμησης διαπερατοτήτων του Simmler [2]. Στο συγκεκριμένο μοντέλο η διαπερατότητα σε άμεση ακτινοβολία υπολογίζεται αναλυτικά ως γεωμετρικό πρόβλημα, ενώ για τον υπολογισμό της άμεσης - ανακλώμενης διαπερατότητας γίνεται η παραδοχή ότι η επιφάνεια των περσίδων είναι πλήρως διαχυτική. Η διαπερατότητα στη διάχυτη ακτινοβολία αντιμετωπίζεται με τη μέθοδο «καθαρής ακτινοβολίας» (net radiation method), χωρίς να γίνεται διαχωρισμός σε άμεσα διερχόμενη και ανακλώμενη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία, αλλά με την παραδοχή ότι όλη η διερχόμενη από τις περσίδες διάχυτη ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνειά τους πριν εισέλθει στο χώρο.

Από την ανάλυση προέκυψε ότι η διαπερατότητα του συστήματος διαφοροποιείται έντονα ανάλογα με την κλίση και την ανακλαστικότητα των περσίδων σε συνδυασμό πάντα και με τη γωνία της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (Πίνακας 1). Συγκεκριμένα, σε ετήσια βάση η διαπερατότητα σε άμεση ακτινοβολία είναι αρκετά χαμηλή στην περίπτωση των περσίδων με κλίση 30°, καθώς δεν υπερβαίνει το 2.6%, αυξάνεται σημαντικά με την περιστροφή των περσίδων και αποκτά τη μέγιστη τιμή της στην περίπτωση των οριζόντιων ελασμάτων (78%). Οι μέσες τιμές που συναντώνται, ωστόσο, κατά τη διάρκεια του έτους είναι αρκετά χαμηλότερες: μόλις 1% στην περίπτωση των περσίδων με κλίση 30%, περίπου 5% για κλίση περσίδων 45°, 11% για κλίση περσίδων 60° και 36% για τις οριζόντιες περσίδες.

Η διαπερατότητα σε άμεση ανακλώμενη ακτινοβολία κυμαίνεται σε πολύ χαμηλότερες τιμές, καθώς η μέση τιμή της κατά τη διάρκεια του έτους δεν υπερβαίνει το 10% στις περιπτώσεις των περσίδων χαμηλής και μεσαίας ανακλαστικότητας οποιασδήποτε κλίσης. Στην περίπτωση των περσίδων με υψηλή ανακλαστικότητα, η διαπερατότητα του συστήματος είναι αρκετά υψηλότερη· ιδιαίτερα όταν βρίσκονται σε οριζόντια θέση, η διαπερατότητα φτάνει το 30% (μέγιστη τιμή) και ισούται με 20% κατά μέσο όρο σε ετήσια βάση.

Αντίθετα, η διαπερατότητα σε διάχυτη ακτινοβολία εμφανίζει πιο ομαλές διακυμάνσεις, ακολουθώντας, όμως την ίδια λογική της αύξησής της με την αύξηση της γωνίας κλίσης και της ανακλαστικότητας των περσίδων. Αξίζει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι ποσοτικά η διαπερατότητα του συστήματος σε διάχυτη ακτινοβολία υπερέχει κατά μέσο όρο από τις υπόλοιπες συνιστώσες της.

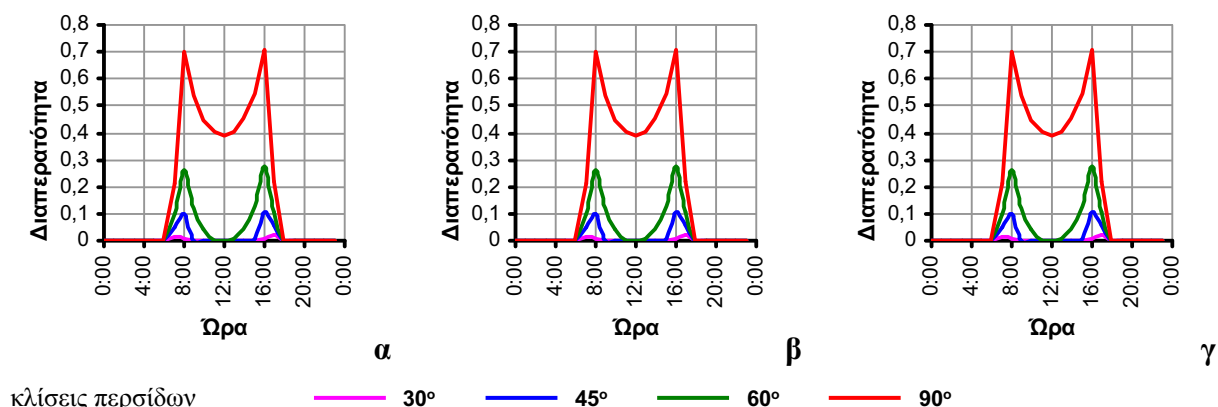
Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται η μεταβολή της διαπερατότητας του συστήματος σε άμεση ακτινοβολία σε μία τυπική χειμερινή ημέρα για τις διάφορες γωνίες κλίσης και τις ανακλαστικότητες των περσίδων. Είναι εμφανές ότι η επίδραση της ανακλαστικότητας των περσίδων είναι αμελητέα, αφού ο υπολογισμός της διαπερατότητας σε άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι καθαρά γεωμετρικό πρόβλημα. Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι η διαπερατότητα του συ-

Πίνακας 1. Μέσες τιμές διαπερατότητας του συστήματος περσίδων-υαλοπίνακα.									
Κλίση περ- σίδων	Διαπερατότητα σε άμεση ακτινοβολία			Διαπερατότητα σε άμεση ανα- κλώμενη ακτινοβολία			Διαπερατότητα σε διάχυτη ανα- κλώμενη ακτινοβολία		
	Ανακλαστικότητα			Ανακλαστικότητα			Ανακλαστικότητα		
	Χαμηλή	Μεσαία	Υψηλή	Χαμηλή	Μεσαία	Υψηλή	Χαμηλή	Μεσαία	Υψηλή
30°	0.0107	0.0107	0.0107	0.0080	0.0336	0.0779	0.1840	0.2159	0.2683
45°	0.0533	0.0533	0.0533	0.0144	0.0546	0.1219	0.2589	0.3007	0.3653
60°	0.1093	0.1093	0.1093	0.0217	0.0753	0.1620	0.3130	0.3622	0.4349
90°	0.3597	0.3597	0.3597	0.0328	0.0986	0.1949	0.3548	0.4095	0.4876

στήματος αποκτά υψηλότερες τιμές, όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης των περσίδων λόγω της διεύρυνσης του μεταξύ τους ανοίγματος από την περιστροφή τους. Επιπλέον, η διαπερατότητα του συστήματος σε όλες τις περιπτώσεις κλίσης των περσίδων μεταβάλλεται έντονα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η χαμηλή τροχιά του ήλιου σε συνδυασμό με τη σχεδόν κατακόρυφη θέση των περσίδων στην περίπτωση των 30° αποτρέπει τον άμεσο ηλιασμό κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Καθώς οι περσίδες περιστρέφονται προς την οριζόντια θέση, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στο χώρο τις πρωινές και τις απογευματινές ώρες της τυπικής χειμερινής ημέρας, με αποτέλεσμα στις συγκεκριμένες περιόδους η διαπερατότητα του συστήματος να αποκτά τις μέγιστες τιμές της (0.105 για γωνία κλίσης των περσίδων ίση με 45° και 0.275 για γωνία κλίσης των περσίδων ίση με 60°) και να μηδενίζεται μόνο κατά τις μεσημβρινές ώρες, κατά τις οποίες ο ήλιος είναι υψηλότερα. Αντίθετα, στην περίπτωση των οριζόντιων περσίδων η διαπερατότητα του συστήματος κατά τη διάρκεια της ημέρας κυμαίνεται σε αρκετά υψηλότερες τιμές: οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται κατά την ανατολή και τη δύση του ήλιου, ενώ οι ελάχιστες τιμές της παρατηρούνται κατά τις μεσημβρινές ώρες.

Κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου η διαπερατότητα του συστήματος είναι μηδενική, καθώς λόγω της υψηλής τροχιάς του ήλιου, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία αποκόπτεται από τις περσίδες σε όλες τις περιπτώσεις ανεξάρτητα από την κλίση και την ανακλαστικότητά τους.

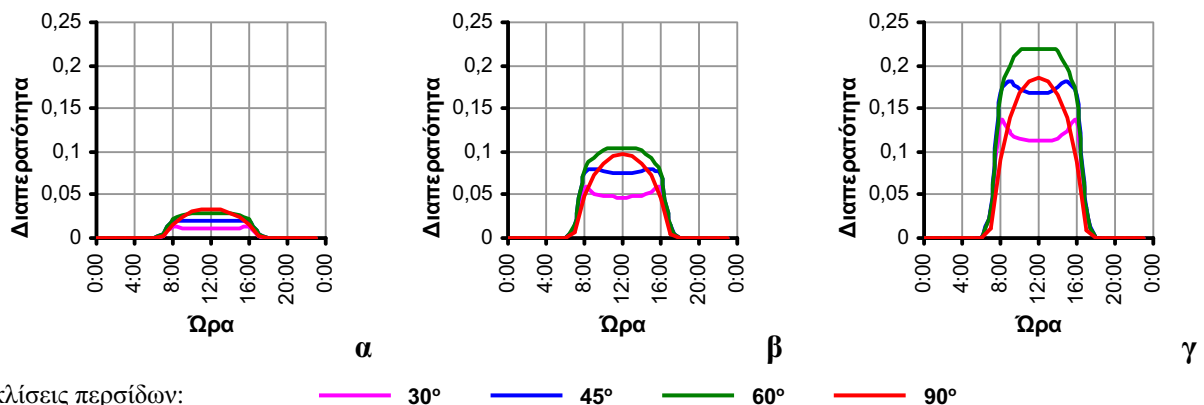
Αντίθετα, η διαπερατότητα σε άμεση-ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζεται σημαντικά από την ανακλαστικότητα της επιφάνειας των περσίδων (σχήμα 3). Στην περίπτωση των περσίδων χαμηλής ανακλαστικότητας η διαπερατότητα σε άμεση ανακλώμενη ακτινοβολία κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, τα οποία αυξάνονται όσο μεγαλώνει η γωνία κλίσης των περσίδων. Κατά τη χειμερινή περίοδο, στην περίπτωση των περσίδων με μικρή κλίση (30° και 45°) οι ημερήσιες καμπύλες διακύμανσης του μεγέθους εμφανίζουν μέγιστες τιμές κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες, όταν δηλαδή ο ήλιος βρίσκεται χαμηλά στον ουράνιο θόλο· στην ενδιάμεση περίοδο η διαπερατότητα ελαττώνεται και αποκτά σταθερή τιμή. Καθώς αυ-



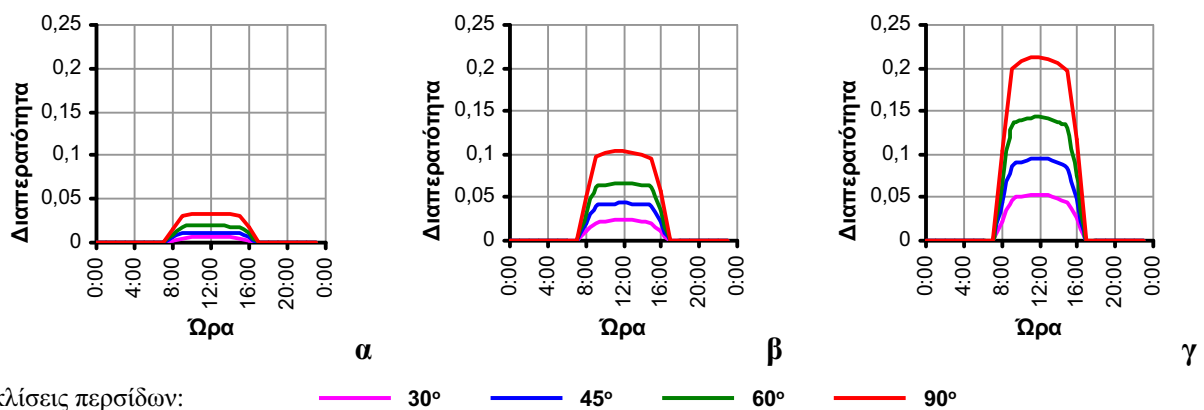
Σχήμα 2. Μεταβολή της διαπερατότητας σε άμεση ακτινοβολία για τις 4 διαφορετικές κλίσεις των περσίδων και για α) χαμηλής, β) μέσης και γ) υψηλής ανακλαστικότητας, για τη χειμερινή ημέρα μελέτης.

ξάνεται η γωνία κλίσης των περσίδων, οι καμπύλες της διαπερατότητας ομαλοποιούνται κι έτσι η μέγιστη τιμή εμφανίζεται κατά τις μεσημβρινές ώρες στην περίπτωση των οριζόντιων περσίδων. Κατά τη θερινή περίοδο, η διαπερατότητα αυξάνεται απότομα κατά τις πρωινές ώρες, στη συνέχεια διατηρείται σε περίπου σταθερές τιμές μέχρι τις τελευταίες απογευματινές ώρες, κατά τις οποίες μειώνεται απότομα (σχήμα 4). Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται στις περσίδες με μέση και υψηλή ανακλαστικότητα, με τη διαφορά ότι η διαπερατότητα σε άμεση ανακλώμενη ακτινοβολία κυμαίνεται σε αρκετά υψηλότερα επίπεδα, τα οποία μάλιστα διαφοροποιούνται εντονότερα μεταξύ των περσίδων με διαφορετική κλίση, καθώς αυξάνεται η ανακλαστικότητα των περσίδων.

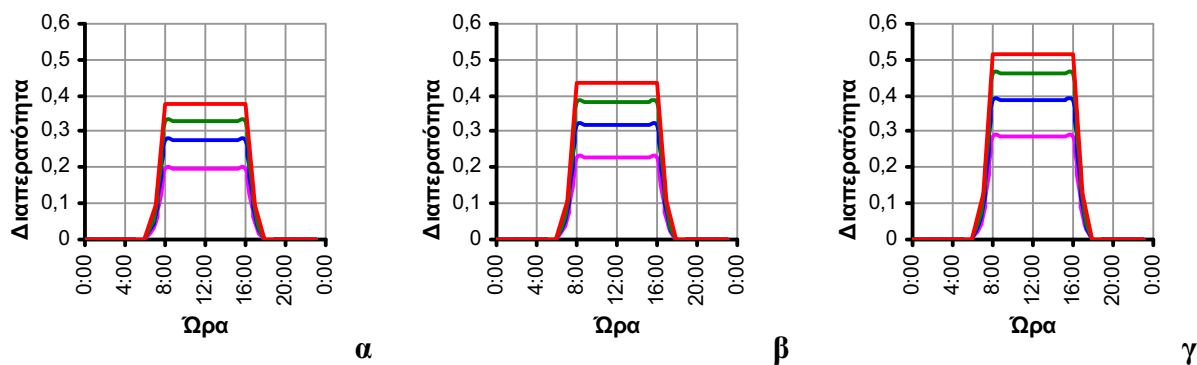
Η ερμηνεία αυτής της παρατήρησης έχει καθαρά γεωμετρική βάση· όσο μικρότερη είναι η κλίση των περσίδων, τόσο αυτές πλησιάζουν προς την κατακόρυφη θέση, με αποτέλεσμα η άμεση ακτινοβολία να προσπίπτει με οξεία γωνία στην επιφάνειά τους και να ανακλάται με ίση γωνία σε επίπεδο κάθετο με την επιφάνειά τους. Στη συνέχεια, η ανακλώμενη ακτινοβολία ανακλάται ξανά στην πίσω επιφάνεια των υπερκείμενων περσίδων και ενδέχεται να υποστεί διαδοχικές ανακλάσεις έως ότου εισχωρήσει τελικά στο χώρο. Γραφικά βρέθηκε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας, τόσο περισσότερες διαδοχικές ανακλάσεις υπόκειται η ηλιακή ακτινοβολία και συνεπώς τόσο μεγαλύτερη είναι η εξασθένησή της μέχρι την εισχώρησή της στο εσωτερικό. Για το λόγο αυτό, στην περίπτωση των περσίδων με κλίση 30° και 45° η διαπερατότητα του συστήματος σε άμεση-ανακλώμενη ακτινοβολία εμφανίζει μέγιστες τιμές τις περιόδους κοντά στην ανατολή και στη δύση του ήλιου. Όσο αυξάνεται η κλίση των περσίδων, τόσο περιορίζεται το πλήθος των διαδοχικών ανακλάσεων και επομένως τόσο αυξάνεται η διαπερατότητα του συστήματος.



Σχήμα 3. Μεταβολή της διαπερατότητας σε άμεση-ανακλώμενη ακτινοβολία για τις 4 διαφορετικές κλίσεις των περσίδων για α) χαμηλής, β) μέσης και γ) υψηλής ανακλαστικότητας, για τη χειμερινή ημέρα μελέτης.



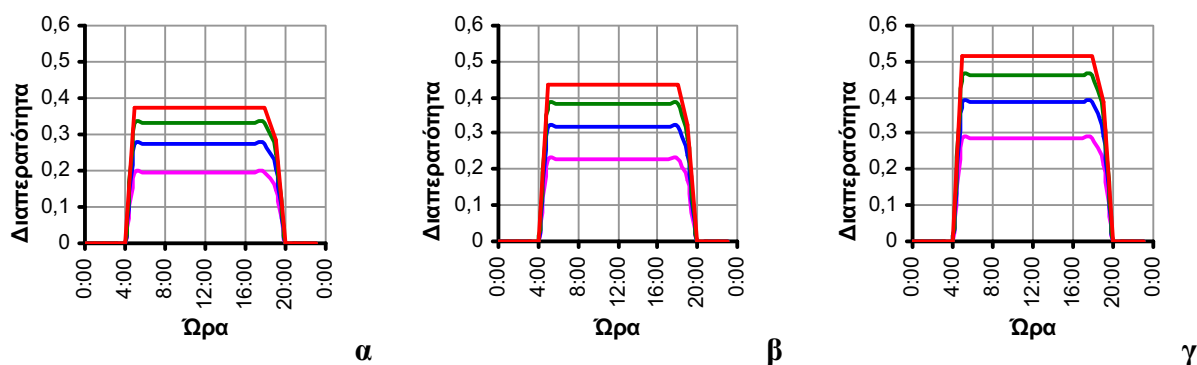
Σχήμα 4. Μεταβολή της διαπερατότητας σε άμεση-ανακλώμενη ακτινοβολία για τις 4 διαφορετικές κλίσεις των περσίδων για α) χαμηλής, β) μέσης και γ) υψηλής ανακλαστικότητας, για τη θερινή ημέρα μελέτης.



κλίσεις περσίδων:

30° 45° 60° 90°

Σχήμα 5. Μεταβολή της διαπερατότητας σε διάχυτη-ανακλώμενη ακτινοβολία για τις 4 διαφορετικές κλίσεις των περσίδων και για α) χαμηλής, β) μέσης και γ) υψηλής ανακλαστικότητας, για τη χειμερινή ημέρα μελέτης.



κλίσεις περσίδων:

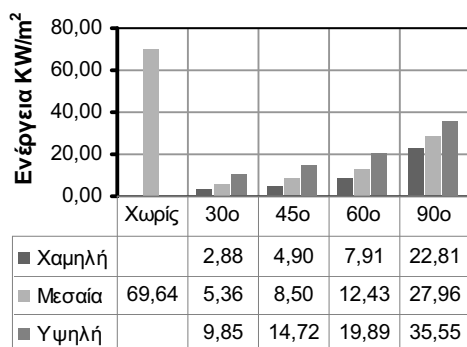
30° 45° 60° 90°

Σχήμα 6. Μεταβολή της διαπερατότητας σε διάχυτη-ανακλώμενη ακτινοβολία για τις 4 διαφορετικές κλίσεις των περσίδων και για α) χαμηλής, β) μέσης και γ) υψηλής ανακλαστικότητας, για τη θερινή ημέρα μελέτης.

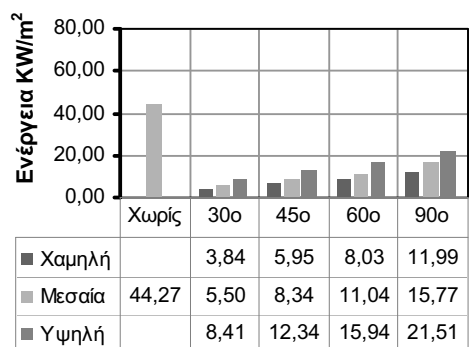
Η διαπερατότητα σε διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία (σχήματα 5, 6) είναι κατά απόλυτη τιμή μεγαλύτερη από τις διαπερατότητες σε άμεση και άμεση-ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία και είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας.

5. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΕΡΔΩΝ

Τα ηλιακά κέρδη στο χώρο αναφοράς ανέρχονται σε περίπου 70kWh/m^2 κατά τη θεωρούμενη ως θερμαντική περίοδο (διάρκειας 7 μηνών) και σε 44kWh/m^2 κατά την ψυκτική περίοδο (διάρκειας 5 μηνών). Η χρήση ηλιοπροστασίας με σταθερές περσίδες επιφέρει αξιόλογη μείωση των ηλιακών κερδών και στις δύο περιόδους (σχήμα 7). Μάλιστα, η μείωση των ηλιακών κερδών φαίνεται να είναι σημαντικότερη κατά τη θερμαντική περίοδο στην περίπτωση των κεκλιμένων περσίδων όλων των ανακλαστικότητων. Αντίθετα, η τοποθέτηση των περσίδων σε οριζόντια θέση επιφέρει μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση των ηλιακών κερδών κατά την ψυκτική περίοδο. Για παράδειγμα, η τοποθέτηση σταθερών περσίδων μέσης ανακλαστικότητας με κλίση 30° προκαλεί μείωση των ηλιακών κερδών κατά 92% τη θερμαντική περίοδο και κατά 88% την ψυκτική περίοδο, ενώ στην περίπτωση των οριζόντιων περσίδων οι αντίστοιχες τιμές είναι ίσες με 60% και 64%.



α.



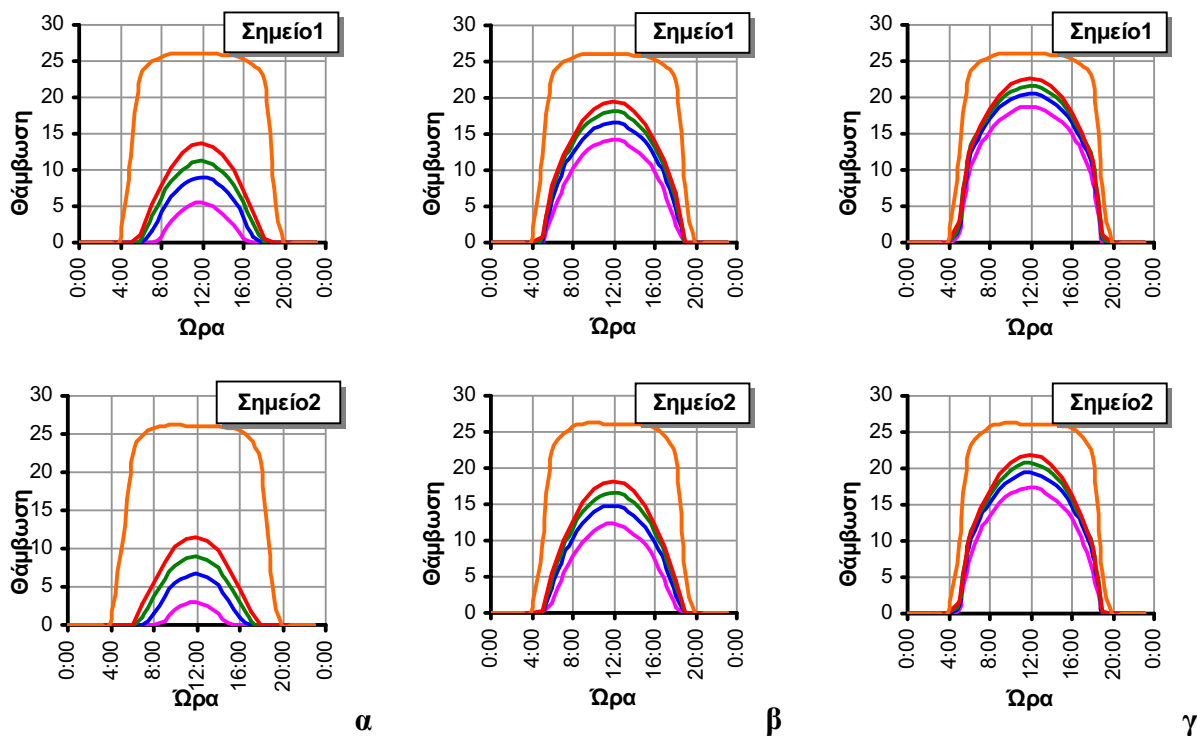
β.

Σχήμα 7. Τα ηλιακά κέρδη κατά τη θερμαντική (α) και την ψυκτική (β) περίοδο για το χώρο αναφοράς και τα μοντέλα της παραμετρικής ανάλυσης.

Σε κάθε περίπτωση, πάντως, η μείωση των ηλιακών κερδών περιορίζεται στην περίπτωση περσίδων με υψηλή ανακλαστικότητα. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι η ποσοστιαία μείωση των ηλιακών κερδών για περσίδες με ίδια κλίση και διαφορετική ανακλαστικότητα δεν ακολουθεί κατ' αναλογία τη μεταβολή των τιμών της ανακλαστικότητας, αλλά εμφανίζει μικρότερες τιμές στην περίπτωση περσίδων υψηλής ανακλαστικότητας.

6. ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ

Η μελέτη του οπτικού περιβάλλοντος έχει βαρύνουσα σημασία τη θερινή περίοδο, κατά την οποία η χρήση της ηλιοπροστασίας είναι επιτακτική και προκαλεί μείωση όχι μόνο των ηλιακών κερδών, αλλά και των επιπέδων φυσικού φωτισμού, ενώ παράλληλα αποτρέπει τη δημιουργία θάμβωσης. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, στους γραφειακούς χώρους διαμορφώνονται συνθήκες οπτικής άνεσης όταν η ένταση φυσικού φωτός είναι τουλάχιστον ίση με 500lx στην επιφάνεια εργασίας και ο δείκτης θάμβωσης δεν υπερβαίνουν το 23 [3].



κλίσεις περσίδων:

30° 45° 60° 90° χωρίς

Σχήμα 8. Μεταβολή της θάμβωσης στα σημεία ελέγχου 1 (πάνω) και 2 (κάτω) για τις 4 διαφορετικές κλίσεις των περσίδων για α) χαμηλής, β) μέσης και γ) υψηλής ανακλαστικότητας περσίδες για τη θερινή ημέρα μελέτης.

Για τη θερινή μέρα μελέτης (σχήμα 8), ο δείκτης θάμβωσης στο χώρο αναφοράς στα δυο σημεία ελέγχου υπερβαίνει τα προτεινόμενα επίπεδα σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, ενώ με την εφαρμογή περσίδων χαμηλής και μέσης ανακλαστικότητας η τιμή του μειώνεται σημαντικά σε όλες τις κλίσεις των περσίδων που μελετήθηκαν. Για περσίδες μεγάλης ανακλαστικότητας ο δείκτης θάμβωσης είναι αρκετά υψηλότερος σε σχέση με τις περσίδες χαμηλής και μέσης ανακλαστικότητας, παραμένει όμως κάτω από το όριο οπτικής άνεσης του 23. Παράλληλα, η ένταση φυσικού φωτός στο σημείο 1 κυμαίνεται σε ικανοποιητικά επίπεδα και παρέχει αυτονομία σε φυσικό φως κατά το μεγαλύτερο μέρος των ωρών εργασίας του χώρου, ιδιαίτερα στην περίπτωση των οριζόντιων περσίδων με υψηλή ανακλαστικότητα. Στο βάθος του χώρου, τα επίπεδα φωτισμού είναι χαμηλότερα, αλλά κρίνονται ικανοποιητικά, ειδικά όταν χρησιμοποιείται επικουρικά ο τεχνητός φωτισμός.

Κατά τη διάρκεια του χειμώνα ο δείκτης θάμβωσης στα δύο σημεία του χώρου αναφοράς πλησιάζει το 25, ενώ σε όλες τις άλλες περιπτώσεις της παραμετρικής ανάλυσης δεν ξεπερνά το 15. Παρατηρείται, ωστόσο, σημαντική μείωση της έντασης φωτισμού στον εσωτερικό χώρο, σε επίπεδα μάλιστα χαμηλότερα των προτεινόμενων για την οπτική άνεση.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια αξιολόγησης ηλιοπροστατευτικών διατάξεων με περσίδες και διερεύνηση της επίδρασής τους στην ενεργειακή και οπτική συμπεριφορά των χώρων, με κριτήριο την διαπερατότητα τους. Η διαπερατότητα των περσίδων σε άμεση και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία μεταβάλλεται συνεχώς ανάλογα με την γεωμετρία και τις οπτικές ιδιότητές τους, καθώς και τη θέση του ηλίου στον ουράνιο θόλο. Η χρήση, λοιπόν, διατάξεων ηλιοπροστασίας με σταθερές περσίδες αποτελεί μια δραστική επέμβαση στο κέλυφος ενός κτιρίου, όχι μόνο αισθητικά, αλλά και ενεργειακά, καθιστώντας το μία δυναμικά μεταβαλλόμενη ενεργειακή μονάδα. Το καλοκαίρι η μικρή διαπερατότητα των σταθερών περσίδων σε οποιαδήποτε από τις εξεταζόμενες κλίση, αποκόπτει τα ανεπιθύμητα ηλιακά κέρδη και μειώνει την πιθανότητα δημιουργίας θάμβωσης, χωρίς να δημιουργεί σημαντικά προβλήματα στα επίπεδα φυσικού φωτισμού. Αντίθετα, το χειμώνα είναι επιθυμητή η μεγιστοποίηση των ηλιακών κερδών κι επομένως είναι προτιμότερη η χρήση περσίδων με μεγάλη ανακλαστικότητα σε οριζόντια θέση.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία είναι μέρος του ερευνητικού προγράμματος «Βελτιστοποίηση ηλιοπροστατευτικών διατάξεων με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας και την επίτευξη συνθηκών θερμικής και οπτικής άνεσης στα κτίρια», που πραγματοποιείται στο πλαίσιο ΠΕΝΕΔ 2003 του Ε.Π. «ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ» που συγχρηματοδοτείται από εθνικά και κοινοτικά κονδύλια (Υπουργείο Ανάπτυξης - ΓΓΕΤ και Ευρωπαϊκή Ένωση) και την εταιρία ALUMIL – ΜΥΛΩΝΑΣ Βιομηχανία Αλουμινίου ΑΕ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=GRC/cname=Greece
2. LBNL (2007). “Energy Plus Engineers Manual”, Documentation version 2.0, US DOE
3. Baker N., Fanchiotti A., Steemers K., (1993). “Daylight in Architecture, a European reference book”. James X James.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗΣ ΔΩΜΑΤΟΣ

Ανδρέας Ανδρουτσόπουλος¹, Ειρήνη Κορωνάκη²

¹ Τμήμα Κτιρίων, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), 19^ο χλμ. Λ. Μαραθώνος, 190 09 Πικέρμι, aandr@cres.gr

² Τομέας Θερμότητας, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου 157 73, koronaki@central.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Ευρωπαϊκή Κοινότητα έχει εκδώσει σειρά οδηγιών για την εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια και δίνει σαφή προτεραιότητα προς αυτή την κατεύθυνση. Στα προτεινόμενα μέτρα και δράσεις των οδηγιών αυτών περιλαμβάνεται και η ενεργειακή θωράκιση του κελύφους του κτιρίου, δεδομένου ότι αυτό αποτελεί το φυσικό σύνορο των εσωτερικών χώρων από το εξωτερικό περιβάλλον. Στην Ελλάδα, η πλειοψηφία του κτιριακού αποθέματός της δεν διαθέτει θερμικά μονωμένα δομικά στοιχεία, όσον δε αφορά στις οροφές των κτιρίων, αυτές ευθύνονται για ένα μεγάλο ποσοστό των συνολικών θερμικών απωλειών τους. Η εφαρμογή ενός συστήματος εξωτερικής θερμομόνωσης δώματος μπορεί να επιτύχει μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του κτιρίου και η μελέτη ενός τέτοιου συστήματος αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Το θερμομονωτικό σύστημα δώματος αρχικά ελέγχθηκε πειραματικά για τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής διαπερατότητάς του, κ και στη συνέχεια μελετήθηκε υπολογιστικά ως προς την ενεργειακή του συμπεριφορά. Η μελέτη περιελάμβανε την εφαρμογή του συστήματος σε οροφή σε δύο τυπολογίες κτιρίων κατοικίας: μία πολυκατοικία και μια διώροφη κατοικία και τη σύγκριση των ενεργειακών αναγκών τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη με αντίστοιχα κτίρια χωρίς μόνωση δώματος. Για τις ανάγκες της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά στοιχεία για τρεις κλιματικές ζώνες της Ελλάδας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με την εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος επιτυγχάνονται σημαντικά ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας στο κτίριο καθώς επίσης και αντίστοιχα ποσοστά μείωσης αέριων ρύπων στο περιβάλλον.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ευρωπαϊκή Ένωση δίνει σαφή προτεραιότητα στην εφαρμογή μέτρων επίτευξης εξοικονόμησης ενέργειας δεδομένου ότι ο τομέας των κτιρίων (οικιακός και τριτογενής) αποτελεί τον μεγαλύτερο καταναλωτή τελικής ενέργειας χρήσης τόσο συνολικά στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα όσο και στην Ελλάδα. Το δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας στον τομέα είναι μεγάλο και κυμαίνεται στο 27% για τα κτίρια κατοικιών [1]. Στην Ελλάδα, λαμβάνοντας υπόψη ότι το μεγαλύτερο ποσοστό κτιρίων είναι μη θερμομονωμένα (ποσοστό μεγαλύτερο του 75% επί του συνόλου των Ελληνικών κτιρίων) [2], ένα σημαντικό ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή θερμομόνωσης στο κέλυφος των κτιρίων. Η συμβολή ενός συστήματος εξωτερικής θερμομόνωσης δώματος στη συνολική εξοικονόμηση ενέργειας ενός κτιρίου εξετάζεται πειραματικά και υπολογιστικά στην παρούσα εργασία. Το σύστημα αυτό, το οποίο μπορεί να εφαρμοσθεί τόσο σε υφιστάμενα όσο και σε νεοανεγειρόμενα κτίρια, αρχικά ελέγχθηκε πειραματικά ως προς τη θερμική του απόδοση και στη συνέχεια ακολούθησε υπολογιστική μελέτη για τις συνολικές ενεργειακές του ανάγκες μετά την εφαρμογή του στην οροφή ενός κτιρίου. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε σύγκριση της ενεργειακής συμπεριφοράς του συστήματος σε σχέση με

την αντίστοιχη μιας μη θερμομονωμένης οροφής για δύο τύπους κτιρίων, ένα κτίριο μονοκατοικίας και ένα κτίριο πολυκατοικίας και υπολογίσθηκαν τα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνονται. Επιπρόσθετα, συγκρίνονται τα ποσοστά αερίων ρύπων όπως το διοξείδιο του άνθρακα, (CO_2), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και το διοξείδιο του θείου (SO_2), που εκλύονται από μια κατασκευή μετά την εφαρμογή του συστήματος εξωτερικής θερμομόνωσης δώματος σε σχέση με τα αντίστοιχα μιας αμόνωτης οροφής.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗΣ ΔΩΜΑΤΟΣ

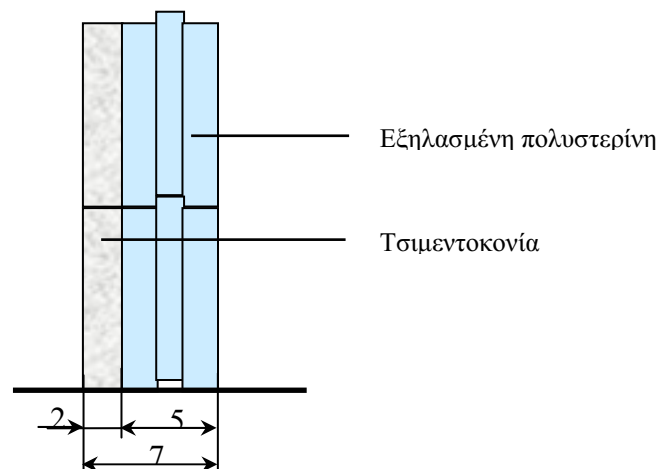
Για τον πειραματικό έλεγχο της θερμικής συμπεριφοράς του συστήματος εξωτερικής θερμομόνωσης δώματος χρησιμοποιήθηκε η διάταξη Προστατευμένου Θερμού Κιβωτίου (Hot Box) του ΚΑΠΕ (Σχήμα 1) [3]. Η διαδικασία μέτρησης ακολούθησε τις απαιτήσεις του προτύπου ΕΛΟΤ EN ISO 8990 [4] για την οποία το ΚΑΠΕ έχει διαπιστευθεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις του διεθνούς, Ευρωπαϊκού και εθνικού προτύπου ΕΛΟΤ EN ISO/IEC 17025. Στα πλαίσια της μέτρησης, κατασκευάστηκε δοκίμιο από το σύστημα εξωτερικής θερμομόνωσης δώματος ορθογωνικής διατομής και συνολικής επιφάνειας $1,82 \text{ m}^2$ (Σχήμα 2). Το σύστημα αυτό είναι ουσιαστικά μια τεχνική ανεστραμμένης μόνωσης και αποτελείται από τσιμεντοκονία πάχους 2 cm και εξηλασμένη πολυστερίνη πάχους 5 cm, διαστάσεων 30 x 60 cm. Συνολικό πάχος δοκιμίου: 7 cm (Σχήμα 3). Για την αεροστεγάνωση των αρμών χρησιμοποιήθηκε σιλικόνη μεταξύ των θερμομονωτικών πλακιδίων και των επαφών τους με το πλαίσιο στήριξης δοκιμίων.



Σχήμα 1. Διάταξη προστατευμένου θερμού κιβωτίου



Σχήμα 2. Έτοιμο δοκίμιο στο πλαίσιο στήριξής του



Σχήμα 3. Κατακόρυφη τομή δοκιμίου (οι διαστάσεις σε cm)

Από την πειραματική διαδικασία προέκυψε το παρακάτω αποτέλεσμα για τον προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας, κ (ή U-value) του δοκιμίου:

Συντελεστής Θερμικής Διαπερατότητας, $\kappa = 0,596 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

με αβεβαιότητα των μετρήσεων καλύτερη από $\pm 6\%$ σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% περίπου.

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η υπολογιστική μελέτη είχε ως στόχο τη διερεύνηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του δομικού συστήματος που ελέγχθηκε πειραματικά μετά την εφαρμογή του σε κτίρια κατοικίας και τη σύγκρισή τους με αντίστοιχη κατοικία δίχως θερμομόνωση στην οροφή. Η μεθοδολογία της μελέτης επικεντρώθηκε κυρίως σε:

- Ανάλυση των μικροκλιματικών και περιβαλλοντικών συνθηκών.
- Έλεγχο της θερμικής συμπεριφοράς του δομικού συστήματος που μετρήθηκε πειραματικά με τη χρήση υπολογιστικού εργαλείου προσομοίωσης της μεταβατικής μεταφοράς θερμότητας.
- Διερεύνηση της ενεργειακής συμπεριφοράς δύο ειδών κτιρίων μετά την εφαρμογή του δομικού συστήματος δώματος που μετρήθηκε και σύγκρισή της με τη συμπεριφορά αντίστοιχου κτιρίου με αμόνωτη οροφή.
- Εξέταση των εκπομπών αέριων ρύπων μετά την εφαρμογή των διαφορετικών δοκιμίων.

Όσον αφορά στα θερμικά κέρδη των κτιρίων, στη μελέτη περιελήφθησαν:

- τα εσωτερικά ή τυχαία κέρδη, που αποδίδονται από τους χρήστες και τις δραστηριότητές τους,
- τα εσωτερικά κέρδη που προέρχονται από τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών και το φωτισμό,
- τα εξωτερικά θερμικά κέρδη προερχόμενα από την ηλιακή ακτινοβολία, κυρίως μέσω των υαλοστασίων (ιδιαίτερα όταν αυτά είναι προσανατολισμένα στο νότο) και τις υψηλές εξωτερικές θερμοκρασίες,

Όσον αφορά στα θερμικά φορτία, αυτά περιλαμβάνουν:

- τις απώλειες από το κέλυφος (οροφή, τοιχοποιίες και δάπεδο) και τα ανοίγματα του κτιρίου,
- τις απώλειες λόγω αερισμού, μηχανικού ή φυσικού, από ανοίγματα στο κέλυφος και διείσδυσης του αέρα (κουφώματα, χαραμάδες, κ.α.).

Για την ενεργειακή ανάλυση και τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του δομικού συστήματος χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα TRNSYS, έκδοση 15.2 [5] ενώ για την ανάλυση των θερμικών ιδιοτήτων των υαλοπινάκων, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό WINDOW (έκδοση 5.2) [6].

3.1 Εξεταζόμενες τυπολογίες κτιρίων

Στα πλαίσια της μελέτης εξετάστηκαν δύο είδη κτιρίων: ένα κτίριο διώροφης κατοικίας κι ένα κτίριο πολυκατοικίας. Για κάθε εξεταζόμενο κτίριο χρησιμοποιήθηκαν πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά κατασκευής του, τα ωράρια λειτουργίας του, τα εσωτερικά κέρδη καθώς και την εγκατεστημένη ισχύ των φωτιστικών σωμάτων. Οι πληροφορίες αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Κύρια χαρακτηριστικά κτιρίων		
	Κτίριο διώροφης κατοικίας	Κτίριο πολυκατοικίας
Ωράριο λειτουργίας. Ωρες/ημέρα: Ημέρες/εβδομάδα:	24 7	24 7
Κτιριακές Εγκαταστάσεις. Αριθμός ορόφων: Επιφάνεια δαπέδου ορόφου: Συνολική επιφάνεια δαπέδου:	Ισόγειο + 1 όροφος 250 m ² 500 m ²	Ισόγειο + 3 όροφοι 260 m ² 1040 m ²
Κάτοψη κτιρίου:	E = 10 x 25	E = 10 x 26
Κατασκευαστικά στοιχεία:	Φέροντας οργανισμός από οπλισμένο σκυρόδεμα, διπλή δρομική τοιχοποιία με ενδιάμεση μόνωση πάχους 5 cm. Σύστημα διπλών υαλοστασίων θερμικής συμπεριφοράς $U=3,2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.	
Φωτισμός:	Λαμπτήρες φθορισμού και υπάρχουσες συσκευές σε όλους τους χώρους συνολικής πυκνότητας ισχύος 10 W/m ² .	

Το κτιριακό κέλυφος του υπογείου αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 25 cm. Τα παραπάνω αναφερθέντα στοιχεία συνθέτουν την κατασκευή αναφοράς, η οποία θα αναφέρεται στη συνέχεια ως κτίριο αναφοράς.

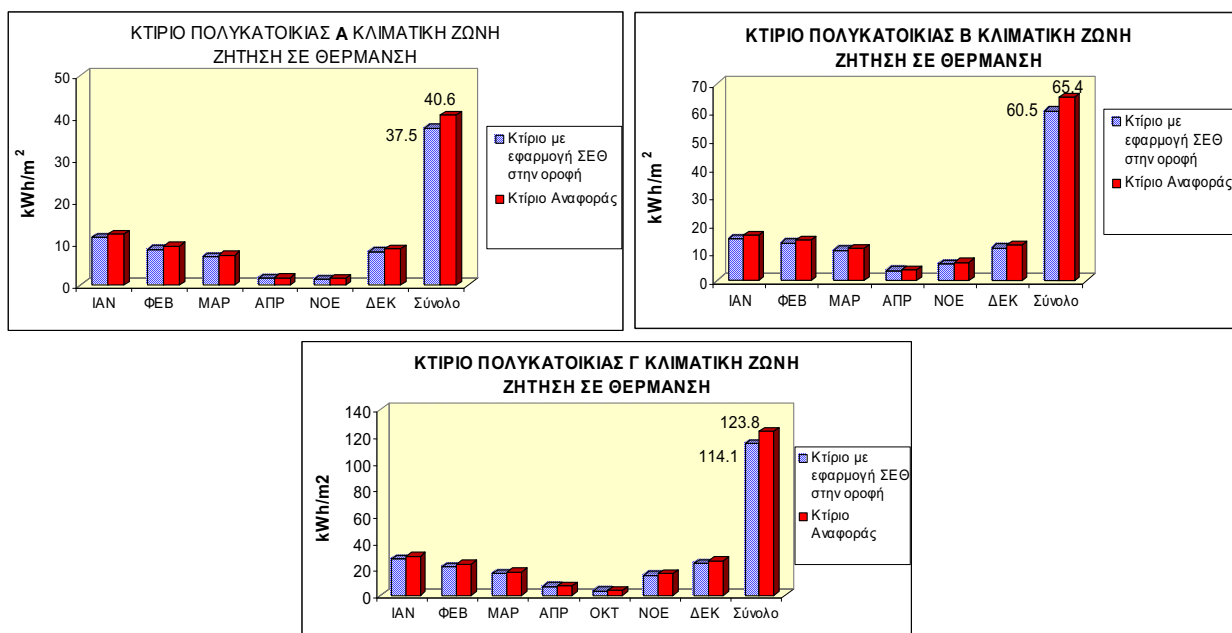
3.2 Κλιματικά στοιχεία

Για τους υπολογισμούς των κύριων παραμέτρων θερμικής προστασίας του κτιριακού κελύφους, δηλαδή των συντελεστών θερμοπερατότητας κατά την περίοδο θέρμανσης, χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις κλιματικές ζώνες βάσει του μέχρι σήμερα Κανονισμού θερμομόνωσης. Έτσι, για την Α' κλιματική ζώνη χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά στοιχεία της πόλης του Ηρακλείου, για τη Β' κλιματική ζώνη χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά στοιχεία της Αθήνας και για την Γ' κλιματική ζώνη χρησιμοποιήθηκαν τα αντίστοιχα στοιχεία για την πόλη της Θεσσαλονίκης.

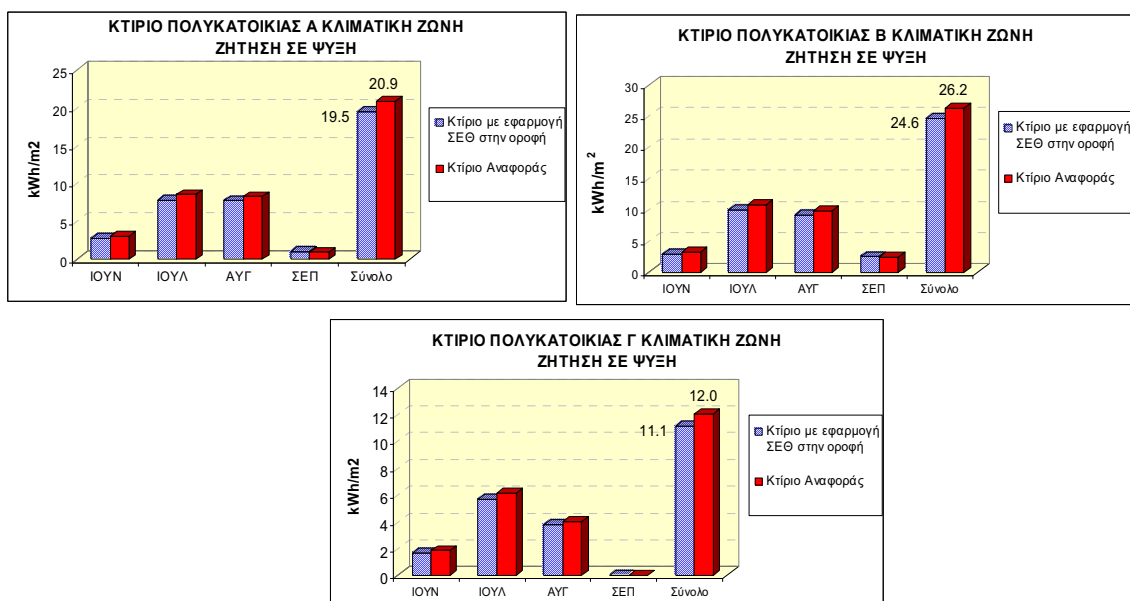
3.3 Αποτελέσματα ενεργειακής συμπεριφοράς σε κτίριο πολυκατοικίας

Στα πλαίσια ελέγχου της συμβολής του εξωτερικού συστήματος θερμομόνωσης δώματος στην εξοικονόμηση ενέργειας σε κτίριο πολυκατοικίας, αρχικά υπολογίστηκε η ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση και ψύξη του κτιρίου αναφοράς, στη συνέχεια η αντίστοιχη ενεργειακή ζήτηση μετά την εφαρμογή του συστήματος εξωτερικής θερμομόνωσης (ΣΕΘ) στην οροφή της κατοικίας και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματά τους. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η ενεργειακή ζήτηση (μηνιαία και ετήσια) για θέρμανση και στο Σχήμα 5 η αντίστοιχη ενεργειακή ζήτηση για ψύξη σε κτίριο πολυκατοικίας με οροφή χωρίς θερμομόνωση και μετά την εφαρμογή του θερμομονωτικού πλακιδίου για τις τρεις κλιματικές ζώνες.

Από τα σχήματα 4 και 5 διαπιστώνεται ότι για κτίριο πολυκατοικίας η μεγαλύτερη ζήτηση για θέρμανση παρατηρείται στη Γ' κλιματική ζώνη, όπου οι ανάγκες είναι σημαντικά αυξημένες, ακολουθούμενη από τη ζήτηση στη Β' κλιματική και τέλος στη Α' ζώνη όπου και οι ανάγκες για θέρμανση είναι και οι χαμηλότερες, ενώ στην περίπτωση των αναγκών για ψύξη η μεγαλύτερη ανάγκη για ψύξη παρατηρείται στις κλιματικές συνθήκες της Αθήνας λόγω της ιδιαιτερότητας της περιοχής, ακολουθούμενη από την Α' κλιματική ζώνη και τέλος την Γ' κλιματική ζώνη.

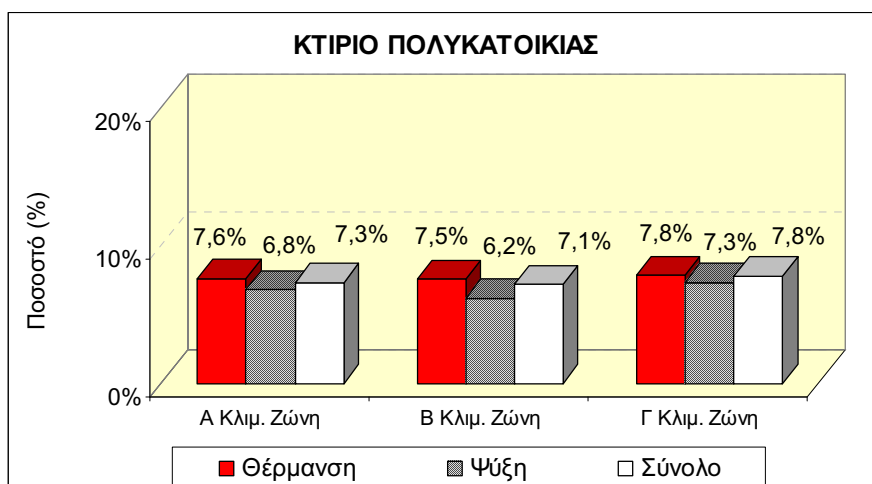


Σχήμα 4. Ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση σε κτίριο πολυκατοικίας με αμόνωτη οροφή και μετά την εφαρμογή συστήματος θερμομόνωσης δώματος



Σχήμα 5. Ενεργειακή ζήτηση για ψύξη σε κτίριο πολυκατοικίας με αμόνωτη οροφή και μετά την εφαρμογή συστήματος θερμομόνωσης δώματος

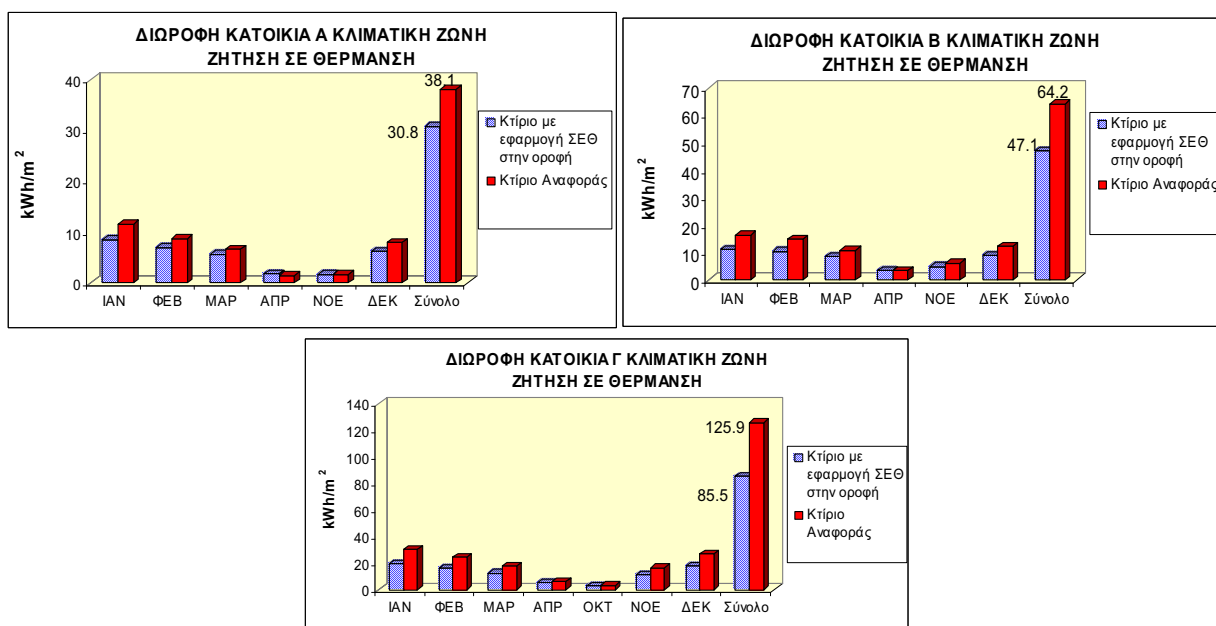
Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται τα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη που επιτυγχάνονται μετά την εφαρμογή του συστήματος σε σχέση με το αντίστοιχο κτίριο χωρίς θερμομόνωση στην οροφή για όλες τις κλιματικές ζώνες. Παρατηρείται ότι τα συνολικά ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας κυμαίνονται μεταξύ 7.1% και 7.8%.



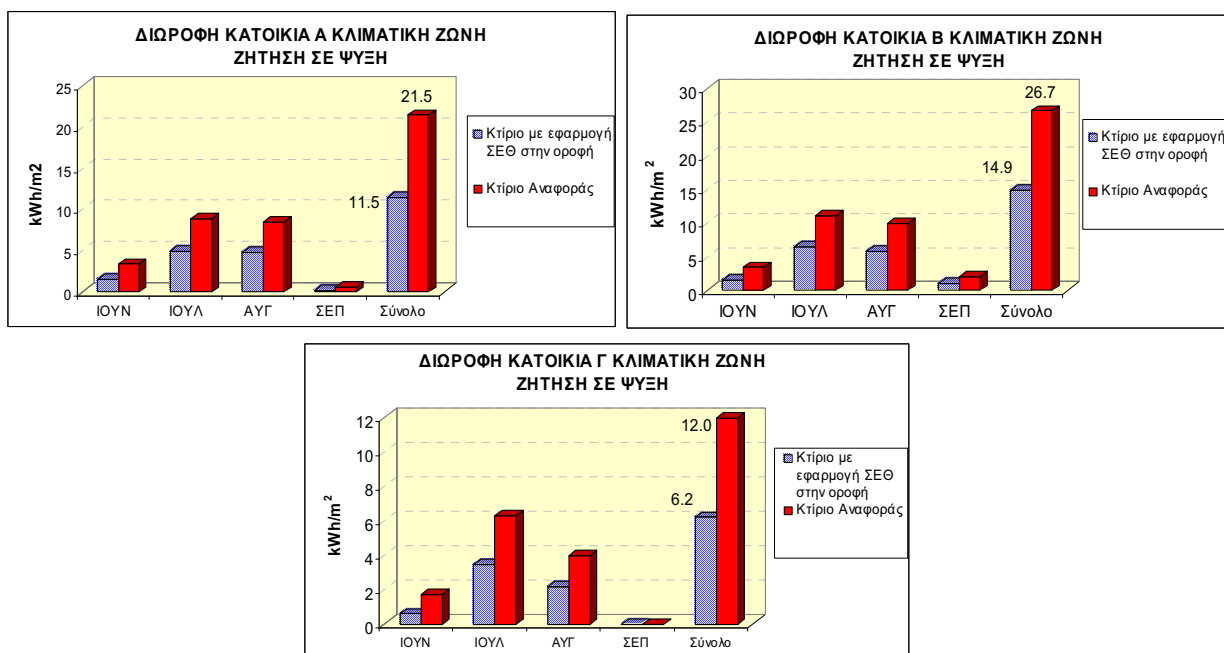
Σχήμα 6. Εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη του συστήματος θερμομόνωσης δώματος σε σχέση με το κτίριο αναφοράς σε όλες τις κλιματικές ζώνες

3.4 Αποτελέσματα ενεργειακής συμπεριφοράς σε κτίριο διώροφης κατοικίας

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση και ψύξη σε διώροφη κατοικία όταν αυτή διαθέτει σύστημα εξωτερικής θερμομόνωσης δώματος και συγκρίθηκε με την αντίστοιχη ενεργειακή ζήτηση κτιρίου με τα ίδια χαρακτηριστικά και αμόνωτη οροφή. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η ενεργειακή ζήτηση (μηνιαία και ετήσια) για θέρμανση του κτιρίου με το ΣΗΘ δώματος και χωρίς για τις τρεις κλιματικές ζώνες ενώ στο Σχήμα 8 η αντίστοιχη ενεργειακή ζήτηση για ψύξη. Από τα σχήματα διαπιστώνεται ότι και στην περίπτωση της διώροφης κατοικίας, η μεγαλύτερη ζήτηση για θέρμανση παρατηρείται στη Γ' κλιματική ζώνη, όπου οι ανάγκες είναι σημαντικά αυξημένες, ακολουθούμενη από τη ζήτηση στη Β' κλιματική και τέλος στη Α' ζώνη, με αισθητά όμως μειωμένες ανάγκες στην περίπτωση που στο κτίσμα εφαρμοσθεί ΣΗΘ δώματος (συγκρινόμενο με τις αντίστοιχες ανάγκες του κτιρίου πολυκατοικίας – Σχήμα 4). Όσον αφορά στις ενεργειακές ανάγκες για ψύξη, κι εδώ οι ανάγκες αυτές είναι αισθητά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες του κτιρίου πολυκατοικίας (Σχήμα 5).

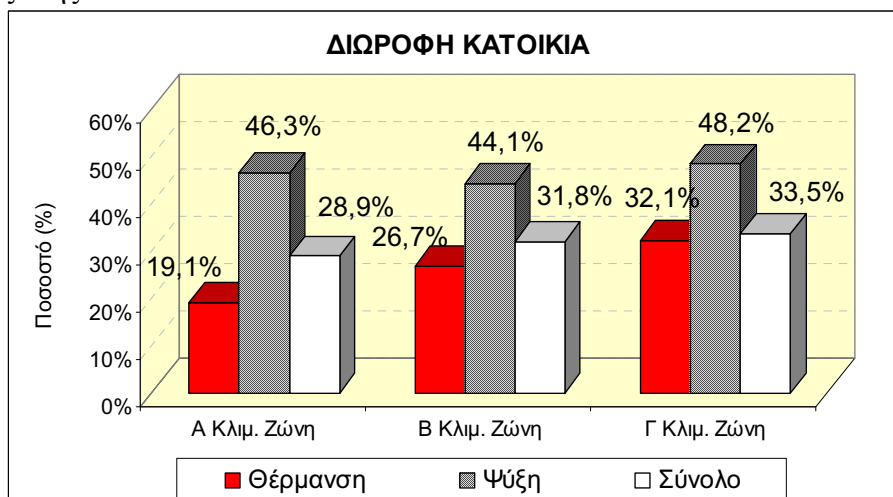


Σχήμα 7. Ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση σε διώροφη κατοικία με αμόνωτη οροφή και μετά την εφαρμογή συστήματος θερμομόνωσης δώματος



Σχήμα 8. Ενεργειακή ζήτηση για ψύξη σε διώροφη κατοικία με αμόνωτη οροφή και μετά την εφαρμογή συστήματος θερμομόνωσης δώματος

Τέλος, στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται τα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη που επιτυγχάνονται μετά την εφαρμογή του συστήματος σε σχέση με αντίστοιχο κτίριο με αμόνωτη οροφή. Από το σχήμα διαπιστώνεται ότι για κτίρια διώροφης κατοικίας το μεγαλύτερο ποσοστό συνολικής εξοικονόμησης ενέργειας παρατηρείται στην Γ κλιματική ζώνη (33.5%) ακολουθούμενο από τα αντίστοιχα της Β (31.8%) και της Α (28.9%) κλιματικής ζώνης.

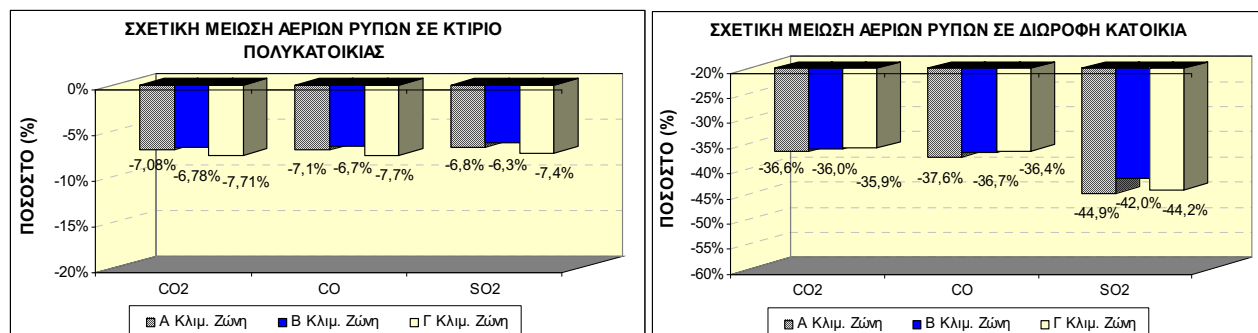


Σχήμα 9. Εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη του συστήματος θερμομόνωσης δώματος σε σχέση με το κτίριο αναφοράς

4. ΜΕΙΩΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ

Λαμβάνοντας υπόψη τις ενεργειακές αναλύσεις που έλαβαν χώρα για τις δύο τυπολογίες κτιρίου κατοικίας οι οποίες διαθέτουν σύστημα θερμομόνωσης δώματος, υπολογίστηκαν οι εκπομπές αέριων ρύπων του διοξειδίου του άνθρακα, του μονοξειδίου του άνθρακα και του διοξειδίου του θείου, όταν χρησιμοποιείται ως καύσιμο το πετρέλαιο για τις εγκαταστάσεις θέρμανσης και η ηλεκτρική ενέργεια για τις εγκαταστάσεις ψύξης. Στο Σχήμα 10

παρουσιάζονται τα ποσοστά της σχετικής μείωσης των αέριων ρύπων που προκύπτουν για το κάθε είδος κτιρίου μετά την εφαρμογή του ΣΕΘ δώματος και τη σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα κτίρια αναφοράς για τις τρεις κλιματικές ζώνες.



Σχήμα 10. Σχετική μείωση αερίων ρύπων σε κτίριο πολυκατοικίας (αριστερά) και σε διώροφη κατοικία

Από το σχήμα φαίνεται ότι το εγκατεστημένο σύστημα εξωτερικής θερμομόνωσης δώματος σε κτίριο πολυκατοικίας επιφέρει μείωση των εκπομπών CO₂ που κυμαίνονται από 6.8 έως 7.7%, των εκπομπών CO από 6.7 έως 7.7% και των εκπομπών SO₂ από 6.3 έως 7.4%. Τα δε αντίστοιχα ποσοστά μείωσης εκπομπών σε κτίριο διώροφης κατοικίας είναι: CO₂ από 36 έως 36.6%, CO από 36.4 έως 37.6% και SO₂ από 42 έως 45%.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ένα σύστημα εξωτερικής θερμομόνωσης δώματος εξετάστηκε πειραματικά και υπολογιστικά ως προς την θερμική του συμπεριφορά και τη δυνατότητα συμβολής του στη εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια. Ο πειραματικός έλεγχος του συστήματος πραγματοποιήθηκε με έλεγχο του σε διάταξη προστατευμένου θερμού κιβωτίου ακολουθώντας διαπιστευμένη υπηρεσία δοκιμών έτσι ώστε να επιτευχθεί μια ρεαλιστική απεικόνιση της θερμικής συμπεριφοράς του συστήματος βάσει πρότυπης διαδικασίας μέτρησης.

Η υπολογιστική μελέτη χρησιμοποίησε τα αποτελέσματα του ελέγχου και διερεύνησε την ενεργειακή συμπεριφορά του συστήματος όταν αυτό εφαρμοσθεί σε δύο τυπολογίες κτιρίων, ένα κτίριο πολυκατοικίας κι ένα διώροφο κτίριο κατοικίας και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματά τους με τα αντίστοιχα όμοιας κατασκευής χωρίς θερμομόνωση στην οροφή για τρεις κλιματικές ζώνες της Ελλάδας. Η μελέτη έδειξε μείωση των ενεργειακών αναγκών ενός κτιρίου μετά την εφαρμογή του συστήματος, τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη. Για το κτίριο πολυκατοικίας, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση της τάξεως του 7.6% και για ψύξη 6.8%. Αντίστοιχα, για το κτίριο διώροφης κατοικίας, τα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας για θέρμανση που επιτυγχάνονται κυμαίνονται μεταξύ του 19% και 32%, ενώ για ψύξη μεταξύ του 44% και 48%.

Παράλληλα, υπολογίστηκαν οι εκπομπές αέριων ρύπων του CO₂, του CO και του SO₂ σε κτίσματα που διαθέτουν σύστημα εξωτερικής θερμομόνωσης δώματος και συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες κατασκευής χωρίς θερμομόνωση στην οροφή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι επιτυγχάνεται μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων προς την ατμόσφαιρα η οποία στην περίπτωση του κτιρίου πολυκατοικίας φθάνει για το CO₂ και το CO το 7.7% και για το SO₂ το 7.1% ενώ στην περίπτωση της διώροφης κατοικίας αγγίζει για το CO₂ το 37%, για το CO το 38% και για το SO₂ το 45%.

Γενικά, η εφαρμογή ενός συστήματος εξωτερικής θερμομόνωσης δώματος σε ένα κτίριο συμβάλει στη μείωση των ενεργειακών του αναγκών τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη. Η χρήση του, ιδιαίτερα σε υφιστάμενα κτίρια, μπορεί να είναι ευρεία, δεδομένου ότι ένα μεγάλο ποσοστό Ελληνικών κτιρίων δεν διαθέτουν θερμομόνωση. Σε εθνικό επίπεδο, τα συστήματα

αυτά μπορούν να συνεισφέρουν στην ελάττωση της τελικής καταναλισκόμενης ενέργειας, μειώνοντας ταυτόχρονα τις εκπομπές επιβλαβών ρύπων στο περιβάλλον.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. COM(2006) 545. Ανακοίνωση της Επιτροπής, «Σχέδιο δράσης για την ενεργειακή απόδοση: Αξιοποίηση του δυναμικού», Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, Βρυξέλλες, 19.10.2006.
2. Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδας, «Αποτελέσματα απογραφής κατασκευών και κτιρίων της 1^{ης} Δεκεμβρίου 1990», ΕΣΥΕ, Αθήνα, 2000.
3. Ιστοσελίδα: <http://www.cres.gr/services/istos.chtm?prnbr=25112&locale=el>
4. EN ISO 8990, Thermal insulation - Determination of steady-state thermal transmission properties - Calibrated and guarded hot box, 1996.
5. TRNSYS ver. 15.2, «TRNSYS Users Guide: A Transient Simulation Program», Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 1996.
6. WINDOW ver. 5.2, «WINDOW: Users Manual», Environmental Energy Technologies Department, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, 2001.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΓΡΑΣΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΡΟΣΙΣΜΟΥ ΣΤΗ ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΛΕΜΕΣΟΥ

Δ. Μπίκας, Κ. Τσικαλουδάκη, Χ. Γιαρμά

Εργαστήριο Οικοδομικής & Φυσικής των Κτιρίων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
541 24 Θεσσαλονίκη, e-mail: bikasd@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο μιας ολοκληρωμένης αξιολόγησης της συμπεριφοράς του κτιρίου της Δημοτικής Βιβλιοθήκης Λεμεσού σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον αλλά και σε σχέση με βλάβες που έχουν εμφανιστεί, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της υγρασιακής και θερμικής συμπεριφοράς του, με στόχο τα αποτελέσματα να αποτελέσουν βήμα τόσο για την εκτίμηση της υφιστάμενης κατάστασης όσο και για την επιλογή των κατάλληλων επεμβάσεων.

Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων διερευνήθηκε η δυνατότητα βελτίωσης του εσωκλίματος με τη βοήθεια ήπιων επεμβάσεων, οι οποίες προτείνονται με σεβασμό προς τη μορφολογία, την ιστορία και τη φυσιογνωμία του κτιρίου και με γνώμονα τη διαμόρφωση συνθηκών θερμικής άνεσης στους χρήστες του κτιρίου μέσω της εφαρμογής των αρχών του βιοκλιματικού σχεδιασμού. Οι προτεινόμενες επεμβάσεις αφορούν αφενός στη βελτίωση της θερμομονωτικής ικανότητας των «ασθενέστερων» δομικών στοιχείων και αφετέρου στη διατήρηση ικανοποιητικών θερμοκρασιών κατά τη θερινή περίοδο με την ενίσχυση του φυσικού αερισμού.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα Εργαστήρια Οικοδομικής & Φυσικής των Κτιρίων και Μεταλλικών Κατασκευών της Πολυτεχνικής Σχολής του Α.Π.Θ., ολοκλήρωσαν μαζί με τον Δήμο Λεμεσού το έργο **“Αειφόρος ανάπτυξη διατηρητέων ιστορικών κτιρίων μέσα από την αποκατάσταση τους με τη χρήση καινοτόμων τεχνολογιών”**, που χρηματοδοτήθηκε από το Ίδρυμα Προώθησης Έρευνας της Κυπριακής Δημοκρατίας στο πλαίσιο της **ειδικής δράσης Αειφορία**. [1] Η παρούσα εργασία συνοψίζει και παρουσιάζει τη μεθοδολογία και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το τμήμα της έρευνας αρμοδιότητας Εργαστηρίου Οικοδομικής & Φυσικής των Κτιρίων και επικεντρώνεται στη διερεύνηση της υγρασιακής και θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου της Δημοτικής Βιβλιοθήκης Λεμεσού.

Με δεδομένη την ηλικία του κτιρίου και την απουσία μετρήσεων, θεωρήθηκε απαραίτητη η εφαρμογή προσομοιώσεων ώστε να γίνει δυνατή η απόκτηση έστω και μιας προσεγγιστικής εικόνας της κατάστασης των κτιριακών στοιχείων και να αξιολογηθεί η θερμική και υγρασιακή συμπεριφορά τους. Ειδικότερα, για την προσομοίωση της υγρασιακής συμπεριφοράς επιλέχθηκε και εφαρμόστηκε το αναγνωρισμένο «εργαλείο» WUFI pro 4.01.

Για τη μελέτη διερεύνησης της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου, συγκεντρώθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα και υπολογίστηκε με τη βοήθεια του προσομοιωτικού προγράμματος

SUNCODE η διακύμανση της θερμοκρασίας στους εσωτερικούς χώρους του κτιρίου σε ετήσια βάση. Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων διερευνήθηκε η δυνατότητα βελτίωσης του εσωκλίματος με τη βοήθεια ήπιων επεμβάσεων, οι οποίες προτείνονται με σεβασμό προς τη μορφολογία, την ιστορία και τη φυσιογνωμία του κτιρίου και με γνώμονα τη διαμόρφωση συνθηκών θερμικής άνεσης στους χρήστες του κτιρίου μέσω της εφαρμογής των αρχών του βιοκλιματικού σχεδιασμού. Οι προτεινόμενες επεμβάσεις αφορούν αφενός στη βελτίωση της θερμομονωτικής ικανότητας των «ασθενέστερων» δομικών στοιχείων και αφετέρου στη διατήρηση ικανοποιητικών θερμοκρασιών κατά τη θερινή περίοδο με την ενίσχυση του φυσικού αερισμού.

2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Για την αξιολόγηση της θερμικής και υγρασιακής συμπεριφοράς των κτιριακών στοιχείων της Δημοτικής Βιβλιοθήκης της Λεμεσού η χρήση προσομοιωτικού εργαλείου ήταν απαραίτητη, μια και η κατασκευή μετρά πάνω από επτά δεκαετίες λειτουργίας. Τόσο η απουσία μετρήσεων κατά τα πρώτα χρόνια της λειτουργίας της κατασκευής όσο και η αδυναμία να γίνουν στην ερευνητική φάση αρκετές μετρήσεις ώστε να αξιολογηθεί η συμπεριφορά της κατασκευής (οι οποίες θα ήταν ούτως ή άλλως αντιπροσωπευτικές μόνο της παρούσας και όχι της προ 70 ετών κατάστασης) οδήγησε στη χρήση προσομοιωτικού προγράμματος για την απόκτηση έστω και μιας προσεγγιστικής εικόνας της κατάστασης. Το εργαλείο WUFI pro 4.01 που επιλέχθηκε για την προσομοίωση σχεδιάστηκε για να υπολογίζει την ταυτόχρονη μονοδιάστατη μεταφορά θερμότητας και υγρασίας σε πολυστρωματικά κτιριακά στοιχεία. Το WUFI pro 4.01 επιτρέπει την εύκολη αλλαγή των διαφόρων παραμέτρων και παρέχει παραστατική απεικόνιση των αποτελεσμάτων, ενώ διαθέτει ενσωματωμένη μια πολύ μεγάλη βάση υλικών, τα οποία μπορούν να προσεγγίσουν ικανοποιητικά τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε διάφορες περιπτώσεις και για τα οποία δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις.

2.1. ΕΙΣΑΓΟΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΑ ΥΛΙΚΑ

Η προσομοίωση των κτιριακών στοιχείων και η μελέτη της υγρασιακής συμπεριφοράς τους υπό τις εκάστοτε κλιματικές συνθήκες με το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε, απαιτεί τον προσδιορισμό ενός μεγάλου αριθμού ιδιοτήτων των υλικών που συνθέτουν τα στοιχεία αυτά. Για το λόγο αυτό, και δεδομένου ότι οι διαθέσιμες πληροφορίες για τα υλικά που συνθέτουν τα υπό μελέτη κατακόρυφα και οριζόντια κτιριακά στοιχεία είναι όχι μόνο περιορισμένες σε αριθμό, αλλά και, κατά βάση, ποιοτικές, χρειάστηκε να γίνουν ορισμένες προσεγγίσεις και παραδοχές προκειμένου να λειτουργήσει το πρόγραμμα και να προκύψουν οι τελικές αξιολογήσεις. Επισημαίνεται ότι, αν και, κατά την εκτίμηση των μελετητών, οι προσεγγίσεις που έγιναν ήταν οι καλύτερες δυνατές δεδομένης της έλλειψης πολλών στοιχείων, τα αποτελέσματα πρέπει να αντιμετωπιστούν μάλλον ως ποιοτικές εκτιμήσεις, οι οποίες όμως δίνουν σαφή εικόνα σε σχέση με τα ζητούμενα της αξιολόγησης.

2.2. ΕΙΣΑΓΟΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Η λειτουργία του προγράμματος προϋποθέτει την εισαγωγή τόσο των κλιματικών συνθηκών της περιοχής (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, βροχή, ακτινοβολία), όσο και της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας αέρα του εσωτερικού χώρου σε ωριαία βάση. Με δεδομένο ότι τέτοια στοιχεία δεν είναι διαθέσιμα για όλα τα χρόνια που καλύπτει η αξιολόγηση, προτιμήθηκε η λύση εφαρμογής ενός τυπικού κλιματικού έτους που επαναλαμβάνεται. Αναφορικά με το εξωτερικό κλίμα, το έτος που χρησιμοποιείται προέκυψε με τη χρήση του METEONORM, ενός αξιόπιστου προγράμματος που μπορεί να δώσει

προσεγγιστικές ωριαίες τιμές για οποιαδήποτε περιοχή του πλανήτη με την εισαγωγή κάποιων χαρακτηριστικών της στοιχείων (γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος, κ.α.). Το έτος που προέκυψε με τον τρόπο αυτό χρησιμοποιείται σε όλες τις αξιολογήσεις και θα αναφέρεται στα επόμενα ως τυπικό.

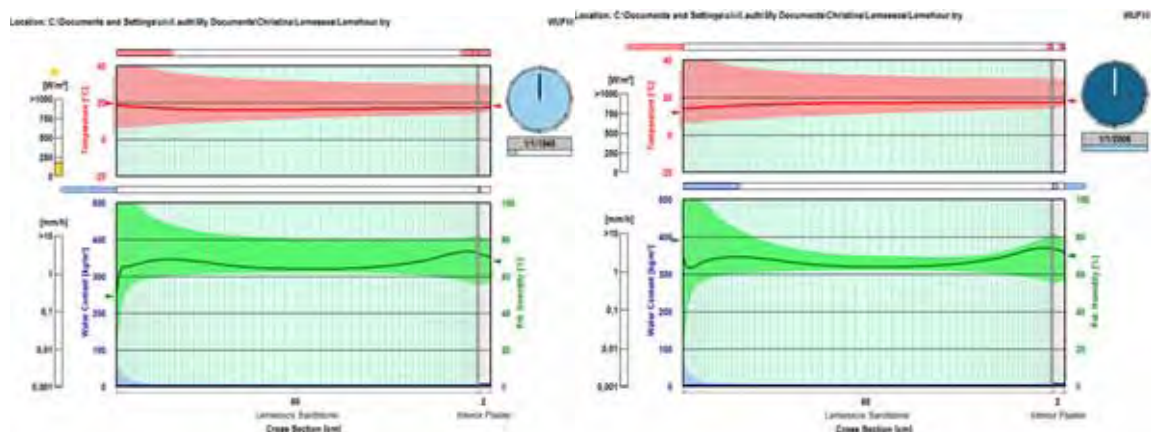
Οι εσωτερικές συνθήκες δόθηκαν ως μέσες μηνιαίες τιμές στο πρόγραμμα (δηλ. σταθερές για όλες τις ώρες κάθε μήνα). Οι εσωτερικοί χώροι χωρίστηκαν σε θερμαινόμενους και μη θερμαινόμενους. Στους πρώτους, η θερμοκρασία θεωρήθηκε ίση με την δοθείσα εξωτερική εκτός από τους μήνες κατά τους οποίους αυτή είναι μικρότερη των 18 βαθμών Κελσίου. Στις περιπτώσεις αυτές δόθηκε ίση με 18 βαθμούς Κελσίου (ελάχιστη θερμοκρασία άνεσης για τους εργαζόμενους). Στους μη θερμαινόμενους χώρους η θερμοκρασία θεωρήθηκε ίση με την δοθείσα εξωτερική. Επειδή ο τρόπος που εισήχθησαν στο πρόγραμμα οι εσωτερικές συνθήκες επέτρεπε την εισαγωγή μιας μόνο μηνιαίας τιμής και για τη σχετική υγρασία αέρα, δημιουργήθηκαν για την κάθε περίπτωση δύο υποπεριπτώσεις, προκειμένου να καλυφθεί η δυσμενέστερη κατάσταση. Στη μία υποπερίπτωση λαμβάνεται ως μέση μηνιαία θερμοκρασία ο μέσος όρος των τιμών που δίνονται (δηλ. της πρωινής και της μεσημβρινής), και στην άλλη η μεγαλύτερη από τις δύο.

2.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του εργαλείου είναι τριών κατηγοριών:

1. καμπύλες που περιγράφουν την χρονική μεταβολή ορισμένων ποσοτήτων, σε προσδιορισμένες θέσεις ή ως μέσες τιμές σε προσδιορισμένες στρώσεις. Ως τέτοιες καμπύλες δίνονται:
 - οι πυκνότητες ροής θερμότητας μέσω της εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας του στοιχείου
 - οι θερμοκρασίες και η σχετική υγρασία σε θέσεις που επιλέγονται από το χρήστη
 - η μέση περιεχόμενη υγρασία κάθε στρώσης και η συνολική περιεχόμενη υγρασία του συνολικού κτιριακού στοιχείου.
2. Προφίλ που δίνουν την κατανομή μιας ποσότητας στη διατομή του στοιχείου σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. **Σχήμα 2-1.** Ως προφίλ δίνονται οι παρακάτω ποσότητες:
 - θερμοκρασία
 - σχετική υγρασία
 - περιεχόμενη υγρασία
3. Ένα φιλμ που περιέχει τα προφίλ όλων των χρονικών βημάτων.

Η προσομοίωση κάλυψε όλα τα κατακόρυφα εξωτερικά στοιχεία του κτιρίου και ορισμένα οριζόντια με στόχο τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των κτιριακών στοιχείων της βιβλιοθήκης κατά τη μέχρι τώρα λειτουργία τους και ο εντοπισμός ενδεχόμενων ακραίων καταστάσεων –από πλευράς υγρασίας– που θα καθιστούσαν την κατασκευή εξαιρετικά επιρρεπή σε πρόωρες φθορές. Η αξιολόγηση της συμβολής της υγρασίας σε φθορές άλλου τύπου, θεωρήθηκε εξαρχής εκτός των στόχων αυτής της μελέτης.



Σχήμα 2-1. Προφίλ κατανομής θερμοκρασίας, σχετικής και περιεχόμενης υγρασίας στη διατομή δομικού στοιχείου, στην έναρξη και τη λήξη της περιόδου προσομοίωσης

2.4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα από τη μελέτη των διαγραμμάτων διαφοροποιούνται για τα οριζόντια και τα κατακόρυφα στοιχεία και για τα τελευταία ανά όψη και προσανατολισμό. Οι παρατηρήσεις επικεντρώνονται:

- Στη διακύμανση της θερμοκρασίας και της υγρασίας στη διατομή και σε συγκρίσεις αναφορικά με τη διακύμανση κατά την πρώτη δεκαετία της λειτουργίας της κατασκευής και κατά την πενταετία 2001-2006.
- Στη διαβροχή της εξωτερικής επιφάνειας του στοιχείου και στα επίπεδα σχετικής υγρασίας της αντίστοιχης εσωτερικής επιφάνειας.
- Στην επισήμανση των δυσμενέστερων συνθηκών για τις διεπιφάνειες μεταξύ των υλικών.
- Σε επισημάνσεις και συστάσεις για ελέγχους με στόχο την πρόληψη βλαβών.

3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ -ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΡΟΣΙΣΜΟΥ

Με στόχο τη διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου και τη διατύπωση προτάσεων για τη βελτίωσή της, η μελέτη διαρθρώνεται σε 3 επιμέρους ενότητες : α. Τη μεθοδολογία – τη γενική περιγραφή του κτιρίου-το προσομοιωτικό πρόγραμμα – τις παραδοχές για την εκτίμηση της θερμικής συμπεριφοράς του, β. αποτελέσματα της θερμικής προσομοίωσης και γ. τις δυνατές επεμβάσεις για τη βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου. Οι προτεινόμενες επεμβάσεις αφορούν αφενός στη βελτίωση της θερμομονωτικής ικανότητας των «ασθενέστερων» δομικών στοιχείων και αφετέρου στη διατήρηση ικανοποιητικών θερμοκρασιών κατά τη θερινή περίοδο με την ενίσχυση του φυσικού αερισμού. Με βάση την προσομοίωση πραγματοποιήθηκε εκτίμηση των θερμοκρασιακών συνθηκών που επικρατούν στους εσωτερικούς του χώρους και ανάλυση των παραμέτρων που καθορίζουν το θερμικό ισοζύγιο τους τόσο σε επίπεδο μέσων μηνιαίων, όσο και σε επίπεδο ωριαίων τιμών. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης οδήγησαν σε εκτίμηση της παρεχόμενης θερμικής άνεσης, και στην περίπτωση που αυτή δεν επιτυγχάνεται, σε υποδείξεις των πιο πρόσφορων λύσεων για τη βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς του κτίσματος.

3.1. ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

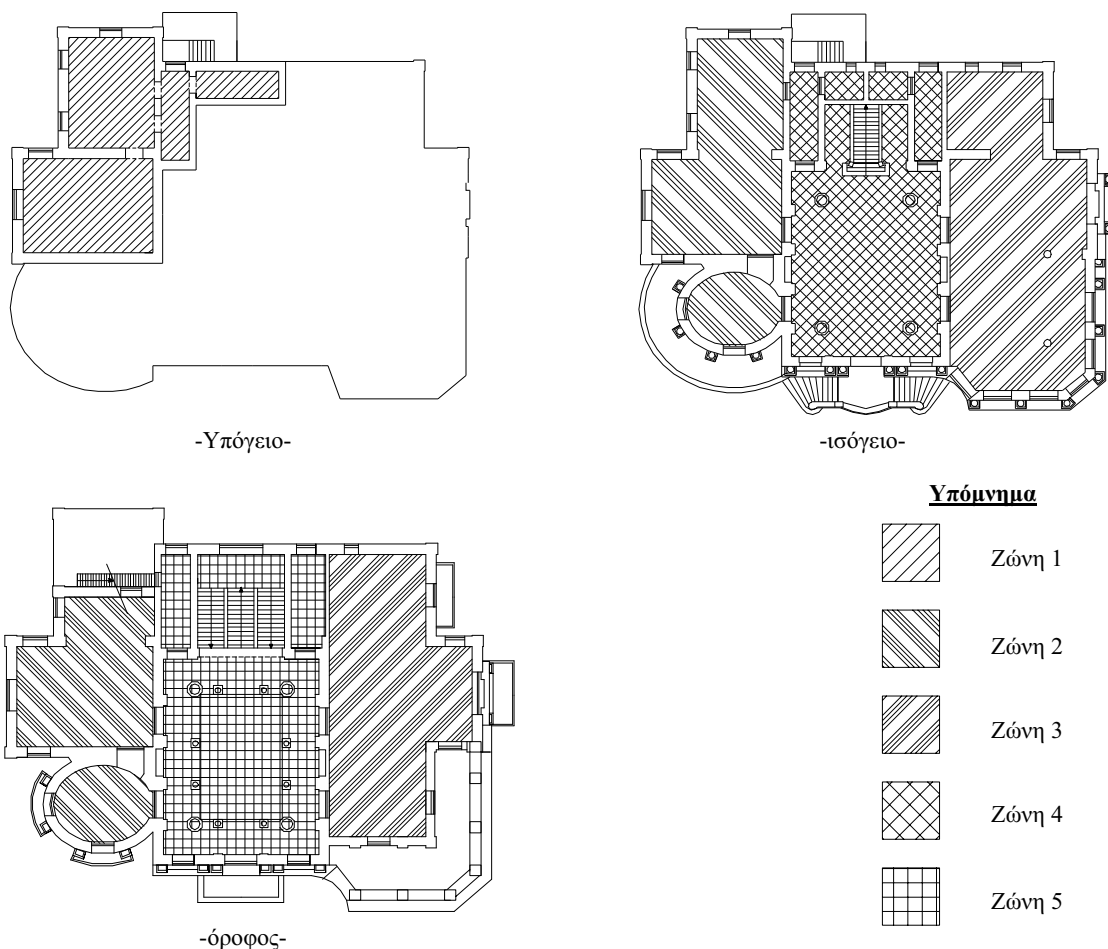
Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα αφορούν στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θερμικού μοντέλου, στα στοιχεία λειτουργίας του κτιρίου, καθώς και στα διαθέσιμα κλιματικά δεδομένα της περιοχής. Η υφιστάμενη κατάσταση και χρήση του κτιρίου λήφθηκε υπόψη ως «τυπική». Στόχος της μελέτης της τυπικής λειτουργίας του κτιρίου δεν αποτέλεσε μόνο η εκτίμηση του εσωκλίματος, αλλά κυρίως η κατανόηση της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου, ώστε τα εξαγόμενα αποτελέσματα να αποτελέσουν τη βάση για την παραμετρική ανάλυση βελτιστοποίησης των επικρατουσών εσωκλιματικών συνθηκών. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θερμικού μοντέλου αφορούν:

- Στις θερμικές ζώνες του κτιρίου **Σχήμα 3-1**.
- Στον προσανατολισμό των επιφανειών
- Στα αδιαφανή στοιχεία και στις διαχωριστικές μεταξύ των ζωνών επιφάνειες
- Στα διαφανή στοιχεία του κτιρίου
- Στις ηλιοπροστατευτικές διατάξεις

Τα στοιχεία λειτουργίας του κτιρίου αφορούν στα εσωτερικά θερμικά κέρδη και στον αερισμό του κτιρίου.

Τα κλιματικά δεδομένα που εισάγονται στο πρόγραμμα οφείλουν να είναι σε ωριαία βάση. Επειδή για την περιοχή δεν είναι διαθέσιμες τέτοιες τιμές, έγινε χρήση του προγράμματος METEONORM, το οποίο επιτρέπει τη δημιουργία κλιματικών αρχείων με τη βοήθεια μαθηματικών μοντέλων και συσχετίσεων με καταγεγραμμένες τιμές από τους πλησιέστερους μετεωρολογικούς σταθμούς. Άλλωστε το METEONORM χρησιμοποιείται ευρέως σε περιπτώσεις απουσίας καταγεγραμμένων τιμών, καθόσον θεωρείται ότι προσεγγίζει ικανοποιητικά τις κλιματικές παραμέτρους. Σημειώνεται ότι οι διαφορές στη μέση μηνιαία τιμή της θερμοκρασίας και της υγρασίας μεταξύ των τιμών που εξήχθησαν από το METEONORM και των διαθέσιμων καταγεγραμμένων τιμών είναι εμφανής. Όσον αφορά στη θερμοκρασία, οι τιμές που εκτιμήθηκαν με το METEONORM είναι χαμηλότερες κατά 2.0°C τους μήνες Απρίλιο ως Αύγουστο. Για τους υπόλοιπους μήνες το πρόγραμμα φαίνεται να υπερτιμά το μέγεθος κατά περίπου 1.0-2.0°C. Με βάση τις μέσες μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας, υπολογίστηκε ότι η απόκλιση ανέρχεται στο 2,08%. Η μέση διαφοροποίηση είναι ακόμη μεγαλύτερη (4,54%) στην περίπτωση της σχετικής υγρασίας. Με το υπολογιστικό εργαλείο προκύπτουν τιμές σχετικής υγρασίας χαμηλότερες απ' ό,τι οι καταγεγραμμένες και μάλιστα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Παρόλο που δεν υπάρχει ταύτιση μεταξύ των διαθέσιμων και των εκτιμώμενων τιμών, η έλλειψη δεδομένων σε ωριαία βάση για τη θερμοκρασία και την υγρασία καθώς και η απουσία στοιχείων για την ακτινοβολία και την ταχύτητα ανέμου καθιστούν μοναδική λύση τη χρήση των υπολογισθαισών τιμών, ακόμη κι αν αυτές δεν ανταποκρίνονται πλήρως στην πραγματικότητα.

Στα εισαγόμενα κλιματικά δεδομένα εντάσσεται και η θερμοκρασία εδάφους. Η θερμοκρασία εδάφους στην Κύπρο κυμαίνεται σε σχετικά υψηλά επίπεδα με μέση ετήσια τιμή τους 19.0°C. Σε ετήσια βάση, η θερμοκρασία του εδάφους είναι κατά περίπου 1.5°C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία αέρα, ωστόσο η συγκριτική διαφοροποίησή τους ανά μήνα πλησιάζει τους 7.0 °C. Κατά τους χειμερινούς μήνες (Νοέμβριο-Μάρτιο) η θερμοκρασία εδάφους είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία αέρα, ενώ κατά την εαρινή και θερινή περίοδο η θερμοκρασία του αέρα υπερβαίνει τη θερμοκρασία εδάφους. Η θερμοκρασία εδάφους αποκτά την υψηλότερη τιμή της το Σεπτέμβριο και τη χαμηλότερη το Φεβρουάριο.



Σχήμα 3-1. Καθορισμός των θερμικών ζωνών του κτιρίου.

3.2. ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Η παρουσίαση και η ανάλυση των αποτελεσμάτων της θερμικής προσομοίωσης του κτιρίου πραγματοποιήθηκε για κάθε ζώνη χωριστά σε μηνιαία βάση με αναφορά στη διακύμανση της θερμοκρασίας στον εσωτερικό χώρο και στην τεκμηρίωση των παραγόντων που επηρέασαν τη διαμόρφωση των θερμοκρασιακών συνθηκών. Για το λόγο αυτό αναφέρονται τα ηλιακά κέρδη, καθώς και οι ροές θερμότητας μεταξύ της ζώνης, του εξωτερικού περιβάλλοντος και των γειτονικών ζωνών. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης γίνεται με:

- Τη διαγραμματική απεικόνιση της διακύμανσης της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας στο εσωτερικό της ζώνης και στο εξωτερικό περιβάλλον.
- Την παρουσίαση με τη μορφή πίνακα του ποσού της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στη ζώνη και του τελικού ηλιακού κέρδους ανά μήνα, μετά από τις απώλειες από την ανάκλασή της στις εσωτερικές επιφάνειες της ζώνης.
- Τη διαγραμματική απεικόνιση με τη μορφή ραβδογράμματος των ροών θερμότητας μεταξύ του κελύφους της ζώνης, του εξωτερικού περιβάλλοντος και των γειτονικών ζωνών σε μηνιαία βάση.
- Τη διαγραμματική απεικόνιση της διακύμανσης της μέσης ωριαίας θερμοκρασίας στο εσωτερικό της ζώνης και στο εξωτερικό περιβάλλον.

3.3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

Από τη διαγραμματική απεικόνιση των θερμοκρασιακών συνθηκών, των θερμικών προσόδων και απωλειών κατά τη διάρκεια του έτους προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα αναφορικά με τη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου κατά την «τυπική» λειτουργία του :

- Η μέση μηνιαία θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου ακολουθεί τη διακύμανση της εξωτερικής θερμοκρασίας. Οι μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας αέρα στις ζώνες παρατηρούνται τον Αύγουστο, όπως συμβαίνει και με την εμφάνιση των υψηλότερων τιμών της μέσης θερμοκρασίας περιβάλλοντος, παρόλο που τα ποσά της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας μεγιστοποιούνται τον Ιούλιο .
- Οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες σε κάθε ζώνη υπερβαίνουν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους τη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα.
- Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας.
- Από την ανάλυση του θερμικού ισοζυγίου προκύπτει ότι το θερμικό περιβάλλον στο εσωτερικό των ζωνών κατά την «τυπική» λειτουργία του κτιρίου διαμορφώνεται από την απορρόφηση σημαντικών ποσών θερμότητας από το εξωτερικό περιβάλλον μέσω των διαφανών και αδιαφανών στοιχείων του κελύφους. Η μεγάλη επιφάνεια των ανοιγμάτων, καθώς και οι υψηλοί συντελεστές θερμοπερατότητας τόσο των κουφωμάτων, όσο και των δομικών στοιχείων του περιβλήματος, έχουν ως αποτέλεσμα υψηλά ηλιακά θερμικά κέρδη.
- Τα υψηλότερο άμεσο ηλιακό κέρδος έχει η ζώνη 3, στην οποία όμως βρίσκονται και διπλάσιες επιφάνειες ανοίγματα σε σχέση με τη ζώνη 2.
- Επίσης, η διαμόρφωση του εσωκλίματος στο κτίριο καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την υψηλή θερμοχωρητικότητά του, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη χρονική υστέρηση εμφάνισης της επίδρασης των εξωτερικών συνθηκών. Η βαριά κατασκευή των εξωτερικών τοιχοποιιών επιτρέπει την αποθήκευση μεγάλου ποσού θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας, μέρος του οποίου αποδίδεται στο περιβάλλον όταν η θερμοκρασία γίνει χαμηλότερη. Ωστόσο, επειδή κατά την «τυπική» λειτουργία του κτιρίου δεν ήταν εφικτή η προσομοίωση της συμπεριφοράς των χρηστών στο θέμα του αερισμού και επομένως έγινε η παραδοχή ότι ο αερισμός επιτυγχάνεται μόνο μέσω των αρμών των ανοιγμάτων, η απομάκρυνση της θερμότητας από τα δομικά στοιχεία επιτυγχάνεται σε μικρό μόνο βαθμό, με αποτέλεσμα να συσσωρεύεται και να διατηρείται σε υψηλά επίπεδα ακόμα και τους πρώτους φθινοπωρινούς μήνες.
- Σημαντική είναι επίσης και η συμβολή του εδάφους στη συγκράτηση των εσωτερικών θερμοκρασιών, καθώς σημαντικά ποσά θερμότητας διοχετεύονται προς το έδαφος, το οποίο κατά τη θερινή περίοδο έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από τον εξωτερικό αέρα.

3.4. ΣΕΝΑΡΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

Από την ανάλυση του εσωκλίματος προέκυψε ότι στους εσωτερικούς χώρους επικρατούν ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες. Οι πιθανές επεμβάσεις για τη βελτίωση του εσωκλίματος θα είχαν ως γνώμονα τη συγκράτηση της εσωτερικής θερμοκρασίας σε χαμηλότερα επίπεδα για τη μεγαλύτερη διάρκεια του χρόνου, την ενίσχυση δηλαδή του φυσικού δροσισμού.

Σε γενικές γραμμές, η διατήρηση ικανοποιητικών θερμοκρασιών κατά τη θερινή περίοδο διασφαλίζεται κυρίως από: τη θερμομονωτική προστασία του κτιρίου, τον έλεγχο του ανεπιθύμητου ηλιασμού και τη χρήση παθητικών συστημάτων φυσικού δροσισμού, όπως η ενίσχυση του αερισμού, ο εξατμιστικός δροσισμός, η διαμόρφωση ηλιακής καμινάδας, κτλ.

Λαμβάνοντας υπ' όψη τη μορφολογία, τον τρόπο κατασκευής και το ύψος του κτιρίου της Δημοτικής, μελετήθηκε η διαμόρφωση του εσωκλίματος με βάση την εφαρμογή των παρα-

κάτω επεμβάσεων-σεναρίων:

σενάριο 1: Αντικατάσταση των εξωτερικών υαλοπινάκων με νέους, οι οποίοι έχουν χαμηλό συντελεστή θερμοπερατότητας U ($1.60\text{W/m}^2\text{C}$) και χαμηλό συντελεστή σκιασμού

σενάριο 2: Θερμική προστασία του δώματος του κτιρίου με τη διαμόρφωσή του ως αντεστραμμένο δώμα και την εφαρμογή ανακλαστικής επιφάνειας ως τελική επίστρωση

σενάριο 3: Ενίσχυση του φυσικού αερισμού. Συγκεκριμένα, γίνεται η παραδοχή ότι κατά τη διάρκεια της νύχτας επιτελείται αερισμός με 15 εναλλαγές αέρα ανά ώρα, ρυθμός που μπορεί να επιτευχθεί στην περίπτωση διαμεπρούς αερισμού. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη και η ενεργός συμμετοχή των χρηστών στη διαμόρφωση του εσωτερικού περιβάλλοντος, δηλώνοντας στο πρόγραμμα ότι κατά τη διάρκεια λειτουργίας του κτιρίου υπάρχει η δυνατότητα ενίσχυσης του αερισμού και απομάκρυνσης της πλεονάζουσας θερμότητας με το άνοιγμα των παραθύρων, υπό την προϋπόθεση ότι ο αέρας στο εξωτερικό περιβάλλον έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από τον εσωτερικό χώρο.

σενάριο 4: Συνδυαστική εφαρμογή των παραπάνω εναλλακτικών λύσεων

3.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- **Η ενίσχυση του αερισμού είναι πρωταρχικής σημασίας για τη συγκράτηση των εσωτερικών θερμοκρασιών αέρα σε φυσιολογικά επίπεδα. Ειδικά ο νυχτερινός αερισμός δημιουργεί τις ιδανικές συνθήκες για την απομάκρυνση της θερμότητας που αποθηκεύτηκε κατά τη διάρκεια της ημέρας στα δομικά στοιχεία του κτιρίου. Μάλιστα, ο συνδυασμός του αερισμού με την υψηλή θερμοχωρητικότητα των δομικών στοιχείων του κτιρίου αποτελούν τη βέλτιστη λύση.**
- Η ενίσχυση της θερμικής προστασίας ορισμένων δομικών στοιχείων (κουφώματα, δώμα) δεν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στο εσώκλιμα, παρά **μόνο αν η πλεονάζουσα θερμότητα απομακρυνθεί με τον αερισμό.** Διαφορετικά, είναι πιθανό η θερμότητα να «παγιδευτεί» στον εσωτερικό χώρο λόγω της θερμομόνωσης με αποτελέσματα αντίθετα από τα επιθυμητά.
- Ωστόσο, **η χρήση υαλοπινάκων με χαμηλό συντελεστή σκιασμού προτείνεται, γιατί περιορίζει το άμεσο ηλιακό κέρδος από τα ανοίγματα.** Μάλιστα, στην περίπτωση κτιρίων με ιδιαίτερη μορφολογία, όπως η Δημοτική Βιβλιοθήκη, η χρήση ειδικών άχρωμων υαλοπινάκων με χαμηλό συντελεστή σκιασμού ενδείκνυται για ηλιοπροστασία, καθώς δεν διαταράσσουν καθόλου την όψη και επιπλέον μειώνουν την πιθανότητα δημιουργίας θάμβωσης.

ΠΗΓΕΣ

1. Παραδοτέα του Ερευνητικού Έργου, του προγράμματος «Θεματικών Δράσεων» της «Δέσμης 2003-2005», του Ιδρύματος Προώθησης Έρευνας της Κυπριακής Δημοκρατίας, *ΑΕΙΦΟ/0603/01: ΑΕΙΦΟΡΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΤΗΡΗΤΕΩΝ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ*

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΘΑΛΑΜΟ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΘΕΡΙΝΗ ΚΑΙ ΤΗ ΧΕΙΜΕΡΙΝΗ ΠΕΡΙΟΔΟ

Μ. Γρ. Βραχόπουλος, Μ.Κ. Κούκου, Δ.Γ. Σταυλάς,

Β.Ν. Σταματόπουλος και Α.Φ. Γονίδης

Εργαστήριο Περιβαλλοντικών Ερευνών, Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ιδρυμα
Χαλκίδας, 34400 Ψαχνά Εύβοια e-mail: mvrachop@teiha.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η θερμική συμπεριφορά ενός κτιρίου καθορίζεται από τις θερμικές ιδιότητες των δομικών στοιχείων του, τα οποία με τη σειρά τους χαρακτηρίζονται από την ικανότητα τους να απορροφούν ή να εκπέμπουν ηλιακή θερμότητα. Η τοποθέτηση μονωτικού υλικού στο κτίριο μπορεί να επιδράσει στη συμπεριφορά του σε μεταβατική ροή θερμότητας. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως για μόνωση κτιρίων επιλέγονται για τη χαμηλή θερμική τους αγωγιμότητα και την ικανότητα τους να καθυστερούν τη ροή θερμότητας που άγεται μέσω της δομής τους. Η ανακλαστική μόνωση αποτελείται από μια ή περισσότερες επιφάνειες χαμηλής εκπομπής, όπως μεταλλικά φύλλα αλουμινίου, ή αποθέσεις επάνω ή και μή στα υποστρώματα. Έτσι, το 95-97% της ακτινοβολούμενης θερμότητας που προσπίπτει στην επιφάνεια ανακλάται και μόνο 3-5% της θερμότητας εκπέμπεται μέσω της μόνωσης.

Η παρούσα εργασία στοχεύει στην αξιολόγηση της απόδοσης της ανακλαστικής μόνωσης με σκοπό την αξιοποίησή της στον Ελλαδικό χώρο. Στα πλαίσια αυτά σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε πρότυπος θάλαμος στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Περιβαλλοντικών Ερευνών του ΤΕΙ Χαλκίδας στα Ψαχνά Ευβοίας. Το πειραματικό πλάνο εστιάζει στην αξιολόγηση της απόδοσης της ανακλαστικής μόνωσης τόσο για τη θερινή όσο και για τη χειμερινή περίοδο. Η λήψη των δεδομένων χωρίστηκε σε δύο επιμέρους τμήματα ένα για τις θερμοκρασίες και ένα για τις καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν εκτός του θαλάμου κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ύπαρξη της ανακλαστικής μόνωσης κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου αποτρέπει την υπερθέρμανση στο εσωτερικό του πειραματικού θαλάμου ενώ κατά τη διάρκεια του χειμώνα η θερμότητα διατηρείται εντός του θαλάμου.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αντικείμενο της δυναμικής θερμικής συμπεριφοράς των κτιρίων αποτελεί το πλέον ενδιαφέρον αντικείμενο όσον αφορά στην ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων και ιδιαίτερα στην εξοικονόμηση ενέργειας. Στην Ευρώπη, ο κτιριακός τομέας ευθύνεται πλέον για το 42% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας, η οποία προκαλεί περίπου το 50% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και το 35% όλων των εκπομπών αερίων στην ατμόσφαιρα, εκπομπές που εντείνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου και προκαλούν την κλιματική αλλαγή [1]. Παράλληλα, τόσο η ίδια η κατανάλωση, όσο και η συνεπαγόμενη κλιματική αλλαγή, έχουν προκαλέσει μια νέα πετρελαϊκή κρίση με τεράστιες οικονομικές επιπτώσεις. Η Οδηγία 2002/91/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (Energy Performance of Buildings Directive - EPBD) [2] η εφαρμογή της οποίας άρχισε τον Ιανουάριο του 2006, επιβάλλει τη λήψη μέτρων για ενεργειακά αποδοτικά και φιλικά προς το περιβάλλον κτίρια σε όλη την ΕΕ. Με βάση τα δεδομένα αυτά η συμπεριφορά της μόνωσης των τοιχοποιιών είναι ιδιαίτερα σημαντική τόσο όσον αφορά στη διάρκεια ζωής

της, που συνεπάγεται και τη συνεχή δράση της όσο και όσον αφορά στην εν γένει δυναμική συμπεριφορά της.

Το φορτίο αιχμής στα κτίρια μπορεί να μειωθεί με απλές τεχνικές και μεθόδους, Μία από αυτές είναι ο κατάλληλος σχεδιασμός του κτιριακού κελύφους και η σωστή επιλογή των υλικών. Η κατάλληλη χρήση θερμομόνωσης στα κτίρια συνεισφέρει στη μείωση του ετήσιου κόστους ενέργειας για κάλυψη αναγκών κλιματισμού. Η θερμομόνωση που μπορεί να είναι ένα υλικό ή συνδυασμός υλικών όταν εφαρμοσθεί σωστά επιβραδύνει τη ροή θερμότητας εξαιτίας της υψηλής θερμικής αντίστασης. Για την αξιολόγηση διαφορετικών μονωτικών υλικών είναι απαραίτητο να κατανοηθεί ο τρόπος με τον οποίο θερμότητα μεταφέρεται μέσω της σύνθετης πολυστρωματικής τοιχοποιίας [3,4].

Η ανάκλαση αποτελεί μια ιδιότυπη για πολλούς μέθοδο μόνωσης, επειδή η συμπεριφορά των υλικών με ανακλαστικές ιδιότητες μεταβάλλεται σε σχέση με τη θερμοκρασιακή διαφορά. Τα ανακλαστικά μονωτικά υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί για περιπτώσεις μεγάλων θερμοκρασιακών διαφορών, ψυγεία κλπ. και ήδη έχει αρχίσει η εφαρμογή τους σε κτήρια. Τα προϊόντα ανακλαστικής μόνωσης αποσκοπούν στο να ανακλούν τη θερμότητα που μεταδίδεται με την ακτινοβολία. Αποτελούνται συνήθως από μία ή δύο εξωτερικές επιφάνειες αλουμινίου υψηλής καθαρότητας που είναι γερά συγκολλημένες σε πυρήνα από μία ή περισσότερες στρώσεις φύλλων πολυαιθυλενίου φυσαλίδων αέρα. Οι εξωτερικές στρώσεις αλουμινίου υψηλής καθαρότητας ($\geq 99,9\%$) αντανακλούν το 97% της θερμότητας που μεταφέρεται με ακτινοβολία. Στην Ελλάδα, όπου η ημερήσια θερμοκρασιακή διακύμανση είναι σημαντική, η απόδοση των συστημάτων αυτών αναμένεται να είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική και πολύ σημαντικότερη από τα άλλα κοινά μονωτικά υλικά. Η απόδοση των συστημάτων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες στους οποίους περιλαμβάνονται η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας την ανακλαστική επιφάνεια, η θερμοκρασιακή διαφορά στους χώρους εκατέρωθεν του ανακλαστικού υλικού, η διεύθυνση της ροής θερμότητας, κ.ά.

Σε αυτή την εργασία μελετάται και αξιολογείται η συμπεριφορά της ανακλαστικής μόνωσης τόσο κατά τη χειμερινή όσο και κατά τη θερινή περίοδο. Στα πλαίσια αυτά σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε πειραματικός θάλαμος στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Περιβαλλοντικών Ερευνών του ΤΕΙ Χαλκίδας στα Ψαχνά Ευβοίας στους τοίχους του οποίου έχει ενσωματωθεί ανακλαστική μόνωση. Η έρευνα θα διεξαχθεί σε διάφορα στάδια. Σε αυτό το στάδιο η εξωτερική επιφάνεια του μετρητικού θαλάμου δεν έχει καλυφθεί με σοβά. Έχουν ληφθεί μετρήσεις θερμοκρασίας με στόχο την κατανόηση της συμπεριφοράς της ανακλαστικής μόνωσης για αυτή τη διεύθυνση. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ανακλαστική μόνωση τη θερινή περίοδο αντανακλά την ηλιακή ακτινοβολία (οπότε δεν την αφήνει να μεταφερθεί μέσα στο θάλαμο) και το χειμώνα συγκρατεί τη θερμότητα εντός του θαλάμου.

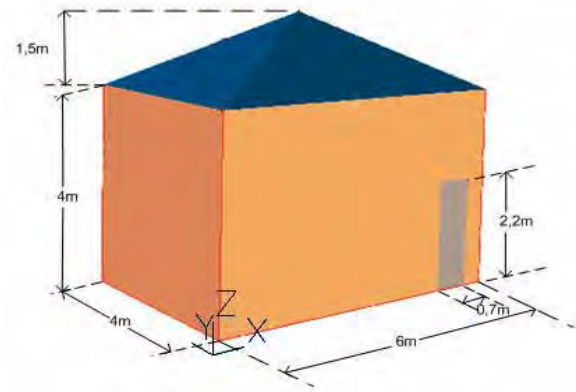
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

2.1. Ο Μετρητικός Θάλαμος

Με στόχο τη μελέτη αξιοποίησης της ανακλαστικής μόνωσης για τη βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς κελύφους κτιρίου και τη διεξαγωγή συστηματικών πειραματικών μετρήσεων σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ο πειραματικός θάλαμος του Σχήματος 1 στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Περιβαλλοντικών Ερευνών του ΤΕΙ Χαλκίδας στα Ψαχνά Ευβοίας.



(α)



(β)

Σχήμα 1: α) Εξωτερική άποψη και β) γεωμετρία του μετρητικού θαλάμου.

Ο κάθε τοίχος (Σχήμα 2) είναι κατασκευασμένος από οπτόπλινθους διάτρητους με συγκολλητική ουσία σοβά, τύπου διπλού δρομικού και ορθοδρομικού με ενσωματωμένη ανακλαστική μόνωση.



(α)

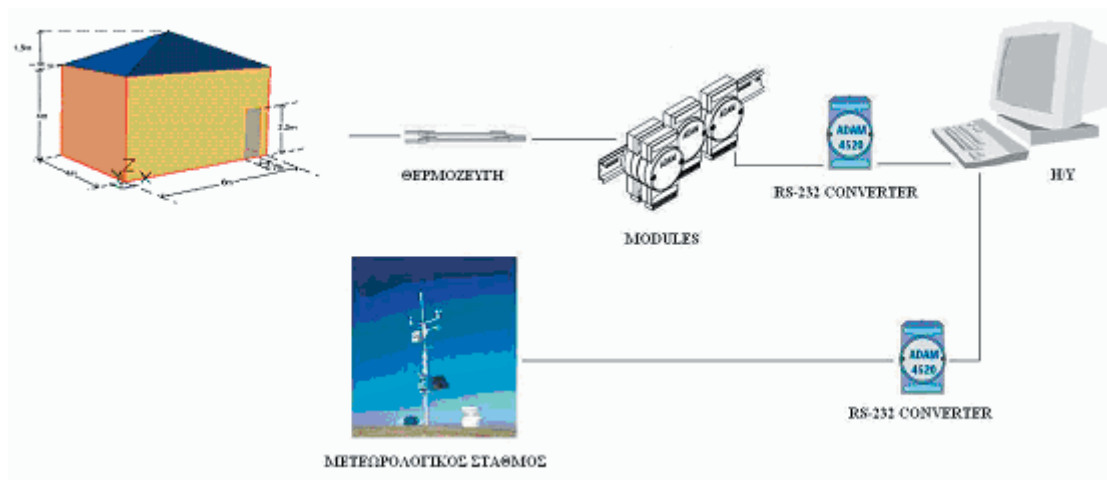


(β)

Σχήμα 2: α) Ανακλαστική μόνωση και β) Τρισδιάστατη απεικόνιση εξωτερικού τοιχώματος.

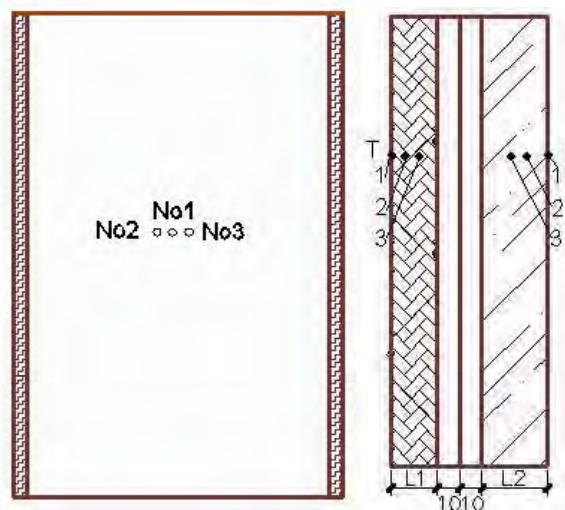
2.2. Λήψη και καταγραφή δεδομένων

Η λήψη των δεδομένων χωρίστηκε σε δύο επιμέρους τμήματα (Σχήμα 3), ένα για τις θερμοκρασίες και ένα για τις καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν εκτός του θαλάμου κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων. Μετρήσεις ελήφθησαν από το Φεβρουάριο του 2007 και μέχρι το Νοέμβριο του ίδιου έτους.



Σχήμα 3: Λήψη & καταγραφή δεδομένων.

Για τη μέτρηση των θερμοκρασιών 24 συνολικά θερμοζεύγη (6 ανα προσανατολισμό) συνδέθηκαν σε τέσσερα modules, τα οποία με τη σειρά τους μετέφεραν τα σήματα σε έναν μετατροπέα, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τον Η/Υ. Τα θερμοζεύγη τύπου K, τοποθετήθηκαν στο μέσο κάθε προσανατολισμού, τόσο στο εξωτερικό όσο και στο εσωτερικό τοίχωμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.

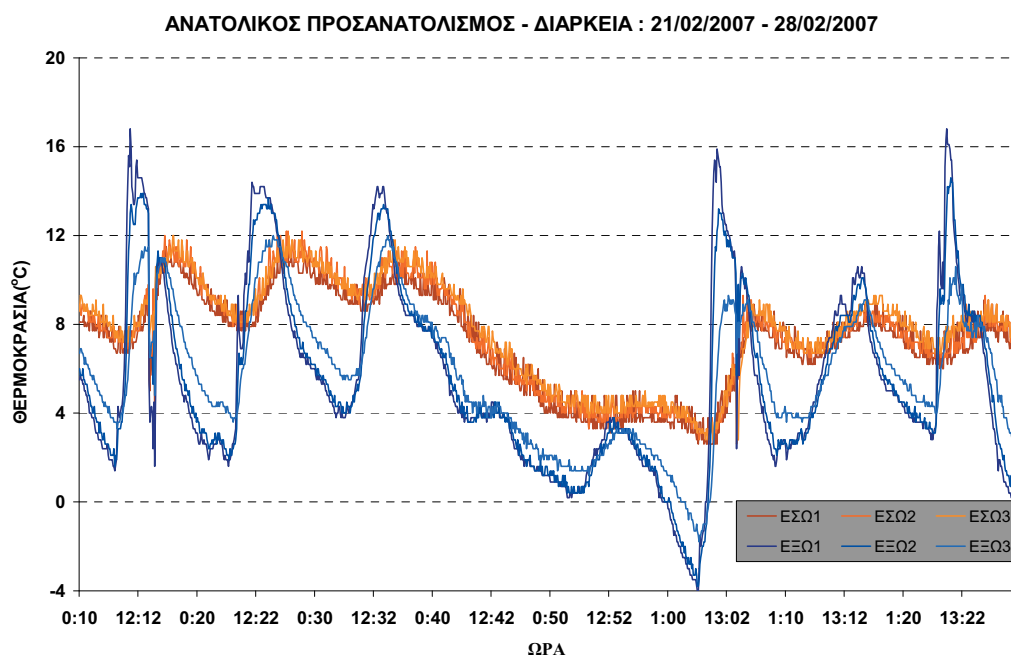


Σχήμα 4: Τοποθέτηση αισθητηρίων θερμοκρασίας.

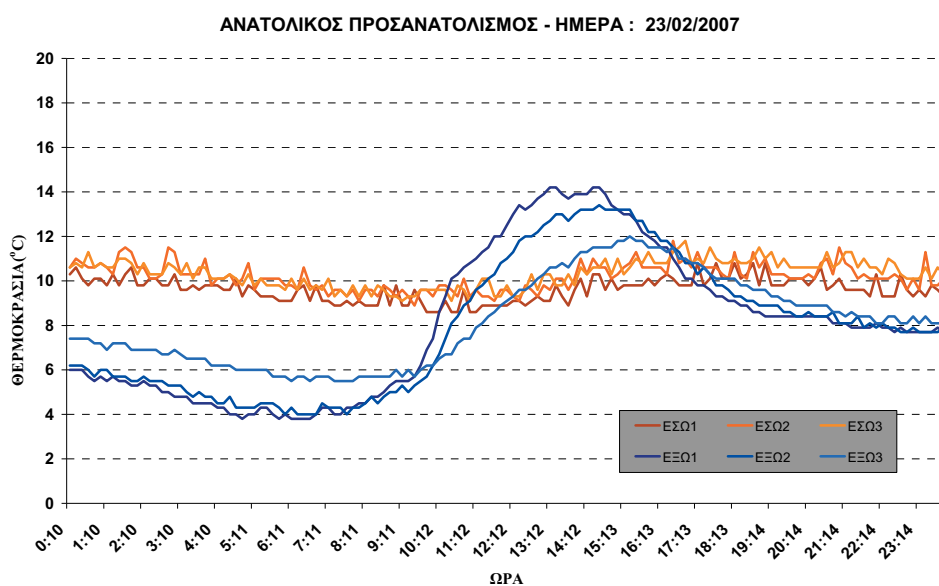
Ο μετεωρολογικός σταθμός ο οποίος είναι τοποθετημένος σε κοντινή απόσταση από το θάλαμο κατέγραφε τις καιρικές συνθήκες που επικράτησαν κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων. Ο σταθμός παρείχε τις ενδείξεις της εξωτερικής θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας, της ποσότητας της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας, της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου και τέλος της συνολικής διάρκειας ηλιοφάνειας ανά ημέρα. Όλοι οι αισθητήρες του μετεωρολογικού σταθμού ήταν συνδεδεμένοι με Η/Υ και με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού ήταν δυνατό να αναγνωσθούν οι ενδείξεις. Όλες οι μετρήσεις προγραμματίστηκαν να έχουν συχνότητα μέτρησης ανά 5-10 λεπτά.

3. ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα τελικά ενδεικτικά αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν για τη χειμερινή περίοδο και για τη θερινή περίοδο. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται οι θερμοκρασιακές καμπύλες των εσωτερικών & εξωτερικών τοιχωμάτων του μετρητικού θαλάμου για τον ανατολικό προσανατολισμό του θαλάμου τη χειμερινή περίοδο. Παρατηρούμε ότι το θερμοκρασιακό εύρος των εσωτερικών τοιχωμάτων είναι πολύ μικρότερο από εκείνο των εξωτερικών. Οι γραμμές αποχρώσεως μπλέ, απεικονίζουν τις θερμοκρασιακές καμπύλες του εξωτερικού τοιχώματος ενώ εκείνες αποχρώσεως καφέ απεικονίζουν τις θερμοκρασιακές καμπύλες του εσωτερικού τοιχώματος.



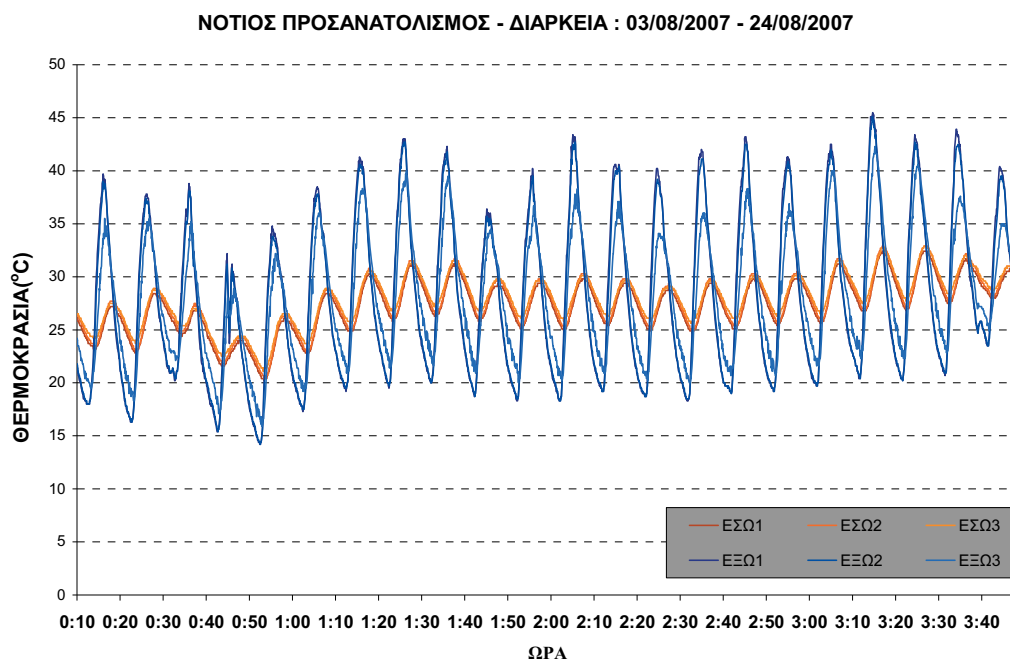
Σχήμα 5: Θερμοκρασίες εξωτερικού (ΕΞΩ) & εσωτερικού (ΕΣΩ) τοιχώματος ανατολικού προσανατολισμού-Χειμερινή περίοδος.



Σχήμα 6: Θερμοκρασίες εξωτερικού (ΕΞΩ) & εσωτερικού (ΕΣΩ) τοιχώματος ανατολικού προσανατολισμού στις 23/02/2007.

Στο Σχήμα 6, όπου απεικονίζονται οι θερμοκρασίες εξωτερικού & εσωτερικού τοιχώματος του ανατολικού προσανατολισμού σε όλη τη διάρκεια της ημέρας παρατηρούμε ότι ενώ το εύρος θερμοκρασιών του εξωτερικού τοιχώματος κυμαίνεται από 4 έως 14 °C εκείνο του εσωτερικού παραμένει σχεδόν σταθερό από 9 έως 12 °C. Αυτό οφείλεται στη χρήση της ανακλαστικής μόνωσης η οποία κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου επιτρέπει την ανάκλαση της θερμότητας στο εσωτερικό του δωματίου και για αυτό η θερμότητα δεν απομακρύνεται από το εσωτερικό χώρο διατηρώντας σε θερμοκρασία αρκετά υψηλότερη του εξωτερικού περιβάλλοντος μειώνοντας έτσι τα φορτία για θέρμανση του χώρου. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και στους υπόλοιπους προσανατολισμούς.

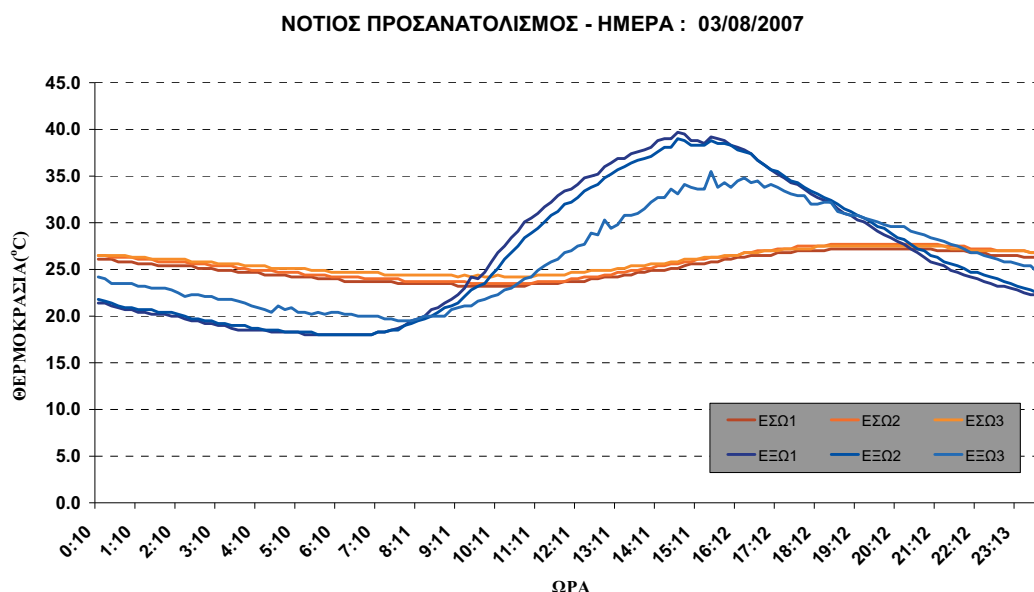
Για τη θερινή περίοδο όπως φαίνεται από το Σχήμα 7 παρά τις υψηλές θερμοκρασίες του εξωτερικού τοιχώματος του μετρητικού θαλάμου κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, η μεταβολή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της τοιχοποιίας και στο εσωτερικό του δωματίου είναι ήπια. Το εύρος θερμοκρασιών του εξωτερικού τοιχώματος του μετρητικού θαλάμου εκτείνεται από τους 15°C νωρίς το πρωί μέχρι τους 40-45°C στις 15:00-16:00 το απόγευμα όπως άλλωστε αναμενόταν. Εντούτοις, η θερμοκρασία στην επιφάνεια του εσωτερικού τοιχώματος του μετρητικού θαλάμου είναι περίπου 25-30°C καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας μειώνοντας τα φορτία για κλιματισμό του χώρου. Αυτό οφείλεται κυρίως στη χρήση της ανακλαστικής μόνωσης η οποία εμποδίζει την υπερθέρμανση στο εσωτερικό του μετρητικού θαλάμου. Κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου όπου η εξωτερική θερμοκρασία είναι υψηλή, τα δομικά στοιχεία του μετρητικού θαλάμου απορροφούν θερμότητα αυξάνοντας τη θερμοκρασία τους και διατηρώντας της θερμοκρασία στο εσωτερικό του μετρητικού θαλάμου σε χαμηλά επίπεδα.



Σχήμα 7: Θερμοκρασίες εξωτερικού (ΕΞΩ) & εσωτερικού (ΕΣΩ) τοιχώματος νότιου προσανατολισμού-Θερινή περίοδος.

Στο Σχήμα 8 όπου απεικονίζονται οι θερμοκρασίες εξωτερικού & εσωτερικού τοιχώματος του νότιου προσανατολισμού καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας παρατηρούμε ότι ενώ το εύρος θερμοκρασιών του εξωτερικού τοιχώματος ήταν 17 έως 38 °C εκείνο του εσωτερικού ήταν 23 έως 27 °C. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και στους υπόλοιπους προσανατολισμούς. Αξίζει να

σημειωθεί ότι η χαμηλότερη θερμοκρασιακή ένδειξη που κατέγραψε ο μετεωρολογικός σταθμός ήταν 22°C ενώ η υψηλότερη ήταν 38°C.



Σχήμα 8: Θερμοκρασίες εξωτερικού (ΕΞΩ) & εσωτερικού (ΕΣΩ) τοιχώματος νότιου προσανατολισμού στις 03/08/2007 .

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως προκύπτει από τη μελέτη των αποτελεσμάτων των μετρήσεων κατά τη χειμερινή περίοδο παρατηρούμε ότι σε όλη τη διάρκεια της ημέρας το θερμοκρασιακό εύρος των εσωτερικών τοιχωμάτων είναι πολύ μικρότερο από εκείνο των εξωτερικών. Αυτό οφείλεται στη χρήση της ανακλαστικής μόνωσης η οποία κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου επιτρέπει την ανάκλαση της θερμότητας στο εσωτερικό του δωματίου και για αυτό η θερμότητα δεν απομακρύνεται από το εσωτερικό χώρο διατηρώντας σε θερμοκρασία αρκετά υψηλότερη του εξωτερικού περιβάλλοντος μειώνοντας έτσι τα φορτία για θέρμανση του χώρου. Τη θερινή περίοδο παρά τις υψηλές θερμοκρασίες του εξωτερικού τοιχώματος του μετρητικού θαλάμου, η μεταβολή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της τοιχοποιίας και στο εσωτερικό του δωματίου είναι ήπια. Αυτό οφείλεται κυρίως στη χρήση της ανακλαστικής μόνωσης η οποία εμποδίζει την υπερθέρμανση στο εσωτερικό του μετρητικού θαλάμου. Κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου όπου η εξωτερική θερμοκρασία είναι υψηλή, τα δομικά στοιχεία του μετρητικού θαλάμου απορροφούν θερμότητα αυξάνοντας τη θερμοκρασία τους και διατηρώντας της θερμοκρασία στο εσωτερικό του μετρητικού θαλάμου σε χαμηλά επίπεδα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα ερευνητική εργασία χρηματοδοτήθηκε από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (European Social Fund) και Εθνικές πηγές (ΕΠΕΑΕΚ II - Αρχιμήδης II).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings, 4/1/2003, Official Journal L1 65.
2. Regulating Authority for Energy (RAE), The Energy System in Greece [in Greek] (<http://www.rae.gr/energysys/main.htm>).
3. Incropera, F.P. & DeWitt, D.P., Fundamentals of Heat Transfer, 4th Ed., John Wiley & Sons, New York, 1996.
4. Bird, R.B., Stewart, W.E. & Lightfoot, E.N., Transport Phenomena, John Wiley & Sons, New York, 1960.
5. ASTM C1224-03 Standard Specification for Reflective Insulation for Building Applications, ASTM International, 2005.
6. American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). Handbook of Fundamentals, Atlanta, GA, USA, 2001 [Chapter 23].
7. ASTM C177-04 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus, ASTM International.
8. ISO 7726, Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1998.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΨΕΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΕΣ ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

*Δ. Μπίκας, Κ. Τσικαλουνδάκη, Ο. Σπύρογλου, Χρ. Γιαρμά,
Μ. Παπαλεξάνδρου, Κ. Κοντολέων,*

Εργαστήριο Οικοδομικής & Φυσικής των Κτιρίων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,
541 24 Θεσσαλονίκη, e-mail:bikasd@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αναφέρεται σε επιλεγμένα τμήματα ενός εκτεταμένου ερευνητικού προγράμματος, τα οποία αποτέλεσαν ιδιαίτερο ερευνητικό αντικείμενο του Εργαστηρίου Οικοδομικής & Φυσικής των Κτιρίων του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ. Παρουσιάζονται τα βασικά ζητήματα που διερευνήθηκαν από πλευράς οικοδομικής και φυσικής των κτιρίων για τη μεθοδική ανάπτυξη του συστήματος όψεων αλουμινίου με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία για ολοκληρωμένες κτιριακές εφαρμογές, με έμφαση σε εργαλεία που αναπτύχθηκαν για την υποστήριξη των εφαρμογών του τελικού προϊόντος στα κτίρια. Το ολοκληρωμένο τελικό προϊόν που έχει προκύψει από το ερευνητικό έργο, θεωρείται ότι μπορεί να αποτελέσει σημαντικό βήμα στην ανάπτυξη εγχώριας εφαρμοσμένης βιομηχανικής τεχνολογίας με συνοδευτικά οικονομικά και εμπορικά οφέλη.

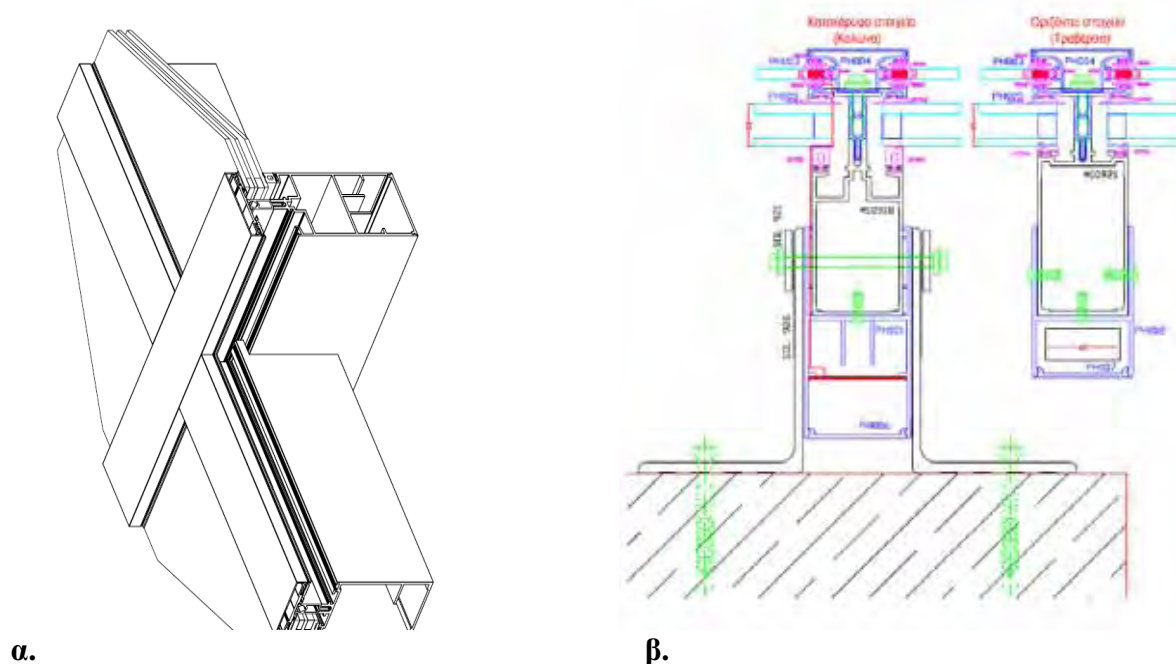
Συγκεκριμένα στην εργασία παρουσιάζονται ερευνητικά αποτελέσματα και οι προτάσεις που προέκυψαν αναφορικά με:

- την καταγραφή της υπάρχουσας κατάστασης στο διεθνή χώρο και τη δημιουργία Βάσης Δεδομένων για προϊόντα και ολοκληρωμένες κτιριακές εφαρμογές, καθώς και την οργάνωση Βάσης δεδομένων για κλιματικά στοιχεία, ηλιοφάνεια, ηλιακή ακτινοβολία .
- την εφαρμογή προσομοιωτικού εργαλείου που αναπτύχθηκε, για τα κλιματικά δεδομένα (θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία, άνεμοι) 25 περιοχών της Ελλάδας και αντίστοιχες χαρακτηριστικές αποδόσεις Φ/Β στοιχείων ανάλογα με τη θέση και την κλίση τους για τις συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές.
- την ανάλυση υπολογιστικών μοντέλλων για εφαρμογές Φ/Β σε μονοκέλυφες και διπλοκέλυφες όψεις
- την ανάπτυξη και εφαρμογή υπολογιστικών εργαλείων για εφαρμογές Φ/Β σε ελεύθερα κτίρια και σε κτίρια εντός του αστικού ιστού καθώς και αριθμητική προσέγγιση της επιρροής της μορφολογίας της περιοχής στη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, με ανάπτυξη υπολογιστικού εργαλείου και εφαρμογή του σε τμήμα του αστικού ιστού της Θεσσαλονίκης.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αξιοποιούν την ενέργεια που μεταφέρει η ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης για την άμεση παραγωγή “καθαρής” ηλεκτρικής ενέργειας. Στον κτιριοδομικό τομέα, η παραγωγή ηλεκτρισμού με αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας βρίσκεται ένα ιδιαίτερα υποσχόμενο πεδίο εφαρμογής των προϊόντων της βιομηχανικής παραγωγής φωτοβολταϊκών με την ενσωμάτωσή τους ως δομικά στοιχεία στο ίδιο το κτιριακό κέλυφος.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται σε τμήματα ενός ευρύτερου ερευνητικού έργου με τίτλο « PhotoV-AluE - Έρευνα, Ανάπτυξη και Πιστοποίηση Πλήρους Συστήματος Δομικών Στοιχείων Αλουμινίου Μεγάλων Διαστάσεων με Ενσωματωμένα Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Σύγχρονης Τεχνολογίας και Καινοτομικούς Διασυνδεδεμένους Μετατροπείς Ισχύος, με Στόχο την Ενσωμάτωσή τους στις Κτιριακές Κατασκευές» που αποτέλεσαν ιδιαίτερο αντικείμενο ερευνητικής ομάδας του Εργαστηρίου Οικοδομικής & Φυσικής των Κτιρίων, του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ. [1]. Σημειώνεται ότι το έργο, με λοιπούς συμβαλλόμενους φορείς το Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ., το ΚΑΠΕ και τις επιχειρήσεις ALUMIL, ΗΛΙΟΔΟΜΗ, και ΗΛΠΡΑ, κατέληξε με την ολοκλήρωση, ως κοινού παραδοτέου όλων των φορέων, του πλήρους και έτοιμου προς παραγωγή και εφαρμογή συστήματος. (Σχήμα 1-1)



Σχήμα 1-1. α. Αξονομετρική τομή της σύνδεσης κατακόρυφου με οριζόντιο στοιχείο και β. οριζόντιες τομές των αντίστοιχων διατομών του συστήματος, με τοποθετημένους τους υαλοπίνακες, τα φ/β στοιχεία και τους μετατροπείς.

Το ειδικότερο αντικείμενο της ερευνητικής ομάδας του Εργαστηρίου Οικοδομικής & Φυσικής των Κτιρίων αποτέλεσε η «ενότητα εργασίας Αρ. 3» του έργου, που επικεντρώθηκε στον μεθοδικό σχεδιασμό του συστήματος και την υποστήριξη των εφαρμογών του τελικού προϊόντος. Επισημαίνεται ότι, ακολουθώντας τους γενικούς στόχους του έργου για την ανάπτυξη ενός ώριμου για παραγωγή καινοτομικού τελικού προϊόντος, αντιπροσωπευτικού των εφαρμοσμένων τεχνολογιών αιχμής του κτιριακού τομέα, με δυνατότητες ουσιαστικής και άμεσης συμβολής στην εξοικονόμηση ενέργειας και την προστασία του περιβάλλοντος, δόθηκε έμφαση στην ανάπτυξη εύχρηστων υπολογιστικών «εργαλείων», χρήσιμων για τους μελετητές στις αρχικές φάσεις σχεδιασμού των εφαρμογών. Στις παραγράφους που ακολουθούν συνοψίζονται και παρουσιάζονται τα σημαντικότερα ερευνητικά αποτελέσματα και οι προτάσεις που προέκυψαν στο πλαίσιο της ενότητας εργασίας που προαναφέρθηκε.

2. ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΒΑΣΕΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η πληθώρα αλλά και η πολυπλοκότητα των κατασκευαστικών λύσεων και των προϊόντων που εντοπίστηκαν κατά τις προπαρασκευαστικές φάσεις της ερευνητικής πρότασης, έκανε εμφανή την ανάγκη για τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων ώστε το πληροφοριακό υλικό που συγκεντρώνεται να μπορεί να οργανωθεί από την αρχή σε σωστή βάση αλλά και να είναι άμεσα προσβάσιμο από όλα τα μέλη της ερευνητικής ομάδας, τόσο κατά τη διάρκεια του ερευνητικού έργου ενημερωνόμενο συνεχώς, όσο και μετά το πέρας του. Για το σκοπό αυτό προτιμήθηκε η ανάπτυξη μιας απλής στη χρήση αλλά απόλυτα επεκτάσιμης σχεσιακής εφαρμογής βασισμένης στην Microsoft Access 2003. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στο σωστό σχεδιασμό της ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι διπλοεγγραφές και τα λάθη των χειριστών αλλά και να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία της. Ο σχεδιασμός της βάσης έγινε με στόχο την λειτουργικότητα της αλλά και τη δυνατότητα περιοδικής συμπλήρωσης και μελλοντικής αναβάθμισης της σε ένα μεγαλύτερο σύστημα (data warehouse). Το πληροφοριακό υλικό το οποίο αποθηκεύτηκε κατατάσσεται σε 3 μεγάλες κατηγορίες : Προϊόντα, Κατασκευαστικές λύσεις, Βιβλιογραφία-Αναφορές. Στην πρώτη κατηγορία τοποθετούνται τα προϊόντα (συγκεκριμένων παραγωγών) τα οποία εντοπίζονται από την έρευνα τόσο σε βάσεις δεδομένων όσο και σε έντυπα και πληροφοριακό υλικό από τους παραγωγούς. Στην δεύτερη κατηγορία των κατασκευαστικών λύσεων εντάσσονται ολοκληρωμένα κτιριακά έργα στα οποία εφαρμόζονται συγκεκριμένες λύσεις βασισμένες σε έτοιμα προϊόντα ή συνδυσμό αυτών. Τέλος στην κατηγορία της Βιβλιογραφίας καταχωρούνται όλες οι πληροφορίες που αφορούν σε επιστημονικές ανακοινώσεις, συνέδρια, βιβλία, μελέτες περιπτώσεων ακόμα και συμπεράσματα από παρατηρήσεις πεδίου. Παράλληλα συγκεντρώθηκαν και οργανώθηκαν δεδομένα για κλιματικά στοιχεία, ηλιοφάνεια, ηλικία ακτινοβολία κτλ. για 25 περιοχές του ελληνικού χώρου και μεγάλο μέρος των ευρωπαϊκών χωρών.

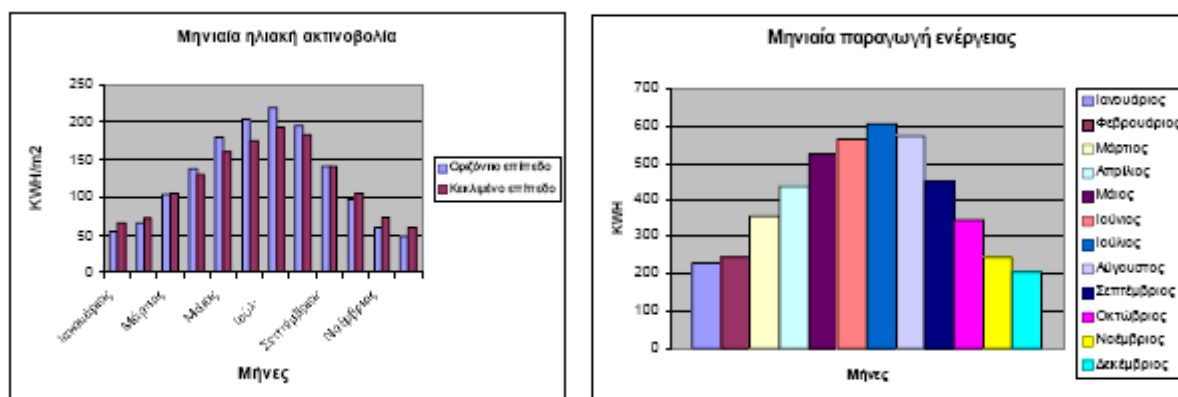
3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Στο πνεύμα των όσων προαναφέρθηκαν στην παράγραφο 1, πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου και εύχρηστου εργαλείου για τον υπολογισμό της ενέργειας που παράγουν διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα με πεδίο εφαρμογής τους κτίρια διαφόρων περιοχών στον ελληνικό χώρο. Το μοντέλο υπολογισμού έχει αναπτυχθεί σε πρόγραμμα Microsoft Excel, με βάση τα πρότυπα του προγράμματος Retscreen, το οποίο αποτελεί ολοκληρωμένο εργαλείο για τον υπολογισμό παραγωγής ενέργειας, κόστους κύκλου ζωής και μείωσης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σε αυτό έχουν ενσωματωθεί αστρονομικά και μετεωρολογικά δεδομένα για τον υπολογισμό της ενέργειας που παράγουν διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα σε 25 περιοχές της Ελλάδας. Τα δεδομένα είναι τα γεωγραφικά πλάτη των περιοχών, οι μέσες ωριαίες θερμοκρασίες περιβάλλοντος κατά την διάρκεια της ημέρας, και οι ώρες ηλιοφάνειας ανά μήνα της κάθε περιοχής.

Για την επιλογή της μεθόδου υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα συγκρίθηκαν τέσσερις μέθοδοι υπολογισμού, ενώ ως μέτρο σύγκρισης των αποτελεσμάτων τους, χρησιμοποιήθηκαν μετρημένες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας. Ειδικότερα, συγκρίθηκε η ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο για τις 25 περιοχές της Ελλάδας όπου εφαρμόζεται το πρόγραμμα, με αντίστοιχες μετρημένες τιμές. Τα δεδομένα εισόδου για όλα τα μοντέλα υπολογισμού είναι το γεωγραφικό πλάτος, η κλίση και η γωνία αζιμουθίου. Από την σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών προέκυψε ότι η μέθοδος που παρουσιάζει την μικρότερη απόκλιση τιμών σε σχέση με τις

μετρημένες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και προσεγγίζει καλύτερα τις καμπύλες των μετρημένων τιμών, είναι η μέθοδος Retscreen, και έτσι αυτή επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο υπολογισμού. Ο υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά χωρίζεται σε τρία στάδια.:

- Στο πρώτο στάδιο το μοντέλο υπολογίζει την μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο,. Στην συνέχεια υπολογίζει την άμεση, την διάχυτη και την ανακλώμενη ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο προκειμένου να υπολογίσει την ολική μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο, σύμφωνα με το μοντέλο Retscreen. Η προσπίπτουσα μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία προκύπτει, ανάλογα με την γεωγραφική θέση, την κλίση και τον προσανατολισμό του συστήματος.
- Στο δεύτερο στάδιο το μοντέλο υπολογίζει την μέση απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας ως συνάρτηση του τύπου του φωτοβολταϊκού και των συνθηκών περιβάλλοντος.. Η μέση απόδοση μειώνεται λόγω των απωλειών συστοιχίας και ισχύος καθώς και απωλειών στον αναστροφέα (inverter).
- Τέλος, στο τρίτο στάδιο υπολογίζεται η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (Σχήμα 3-2)



Σχήμα 3-2: Διαγράμματα μηνιαίας ηλιακής ακτινοβολίας (αριστερά) και μηνιαίας παραγωγής ενέργειας (δεξιά) για την περιοχή της Κέρκυρας με $\beta=45^\circ$ και $\gamma=60^\circ$

Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί χαρακτηριστικές τιμές απόδοσης για πέντε τύπους φωτοβολταϊκών (μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό και άμορφο πυρίτιο, CdTe και CIS) ενώ στην περίπτωση που ο χρήστης θελήσει να υπολογίσει την παραγόμενη ενέργεια ενός συγκεκριμένου τύπου φωτοβολταϊκού πλαισίου, μπορεί να αλλάξει τον βαθμό απόδοσης, ενώ υπολογίζεται ακόμη η αποφυγή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα από την χρήση φωτοβολταϊκών. Με στόχο τον έλεγχο ακρίβειας των αποτελεσμάτων του υπολογιστικού εργαλείου, πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις μεταξύ των τιμών υπολογισμού της παραγόμενης ενέργειας από το πρόγραμμα και των πραγματικών τιμών παραγόμενης ενέργειας από εγκαταστημένες φωτοβολταϊκές διατάξεις. Ειδικότερα, συγκρίθηκαν οι υπολογισμένες ωριαίες τιμές παραγόμενης ενέργειας (που προκύπτουν για την χαρακτηριστική ημέρα του μήνα) με τις αντίστοιχες μέσες ωριαίες τιμές ενέργειας που παράχθηκαν από τις φωτοβολταϊκές διατάξεις για τον εκάστοτε μήνα και ακόμη, οι μηνιαίες τιμές παραγόμενης ενέργειας από το πρόγραμμα με τις αντίστοιχες των διατάξεων. Οι συγκρίσεις απέδειξαν πολύ μικρές αποκλίσεις μεταξύ υπολογισμένων και πραγματικών τιμών, πιστοποιώντας ουσιαστικά την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του εργαλείου.

4. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΠΛΟΚΕΛΥΦΩΝ ΟΨΕΩΝ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΑ

4.1. ΤΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Οι διπλοκέλυφες όψεις αποτελούνται από δύο ανεξάρτητα κελύφη, τα οποία διαχωρίζονται λειτουργικά και κατασκευαστικά με αεριζόμενο διάκενο, με πλάτος που κυμαίνεται από λίγα εκατοστά μέχρι μερικά μέτρα. Σε ένα γενικό επίπεδο, η εφαρμογή τους έχει στόχο την επίτευξη βέλτιστων συνολικών περιβαλλοντικών συνθηκών, αναφορικά με τον έλεγχο της θερμότητας, του ήχου και του φωτός. Η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών στοιχείων στο εξωτερικό κέλυφος των όψεων αυτού του τύπου, δημιουργεί κατασκευαστικές λύσεις που παρουσιάζουν ιδιαίτερο μορφολογικό και ενεργειακό ενδιαφέρον, ενώ απαιτούν ταυτόχρονα την εξασφάλιση συνθηκών εσωκλιματικής άνεσης και βελτιστοποίησης της θερμικής απόδοσης δομικού στοιχείου και κτιρίου.

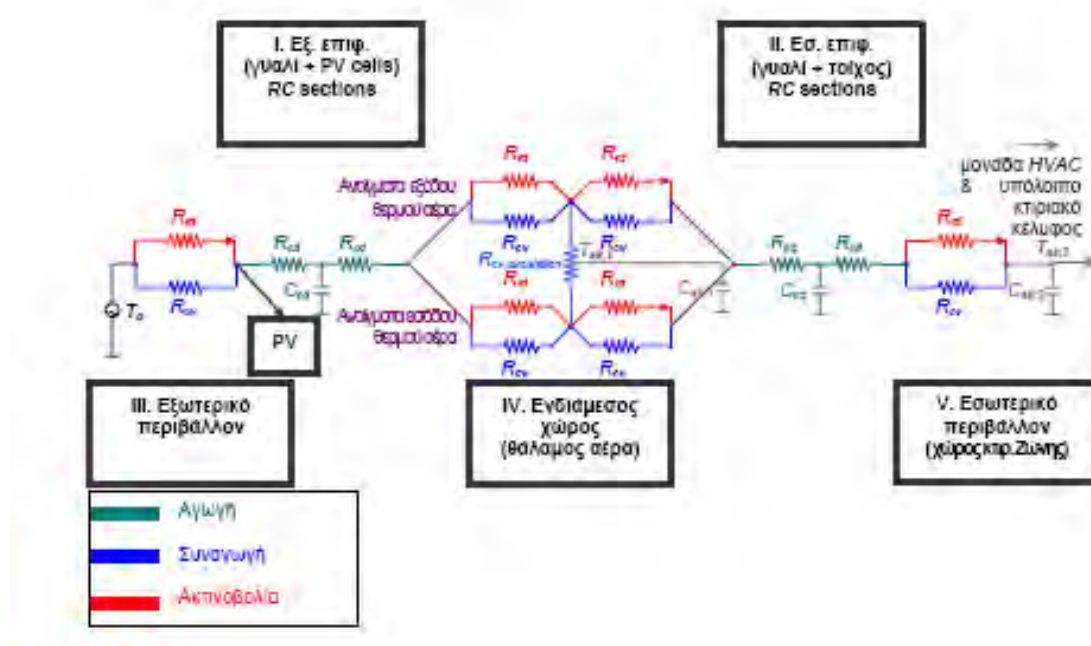
Ο σχεδιασμός του σύνθετου δομικού στοιχείου της διπλοκέλυφης όψης με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία εμπεριέχει τη συμμετοχή πολλών παραμέτρων που εμπλέκονται και μεταβάλλουν δυναμικά την απόκρισή τους. Στο πλαίσιο του αντικειμένου της ερευνητικής ομάδας του Εργαστηρίου Οικοδομικής & Φυσικής των κτιρίων (βλ.παρ.1), και με ειδικότερο στόχο τον προσδιορισμό και την εκτίμηση της δυναμικής θερμικής συμπεριφοράς κτιρίων με διπλοκέλυφη όψη με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού, πραγματοποιήθηκε θερμική ανάλυση και μοντελοποίηση των όψεων αυτών. Η θερμική ανάλυση αποβλέπει στον προσδιορισμό της κατανομής των θερμοκρασιών T (θερμοκρασιακό πεδίο) και των ροών θερμότητας Q (εισροές και εκροές ενέργειας), με στόχο τη βελτίωση των συνθηκών θερμικής άνεσης και την εξοικονόμηση ενέργειας αναφορικά με το σύστημα κτίριο-περιβάλλον.

Στη διεξαγωγή της θερμικής ανάλυσης έγινε εφαρμογή των μη-γραμμικών συγκεντρωμένων θερμικών-κυκλωματικών μοντέλων, τα οποία βασίζονται στις γνωστές αναλογίες και ισοδυναμίες μεταξύ των ηλεκτρικών και θερμικών νόμων ($N. Ohm$), όπου οι τάσεις των κόμβων V και τα ρεύματα των κλάδων I αντιστοιχούν σε θερμοκρασίες T και ροές θερμότητας Q αντιστοίχως. Οι μηχανισμοί μετάδοσης της θερμότητας με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία (μεμονωμένα ή συνδυασμένα), καθώς επίσης και οι συγκεκριμένες επιβαλλόμενες συνθήκες προσομοιώνονται εύκολα, καθιστώντας τα παραπάνω μοντέλα κατάλληλα ώστε να περιγραφούν πλήρως τα κτιριακά κελύφη που ενσωματώνουν διπλοκέλυφες προσόψεις με φωτοβολταϊκά στοιχεία και οι σχετικές συνθήκες φόρτισης. Στην παρούσα εφαρμογή, η ανάλυση τους υλοποιήθηκε με τη μέθοδο των κόμβων, οπότε εξάγονται οι τιμές των θερμοκρασιών (θερμοκρασιακό πεδίο) και των ροών θερμότητας (ανάγκες κατανάλωσης ενέργειας θέρμανσης και ψύξης). Επιπρόσθετα, η πολυπλοκότητα της λειτουργίας των διπλοκέλυφων προσόψεων που ενσωματώνουν φωτοβολταϊκά στοιχεία επέβαλε τη θεώρηση διαφόρων απλοποιητικών παραδοχών.

4.2. Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη δυναμική θερμική συμπεριφορά κτιρίου που έχει μοντελοποιηθεί με ένα συγκεντρωμένο θερμικό κυκλωματικό μοντέλο διακριτοποιούνται και οδηγούν στη διαμόρφωση μίας ομάδας από αλγεβρικές εξισώσεις με χρονικά εξαρτώμενες παραμέτρους και φορτίσεις. Το παραπάνω συγκεντρωμένο θερμικό κυκλωματικό μοντέλο αναλύεται αριθμητικά με πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή (Visual Basic) εφαρμόζοντας τη μη-γραμμική μέθοδο των κόμβων. Στη διάρκεια της διαδικασίας επίλυσης η θερμική συμπεριφορά του κτιρίου αναλύεται σε διακριτά χρονικά

βήματα Δt , ενώ έχει θεωρηθεί προηγουμένως μία χρονική περίοδος $T = 5$ ημερών, ούτως ώστε να εξαλειφθούν οι επιπτώσεις των αρχικών συνθηκών (αφού αρχικά έχει διεξαχθεί η θερμική ανάλυση σταθερής κατάστασης, τη χρονική στιγμή $t = 0$).



Διάγραμμα 4-1: Το συγκεντρωμένο θερμικό κυκλωματικό μοντέλο της διπλοκέλυφης όψης με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία

Στο Διάγραμμα 4-1, απεικονίζεται το γενικό συγκεντρωμένο θερμικό κυκλωματικό μοντέλο που αναφέρεται σε μία διπλοκέλυφη πρόσοψη που ενσωματώνει φωτοβολταϊκά στοιχεία. Το παραπάνω μοντέλο εστιάζεται κατά κύριο λόγο σε συγκεκριμένες περιοχές που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Αυτές οι περιοχές είναι:

- Η εξωτερική γυάλινη επιφάνεια της όψης του κτιρίου που ενσωματώνει τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (I).
- Η εσωτερική επιφάνεια από γυαλί και τοιχοποιία (II).
- Το εξωτερικό φυσικό περιβάλλον (III).
- Ο ενδιάμεσος χώρος της διπλοκέλυφης πρόσοψης (IV)
- Το εσωτερικό τεχνητό περιβάλλον του χώρου της κτιριακής ζώνης (V).

Το πλήρες μοντέλο οφείλλει να ενσωματώνει έναν επί πλέον αριθμό διαδρομών θερμικής ροής που θα αναφέρονται στις ανάλογες επιφάνειες του κτιριακού κελύφους (επιφάνειες τοιχοποιούν, επιφάνεια δαπέδου, επιφάνεια οροφής κλπ) και γενικά για κάθε ένα φαινόμενο που ισοδυναμεί με ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ δύο περιοχών θερμικής ανισοτροπίας. Ήτοι, το πλήρες μοντέλο ενσωματώνει επιπροσθέτως μία διαδρομή θερμικής ροής που αναφέρεται στον αερισμό ή στη λειτουργία και τον έλεγχο του συστήματος εξαερισμού. Αυτή η διαδρομή προσομοιώνεται με μία αντίσταση R_v και μία πηγή τάσης T_o . Επίσης, το πλήρες μοντέλο ενσωματώνει μία διαδρομή θερμικής ροής που αναφέρεται στη λειτουργία και τον έλεγχο του συστήματος θέρμανσης και ψύξης. Αυτή η διαδρομή προσομοιώνεται με μία πηγή ρεύματος QL .

5. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΑΣΤΙΚΟΥ ΙΣΤΟΥ ΣΤΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Η γνώση της ποσότητας της ηλιακής ακτινοβολίας που είναι διαθέσιμη σε μία περιοχή είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή αφενός αποτελεί ένδειξη της δυνατότητας εφαρμογής των φωτοβολταϊκών στοιχείων στις όψεις ή στις οροφές των κτιρίων της περιοχής, αφετέρου παρέχει τη δυνατότητα προσεγγιστικής εκτίμησης της παραγόμενης ενέργειας (βλ. παράγραφο 3). Στις περιπτώσεις όμως μελέτης κτιρίων ενταγμένων στον αστικό ιστό, είναι απαραίτητο να μελετηθεί και η γεωμετρία της δομημένης περιοχής σε σχέση με το στοιχείο, ώστε να εκτιμηθεί η επιρροή των γειτονικών κτιρίων στην ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό. Σε γενικές γραμμές, περιοχές με πυκνή ανάπτυξη, αλλά σχεδόν ομοιόμορφο ύψος κτιρίων θα μπορούσαν να θεωρηθούν ιδανικές για την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών στοιχείων στις επιστεγάσεις. Αντίθετα, αραιοκατοικημένες περιοχές με κτίρια διαφορετικών υψών προσφέρονται για την ενσωμάτωση στοιχείων στις όψεις.

Ο σκιασμός των φωτοβολταϊκών στοιχείων από γειτονικά κτίρια ή εμπόδια επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ποσότητα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, επιδρώντας με αυτό τον τρόπο στην τελική αποδοσή τους. Γι αυτό το λόγο είναι ιδιαίτερα σημαντικό να μελετάται προσεκτικά η επιλογή της θέσης, της κλίσης και του προσανατολισμού του στοιχείου, ώστε αυτό να λαμβάνει όσο το δυνατόν περισσότερο ηλιασμό. Η μελέτη της επιρροής της μορφολογίας της περιοχής στη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να γίνει με τη βοήθεια υπολογιστικών εργαλείων. Ένα τέτοιο εργαλείο αναπτύχθηκε από την ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Οικοδομικής & Φυσικής των Κτιρίων του Α.Π.Θ. Αποτελεί εφαρμογή των λογιστικών φύλλων Excel και χρησιμοποιεί γεωμετρικές συναρτήσεις για να αποδώσει την «ημισφαιρική» προβολή των γειτονικών κτιρίων στον ουράνιο θόλο. Συγκεκριμένα, με το υπολογιστικό εργαλείο:

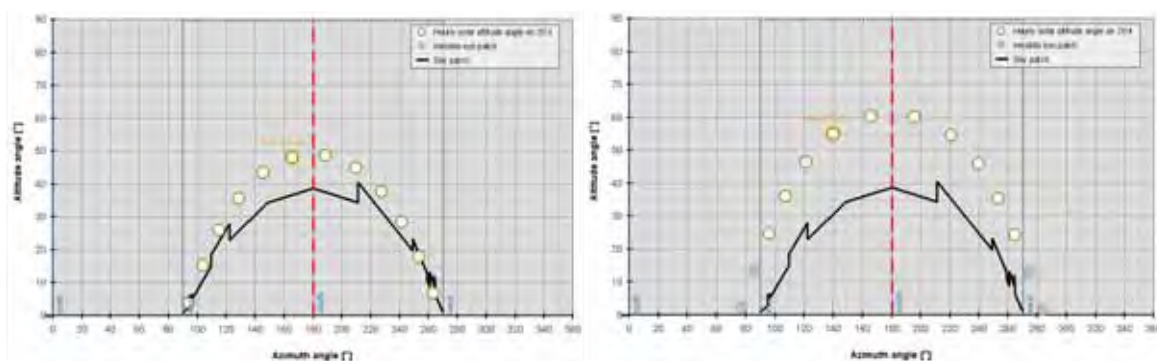
- Εξακριβώνεται εάν ο ηλιακός δίσκος είναι ορατός από ένα συγκεκριμένο σημείο της όψης του εξεταζόμενου κτιρίου σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Στην περίπτωση που τα γειτονικά κτίρια δεν παρεμποδίζουν τη θέαση του ήλιου η άμεση ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στο εξεταζόμενο σημείο, εφ' όσον φυσικά το επιτρέπουν και οι επικρατούσες κλιματικές συνθήκες.
- Υπολογίζονται οι στερεές γωνίες θέασης όλων των γειτονικών κτισμάτων και κατ' επέκταση προσδιορίζεται το τμήμα του ουράνιου θόλου, το οποίο είναι ορατό από ένα συγκεκριμένο σημείο της όψης του εξεταζόμενου κτιρίου.

Τα αποτελέσματα εμφανίζονται ενδεικτικά για την 21^η ημέρα κάθε μήνα του έτους σε σειρά σχημάτων (βλ. Σχήμα 5-1. για τους μήνες Μάρτιο και Απρίλιο) .

Ο βαθμός παρεμπόδισης της θέασης του ουράνιου θόλου από τα απέναντι κτίρια μπορεί να εκτιμηθεί από τον υπολογισμό του λόγου της επιφάνειας του τμήματος που παρεμποδίζεται προς τη συνολική επιφάνεια του τεταρτοσφαιρίου του ουρανού, το οποίο θα ήταν ορατό από την όψη στην περίπτωση απουσίας εξωτερικών εμποδίων. Στην προκειμένη περίπτωση, ο βαθμός θέασης του ουράνιου θόλου ανέρχεται στο 70% περίπου.

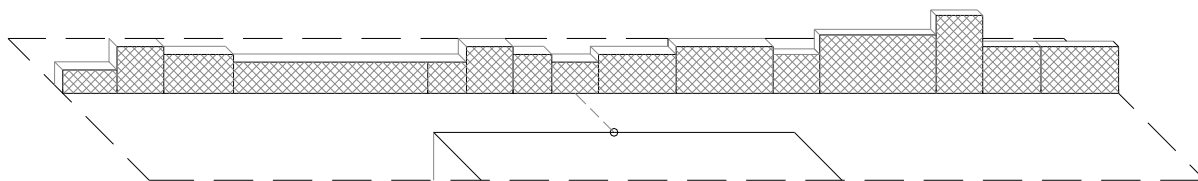
Το υπολογιστικό εργαλείο χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του ηλιακού δυναμικού σε μία περιοχή του κέντρου της Θεσσαλονίκης. Η μελέτη αφορά στη νότια όψη ενός κτιρίου, σε απόσταση 10m από το οποίο βρίσκονται κτίρια με διαφορετικά ύψη και πλάτη.

Το ανάγλυφο της απέναντι παρειάς του δρόμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-2.



Σχήμα 5-1 Τα διαγράμματα ηλιασμού και σκιασμού του εξεταζόμενου κτιρίου σε σχέση με το ανάγλυφο της περιοχής για το μήνα Μάρτιο (αριστερά) και το μήνα Απρίλιο (δεξιά)

Ο προσδιορισμός του ορατού τμήματος του ουράνιου θόλου δεν παρέχει μόνο μία ένδειξη της επιρροής της μορφολογίας μιας δομημένης περιοχής στον καθορισμό της διάχυτης ακτινοβολίας που δέχεται μια επιφάνεια, αλλά μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για τον ακριβή υπολογισμό της διαθέσιμης ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης περιόδου ή για ολόκληρο το έτος. Κάθε ορατό τμήμα του ουράνιου θόλου, ανάλογα με τη θέση του στον ουράνιο θόλο και τη σχετική του απόσταση από τον ήλιο, συνεισφέρει σε διαφορετικό βαθμό στην ποσότητα της διάχυτης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία επιφάνεια. Έτσι, τα διαγράμματα σκιασμού δεν δείχνουν μόνο τη συνολική επιφάνεια του ορατού ουράνιου θόλου, αλλά υποδεικνύουν παράλληλα και τις συντεταγμένες των τμημάτων του (γωνία ύψους, αζιμούθιο), παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο τη δυνατότητα ακριβέστερης εκτίμησης των διαθέσιμων επιπέδων ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 5-2 Οι όψεις των απέναντι κτιρίων για τη δημιουργία των διαγραμμάτων ηλιασμού και σκιασμού της όψης του κτιρίου του σχήματος 4-1

6. ΠΗΓΕΣ

1. Παραδοτέα 12, 13, 14, 15, 16 του ερευνητικού έργου: « PhotoV-AluE - Έρευνα, Ανάπτυξη και Πιστοποίηση Πλήρους Συστήματος Δομικών Στοιχείων Αλουμινίου Μεγάλων Διαστάσεων με Ενσωματωμένα Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Σύγχρονης Τεχνολογίας και Καινοτομικούς Διασυνδεδεμένους Μετατροπείς Ισχύος, με Στόχο την Ενσωμάτωσή τους στις Κτιριακές Κατασκευές». **Έργο E11, Δράση: 4.5.1-Κοινοπραξίες Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης σε τομείς εθνικής προτεραιότητας, Πράξη: ΣΠ – Ε, ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, Θεματικός Τομέας: Α.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ. Ανάδοχος: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Ερευνητική Ομάδα του Εργαστηρίου Οικοδομικής & Φυσικής των Κτιρίων του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.: Δημήτρης Μπίκας (επιστ. υπ.), Κατερίνα Τσικαλουδάκη, Οδυσσέας Σπύρογλου, Κάρολος Κοντολέων, Χριστίνα Γιαρμά, Μάριος Παπαλεξάνδρου.**

ΧΡΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΧΑΜΗΛΟΥ Η ΚΑΙ ΜΗΔΕΝΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΩΣ ΜΕΣΟ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗΣ ΣΕ ΔΙ-ΕΠΟΧΙΑΚΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΕΙΣ

Δ. Χασάπης¹, Α. Ανδρουτσόπουλος², Α. Αηδόνης¹

¹Τμήμα Θερμικών Ηλιακών Συστημάτων,

²Τμήμα Κτιρίων

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

19^ο χλμ Λ. Μαραθώνος, 190 09 Πικέρμι, Αττική, email: chasapis@cres.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένας τομέας στο χώρο των ηλιακών θερμικών συστημάτων, όπου εκπονείται ένας μεγάλος αριθμός ερευνητικών έργων, είναι η αποθήκευση ενέργειας. Για την επίτευξη μεγάλου ποσοστού κάλυψης των αναγκών ενός κτιρίου μέσω ηλιακής ενέργειας, απαιτείται η χρήση δι-εποχιακής αποθήκευσης ζεστού νερού. Ένα σημαντικό τμήμα της δι-εποχιακής αποθήκευσης, (το οποίο αυξάνει κατά πολύ το κόστος της), είναι η μόνωση, καθώς ζεστό νερό σε υψηλές θερμοκρασίες (>65 °C) θα πρέπει να διατηρηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα σε συνθήκες εξωτερικών θερμοκρασιών της τάξεως των 15-20 °C. Στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού έργου “High-Combi - High Solar Fraction Heating and Cooling Systems with Combination of Innovative Components and Methods” μελετήθηκε η χρήση υλικών χαμηλού ή και μηδενικού κόστους (όπως πλαστικά περιτυλίγματα με φυσαλίδες, άδειες πλαστικές φιάλες και θρυμματισμένα ελαστικά), με θετικά αποτελέσματα. Η συγκεκριμένη εργασία αναλύει τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής και προτείνει τη χρήση συγκεκριμένου εναλλακτικού υλικού ως θερμομονωτικό υλικό.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα βασικότερα στοιχεία μιας διε-ποχιακής αποθήκευσης που επηρεάζει σημαντικά την απόδοση της είναι η μόνωση. Αυτό συμβαίνει διότι ζεστό νερό σε θερμοκρασίες της τάξεως των 80-90°C πρέπει να διατηρηθεί με όσο το δυνατόν μικρότερες απώλειες για μια περίοδο 4 με 5 μηνών σε ένα περιβάλλον με εξωτερικές θερμοκρασίες (θερμοκρασία εδάφους) της τάξεως των 16-18 °C [1].

Σε μια μικρή αμόνωτη αποθήκευση της τάξεως των 200 m³, οι απώλειες μπορούν να ανέλθουν ακόμα και στις 9 MWh. Η επιλογή μιας πολύ καλής μόνωσης θα ελαχιστοποιήσει τις απώλειες αλλά θα αυξήσει σημαντικά το κόστος. Αντίστοιχα, η χρήση μιας φθηνής μόνωσης μειώνει το κόστος αλλά αυξάνει κατά πολύ τις απώλειες και μειώνει σημαντικά το χρόνο αποθήκευσης. Ένας τρόπος για να μειωθεί το κόστος της μόνωσης είναι να αντικατασταθούν τα συνήθη μονωτικά υλικά με επανα-χρησιμοποιημένα υλικά χαμηλού κόστους. Σκοπός αυτής της μελέτης είναι να εξετασθούν οι θερμικές ιδιότητες ορισμένων υλικών και να διερευνηθεί η καταλληλότητά τους στη χρήση ως μονωτικά υλικά.

2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Οι μετρήσεις της θερμικής αγωγιμότητας των υλικών υλοποιήθηκαν με τη χρήση Διάταξης Προστατευμένης Θερμής Πλάκας (Guarded Hot Plate) με ικανότητα μετρήσεων σε ένα εύρος θερμοκρασιών από -10 έως +80 °C [2]. Η διάταξη είναι τύπου δύο δειγμάτων και τα δείγματα τοποθετούνται οριζόντια ενώ η ροή θερμότητας είναι κάθετη σε αυτά. Η διαδικασία

μέτρησης είναι διαπιστευμένη σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN ISO/IEC 17025 από το Ε.ΣΥ.Δ. και ακολουθεί το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12667 [3]. Η διάταξη Προστατευμένης Θερμής Πλάκας φαίνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Διάταξη Προστατευμένης Θερμής Πλάκας

3. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Σύμφωνα με τις απαιτήσεις της διάταξης, τα δείγματα πρέπει να είναι στερεά και να έχουν συγκεκριμένες διαστάσεις. Καθώς όλα τα υλικά (παρότι στερεά) δεν είναι συμπαγή, μία ειδική θήκη έπρεπε να κατασκευαστεί που θα επέτρεπε την τοποθέτηση των υλικών στη διάταξη. Για τον υπολογισμό της θερμικής αντίστασης των υλικών, η θερμική αντίσταση της θήκης αφαιρείται από τη συνολική μετρούμενη θερμική αντίσταση, βάσει της σχέσης:

$$R_{tot} = R_{case} + R_{material} \Rightarrow R_{material} = R_{tot} - R_{case}$$

όπου

R_{tot} : η συνολική μετρούμενη θερμική αντίσταση.

R_{case} : η θερμική αντίσταση της θήκης.

$R_{material}$: η θερμική αντίσταση του υλικού.

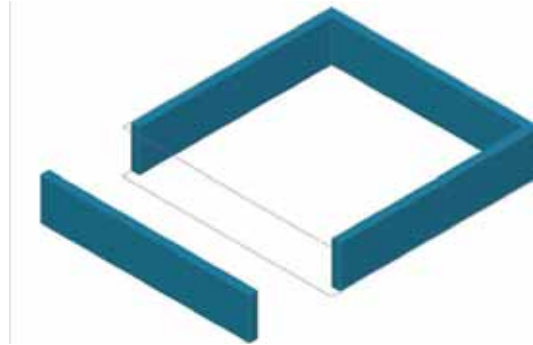
Με βάση τη θερμική αντίσταση του υλικού, η θερμική αγωγιμότητα του μπορεί να υπολογιστεί με τον παρακάτω τύπο:

$$\lambda_{material} = \frac{d_{material}}{R_{material}}$$

Η μετρούμενη θερμική αγωγιμότητα ισχύει μόνο για μία συγκεκριμένη θερμοκρασία (και διαφορά θερμοκρασίας). Για τη περίπτωση της δι-εποχιακής αποθήκευσης, καθώς η θερμοκρασία του νερού θα μεταβάλλεται σε ένα μεγάλο εύρος (περίπου από τους 15 °C έως τους 90 °C), μια μόνο μέτρηση σε μία θερμοκρασία δεν είναι αρκετή αλλά απαιτούνται μετρήσεις σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Καθώς υπήρχε περιορισμός στον αριθμό των μετρήσεων που μπορούσαν να υλοποιηθούν, αποφασίστηκε να γίνουν 2 μετρήσεις σε κάθε υλικό που να προσεγγίζουν τις μέσες αναμενόμενες θερμοκρασίες νερού. Οι θερμοκρασίες αυτές είναι 40 °C και 60 °C με μια διαφορά θερμοκρασίας της τάξεως των 20 °C (οι μετρήσεις έγιναν χωρίς την ξήρανση των υλικών για να προσομοιωθεί η συμπεριφορά τους σε πραγματικές συνθήκες). Η διαδικασία κάθε μέτρησης είχε διάρκεια περίπου από 24 έως 30 ώρες.

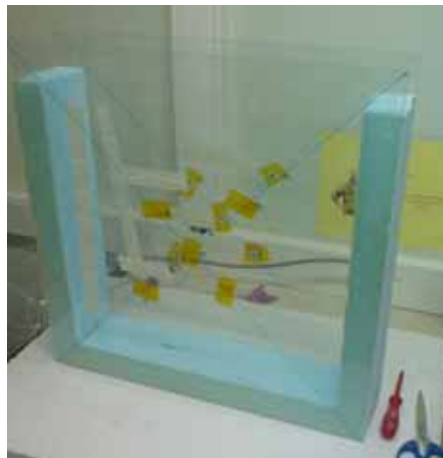
3.1. Κατασκευή θήκης και βαθμονόμηση

Καθώς η θήκη για την τοποθέτηση των υλικών προς μέτρηση θα έπρεπε να είναι άκαμπτη αλλά ταυτόχρονα να μην αυξάνει πολύ τη θερμική αντίσταση των υλικών, κατασκευάστηκε από γυαλί με πλευρικά τοιχώματα από εξηλασμένη πολυστερίνη όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2: Σχεδιασμός θήκης

Η θήκη έχει εξωτερικές διαστάσεις 50x50x10.8 cm, και μπορεί να δεχτεί υλικά συνολικών διαστάσεων 40x40x10 cm. Καθώς η διάταξη απαιτεί δύο δείγματα για τη μέτρηση, κατασκευάστηκαν δύο παρόμοιες θήκες. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται μια θήκη με τα αισθητήρια θερμοκρασίας τοποθετημένα σε κάθε πλευρά



Εικόνα 3: Η θήκη μέτρησης των υλικών με τα αισθητήρια θερμοκρασίας

Για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας του δοκιμίου, χρησιμοποιήθηκε ένα φύλλο εξηλασμένης πολυστερίνης (XPS). Το φύλλο XPS τοποθετήθηκε στη θήκη και μετρήθηκε η θερμική αγωγιμότητα της με το φύλλο XPS. Στη συνέχεια μετρήθηκε η θερμική αγωγιμότητα του φύλλου XPS και αφαιρέθηκε από την προηγούμενη μέτρηση, κατά τη σχέση:

$$R_{tot1} = R_{case} + R_{XPS} \Rightarrow R_{case} = R_{tot1} - R_{XPS}$$

3.2. Μετρήσεις υλικών

Η ιδέα των υλικών χαμηλού κόστους ήταν να χρησιμοποιηθούν κοινά υλικά που προορίζονται για άλλες χρήσεις και μετά απορρίπτονται σε χώρους αποκομιδής σκουπιδιών. Τα περισσότερα από αυτά δεν διαθέτουν υψηλή θερμική αντίσταση αλλά η μονωτική τους ικανότητα βασίζεται στην ικανότητά τους να εγκλωβίζουν τον αέρα ο οποίος δρα ως θερμική

μόνωση. Τα υλικά που επιλέχθηκαν και εξετάστηκαν είναι πλαστικό περιτύλιγμα με φυσαλίδες, άδειες πλαστικές φιάλες νερού σε συνδυασμό με περλίτη και θρυμματισμένα ελαστικά αυτοκινήτων.

3.3. Πλαστικό περιτύλιγμα με φυσαλίδες

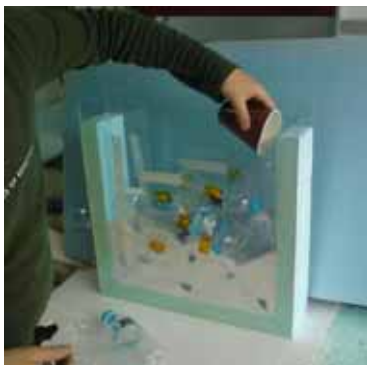
Το πρώτο υλικό που μετρήθηκε ήταν φύλλα πλαστικού περιτυλίγματος με φυσαλίδες. Τα πλαστικά περιτυλίγματα, συνήθως μετά τη χρήση τους δεν ανακυκλώνονται αλλά απορρίπτονται οπότε μπορεί να θεωρηθεί υλικό μηδενικού κόστους. Η χρήση των περιτυλιγμάτων ως μονωτικό υλικό βασίστηκε στον εγκλωβισμένο αέρα στις φυσαλίδες.



Εικόνα 4: Τα δύο δοκίμια με τα φύλλα περιτυλίγματος με φυσαλίδες

3.4. Άδειες πλαστικές φιάλες νερού σε συνδυασμό με περλίτη

Το δεύτερο υλικό που δοκιμάστηκε ήταν άδειες πλαστικές φιάλες νερού. Οι περισσότερες άδειες φιάλες νερού ανακυκλώνονται, μια μεγάλη ποσότητα όμως απορρίπτεται και αυτή σε κάδους περισυλλογής σκουπιδιών. Και σε αυτή την περίπτωση η θερμική ιδιότητα του υλικού οφείλεται στον εγκλωβισμένο αέρα μέσα στις φιάλες. Ένα σημαντικό όμως πρόβλημα των φιαλών είναι ότι λόγω του σχήματός τους παραμένει ένα μεγάλο κενό αέρος μεταξύ τους. Σε αυτό το κενό υπάρχει αέρας ο οποίος μπορεί να κινηθεί ελεύθερα, άρα και να μεταφέρει θερμότητα. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, αποφασίστηκε να πληρωθούν τα κενά μεταξύ των φιαλών με περλίτη. Ο περλίτης επιλέχτηκε λόγω του χαμηλού σχετικά κόστους του και του μικρού του όγκου που του επιτρέπει να διεισδύει στα κενά εύκολα. Η διαδικασία γεμίσματος των δοκιμίων, καθώς και τα τελικά δείγματα πλαστικών φιαλών και περλίτη φαίνονται στις Εικόνες 5 και 6.



Εικόνα 5: Δοκίμιο με πλαστικές φιάλες νερού και περλίτη κατά τη διαδικασία της πλήρωσης



Εικόνα 6: Τελικό δοκίμιο με άδειες πλαστικές φιάλες νερού και περλίτη

3.5. Θρυμματισμένα ελαστικά

Το τελευταίο υλικό που εξετάστηκε είναι θρυμματισμένα ελαστικά. Τα ελαστικά αυτοκινήτων μετά τη χρήση τους έχουν δύο χρήσεις: είτε χρησιμοποιούνται σε πίστες αγώνων ως προστατευτικά, είτε θρυμματίζονται σε διάφορες διαστάσεις και χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές όπως γήπεδα και οδοστρώματα λόγω της ελαστικότητάς τους [4]. Καθώς τα θρυμματισμένα ελαστικά είναι διαθέσιμα από τις εταιρίες ανακύκλωσης έναντι ενός ποσού, δεν είναι υλικό μηδενικού κόστους, αλλά χαμηλού κόστους. Τα θρυμματισμένα ελαστικά καθώς και το δοκίμιο προς μέτρηση φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 7: Θρυμματισμένα ελαστικά
(4x4x4mm)



Εικόνα 8: Έτοιμο δοκίμιο με
θρυμματισμένα ελαστικά

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων στους 60 °C και στους 40 °C (Πίνακες 1 και 2). Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα, τη μικρότερη θερμική αγωγιμότητα παρουσιάζουν τα θρυμματισμένα ελαστικά ($\lambda_{40} = 0.093 \text{ W/(mK)}$ στους 40 °C και $\lambda_{60} = 0.0965 \text{ W/(mK)}$ στους 60 °C), ακολουθούμενα από τις πλαστικές φιάλες σε συνδυασμό με περλίτη ($\lambda_{40} = 0.126 \text{ W/(mK)}$ στους 40 °C και $\lambda_{60} = 0.145 \text{ W/(mK)}$ στους 60 °C) και τη μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα την έχει το πλαστικό περιτύλιγμα με φυσαλίδες ($\lambda_{40} = 0.182 \text{ W/(mK)}$ στους 40 °C και $\lambda_{60} = 0.214 \text{ W/(mK)}$ στους 60 °C). Επίσης, τα θρυμματισμένα ελαστικά παρουσίασαν την μικρότερη μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας (αύξηση 3.7%), ακολουθούμενα από τις πλαστικές φιάλες με τον περλίτη (αύξηση 15%) ενώ τη μεγαλύτερη μεταβολή την είχε το πλαστικό περιτύλιγμα με φυσαλίδες (αύξηση 17.6%).

Η πολύ υψηλή θερμική αγωγιμότητα του πλαστικού περιτυλίγματος μπορεί να αποδοθεί στα κενά που υπήρχαν μεταξύ των φύλλων πλαστικού κατά το γέμισμα των δοκιμίων, που επέτρεπε στον αέρα να κυκλοφορεί ελεύθερα. Αυτό δικαιολογεί και τη μεγάλη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα μετρήσεων των υλικών στους 60 °C

Δοκίμιο	Γυαλί-XPS- γυαλί	Εξηλασμένη πολυστερίνη XPS	Πλαστικό περιτύλιγμα με φυσαλίδες	Πλαστικές φιάλες νερού με περλίτη	Θρυμματισμένα ελαστικά
Χαρακτηριστικά					
Διαστάσεις – μήκος (m) x πλάτος (m)	0.40 x 0.40	0.40 x 0.40	0.40 x 0.40	0.40 x 0.40	0.40 x 0.40
Πάχος (m)	0.1075	0.098	0.1075	0.1075	0.1075
Μέση θερμοκρασία δοκιμής (°C)	59.92	60.04	59.9	60.16	59.99
Διαφορά θερμοκρασίας (°C)	19.63	20.2	19.01	19.60	19.12
R_{totl} [(m ² K)/W]	2.767	-	-	-	-
R_{tot} [(m ² K)/W]	-	-	0.463	0.681	1.02
$R_{material}$ [(m ² K)/W]	0.00667	2.76	0.457	0.674	1.013
$\lambda_{material}$ [W/(mK)]	1.2	0.036	0.214	0.145	0.0965

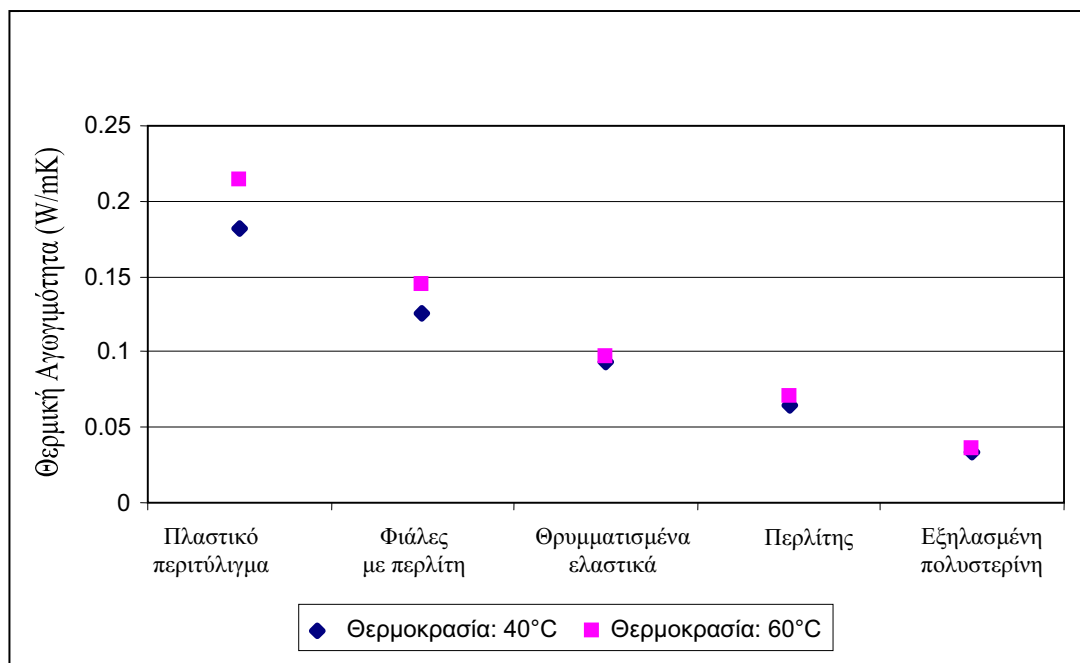
Πίνακας 2: Αποτελέσματα μετρήσεων των υλικών στους 40 °C

Δοκίμιο	Γυαλί-XPS- γυαλί	Εξηλασμένη πολυστερίνη XPS	Πλαστικό περιτύλιγμα με φυσαλίδες	Πλαστικές φιάλες νερού με περλίτη	Θρυμματισμένα ελαστικά
Χαρακτηριστικά					
Διαστάσεις – μήκος (m) x πλάτος (m)	0.40 x 0.40	0.40 x 0.40	0.40 x 0.40	0.40 x 0.40	0.40 x 0.40
Πάχος (m)	0.1075	0.098	0.1075	0.1075	0.1075
Μέση θερμοκρασία δοκιμής (°C)	39.44	39.82	39.81	40.03	39.86
Διαφορά θερμοκρασίας (°C)	19.33	19.99	19.42	19.44	19.27
R_{totl} [(m ² K)/W]	2.915	-	-	-	-
R_{tot} [(m ² K)/W]	-	-	0.545	0.785	1.060
$R_{material}$ [(m ² K)/W]	0.00769	2.907	0.5375	0.777	1.052
$\lambda_{material}$ [W/(mK)]	1.04	0.034	0.182	0.126	0.093

Το φαινόμενο αυτό δεν ήταν ορατό στις πλαστικές φιάλες λόγω της πολύ καλής πλήρωσης των κενών με περλίτη. Ένα πρόβλημα που υπήρχε στο συνδυασμό πλαστικών φιαλών με περλίτη όμως, ήταν αυτό της υγρασίας. Οι πλαστικές φιάλες που μαζεύθηκαν είχαν σχεδόν όλα λίγες σταγόνες νερού. Αυτές δεν αδειάστηκαν καθώς και στη περίπτωση χρήσης των φιαλών στη πράξη δεν θα ήταν δυνατό να αδειάσουν τελείως όλες οι φιάλες. Αυτές οι σταγόνες νερού εξατμίστηκαν κατά τη θέρμανση του δείγματος και διέφυγαν από τα πόματα

στον περλίτη. Αυτό ήταν ορατό τόσο σαν υγρασία στα τζάμια, όσο και στον περλίτη που σε πολλά σημεία ήταν υγρός. Η υγρασία αυτή επηρέασε τόσο τη θερμική αγωγιμότητα των φιαλών με τον περλίτη όσο και το ποσοστό μεταβολής της με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Τα θρυμματισμένα ελαστικά λόγω του μικρού τους μεγέθους γέμισαν πλήρως τις θήκες και δεν παρουσίασαν το πρόβλημα του κινούμενου αέρα. Επίσης, όπως αναφέρθηκε παρουσίασαν την μικρότερη μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ένας από τους βασικούς παράγοντες που επηρέασαν σε αυτό είναι το γεγονός ότι έχουν σχεδιαστεί ώστε να έχουν όσο το δυνατόν σταθερότερη συμπεριφορά σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας που μπορεί να φτάσει από τους 45 °C έως τους 300 °C [4]. Όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9: Θερμική αγωγιμότητα των μετρημένων υλικών σε σύγκριση με τον περλίτη [5] και την εξηλασμένη πολυστερίνη [1]

5. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ

Κάθε χρόνο ανακυκλώνονται περίπου 50.000 τόνοι ελαστικών που αναλογεί σε περίπου 35.000 τόνους καουτσούκ[4]. Το κόστος των θρυμματισμένων ελαστικών εξαρτάται από το μέγεθός τους. Για ένα μέγεθος 6x6x6 mm το κόστος είναι περίπου 100 € τον τόνο ενώ για τα θρύμματα μεγέθους 4x4x4 mm (με πυκνότητα περίπου 500 kg/m³) το κόστος είναι 150 € τον τόνο. Συγκρίνοντας τη θερμική αγωγιμότητα των θρυμματισμένων ελαστικών με τον περλίτη, σε πιθανή αντικατάσταση του περλίτη με τα ελαστικά, το πάχος της μόνωσης θα πρέπει να αυξηθεί κατά 30%. Το 1 m³ περλίτη κοστίζει 450 € ενώ το 1.3 m³ θρυμματισμένων ελαστικών διατάσεων 6x6x6mm κοστίζει 52 €. Αντίστοιχα, συγκρίνοντας τη θερμική αγωγιμότητα των θρυμματισμένων ελαστικών με την εξηλασμένη πολυστερίνη, για να αντικατασταθεί η πολυστερίνη με τα ελαστικά, το πάχος της μόνωσης θα πρέπει να αυξηθεί κατά 300%. Το 1 m³ πολυστερίνης κοστίζει 150 € ενώ τα 3 m³ θρυμματισμένων ελαστικών διατάσεων 6x6x6mm κοστίζουν 120 €.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικά, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η χρήση των θρυμματισμένων ελαστικών ως μονωτικό μέσω έχει πολλές προοπτικές. Οι θερμικές τους ιδιότητες είναι άμεσα συγκρίσιμες με αυτές του περλίτη, καθώς με ελάχιστη αύξηση του πάχους της μόνωσης μπορεί να επιτευχθεί παρόμοια θερμική συμπεριφορά. Το κόστος της χρήσης των ελαστικών όμως είναι κατά πολύ χαμηλότερο. Αντίθετα, τα υπόλοιπα υλικά, το καθένα για τους λόγους που προαναφέρθηκαν, δεν διαθέτουν τα απαραίτητα στοιχεία για χρήση ως μονωτικά υλικά. Οι άδειες πλαστικές φιάλες θα μπορούσαν να είχαν καλύτερα αποτελέσματα και να συνδυασθούν ακόμα και με τα θρυμματισμένα ελαστικά ώστε να μειωθεί περαιτέρω το κόστος της μόνωσης αλλά αυτό θα προϋπόθετε να ήταν εντελώς στεγνά που στη πράξη είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των ελαστικών είναι ότι δεν καταστρέφονται από την υγρασία. Αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση διαρροής, σε αντίθεση με άλλα υλικά όπως ο περλίτης, η μονωτική ιδιότητα των ελαστικών δεν θα καταστραφεί και δεν θα χρειασθεί αλλαγή μόνωσης. Ένας περαιτέρω συνδυασμός ώστε να μην αυξηθεί το κόστος της μόνωσης θα ήταν ένας συνδυασμός ενός εσωτερικού στρώματος θρυμματισμένων ελαστικών με ένα εξωτερικό στρώμα κοινού μονωτικού υλικού όπως τα υαλώδη κομμάτια με ενσωματωμένα φιαλίδια αέρα (foam glass gravel) [6].

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η συγκεκριμένη μελέτη δεν αποτελεί ολοκληρωμένη μελέτη για την χρήση των υλικών αυτών ως μονωτικά υλικά αλλά τη βάση στην οποία θα πρέπει να γίνουν περαιτέρω μελέτες. Δύο βασικοί παράγοντες που θα πρέπει να εξετασθούν είναι η διάρκεια ζωής και η γήρανση των ελαστικών (και κατά πόσο επηρεάζει της θερμικές τους ιδιότητες) και η επίδραση της υγρασίας στη θερμική αγωγιμότητά τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abschlussbericht zum Vorhaben, Weiterentwicklung der Erdbecken-Warmespeichertechnologie, Fabias Ochs, Institute für Thermodynamik und Warmetechnik, Universität Stuttgart.
2. Ιστοσελίδα: <http://www.cres.gr/services/istos.chtm?prnbr=25113&locale=el>
3. ΕΛΟΤ EN 12667, Θερμική απόδοση κτιριακών υλικών και προϊόντων – Προσδιορισμός θερμικής αντίστασης με τις μεθόδους προστατευμένης θερμής πλάκας και μέτρησης ροής θερμότητας – Προϊόντα υψηλής και μέσης θερμικής αντίστασης, 2001.
4. Ιστοσελίδα Εγκεκριμένου Συστήματος Εναλλακτικής Διαχείρισης Μεταχειρισμένων Ελαστικών, <http://www.ecoelastika.gr/>
5. Ιστοσελίδα Ινστιτούτου περλίτη “The Perlite Institute”, http://www.perlite.org/perlite_info.htm
6. Effective thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature, F. Ochs et al, International Journal of Heat and Mass Transfer, July 2007

ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΟΛΥΜΒΗΤΗΡΙΟΥ ΑΜΠΕΛΟΚΗΠΩΝ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ: ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΚΙΑΣΜΟΥ - ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ – ΟΠΤΙΚΗΣ ΑΝΕΣΗΣ

Κλειώ Αξαρλή¹, Αικατερίνη Μερέση²
Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτιρίων,
Πολυτεχνική Σχολή, Α.Π.Θ., 54124 Θεσσαλονίκη
axarli@civil.auth.gr¹, kmeressi@arch.auth.gr²

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αναφέρεται στη διαδικασία σχεδιασμού, με βιοκλιματικά κριτήρια, του κελύφους του κολυμβητηρίου Αμπελοκήπων στη Θεσσαλονίκη, ώστε αυτό εκτός από την εξοικονόμηση ενέργειας κατά την λειτουργία του, να προσφέρει και συνθήκες οπτικής άνεσης για τους χρήστες.

Τα κολυμβητήρια είναι ειδικά κτίρια με ιδιαιτερότητες, όσον αφορά το μέγεθος, το χρόνο λειτουργίας τους, τον τρόπο χρήσης τους, τις δραστηριότητες και τα διάφορα αθλήματα που εκτελούνται σε αυτά, και κατά συνέπεια έχουν ειδικές απαιτήσεις σκίασης και οπτικής άνεσης που πρέπει να επιτευχθεί.

Για τη διαστασιολόγηση των ανοιγμάτων και την επιλογή των στοιχείων ελέγχου τους (ηλιοπροστατευτικά συστήματα, είδος υαλοπινάκων, κλπ), πραγματοποιήθηκαν μελέτες διερεύνησης του ηλιασμού-σκιασμού, υπολογισμού των επιπέδων φυσικού φωτισμού και προσδιορισμού της θάμβωσης, με τη χρήση των κατάλληλων λογισμικών (ECOTECT 5.5 και RADIANCE). Κύριος στόχος των μελετών είναι ο επαρκής και βέλτιστος σκιασμός των υαλοστασίων της νοτιοανατολικής όψης (σε συνδυασμό και με την ενεργειακή μελέτη), η διατήρηση υψηλών επιπέδων φυσικού φωτισμού και τέλος η επίτευξη οπτικής άνεσης και η αποφυγή της θάμβωσης από τα μεγάλα υαλοστάσια, για τους χρήστες: κολυμβητές και θεατές.

Η μελέτη καταλήγει επίσης να προτείνει ετήσιο διάγραμμα βέλτιστης λειτουργίας του προτεινόμενου συστήματος σκίασης και ειδικά μέτρα για να αποφεύγεται η ενοχλητική θάμβωση κατά τη διάρκεια των προπονήσεων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο ενεργειακός – βιοκλιματικός σχεδιασμός στοχεύει στην εξοικονόμηση ενέργειας για τη λειτουργία του κτιρίου, παρέχοντας συγχρόνως συνθήκες θερμικής και οπτικής άνεσης για τους χρήστες του. Το θέμα της οπτικής άνεσης συχνά παραβλέπεται όταν σχεδιάζονται τα κτίρια, ακόμη και όταν ο βιοκλιματικός σχεδιασμός είναι βασική παράμετρος των αρχιτεκτονικών χειρισμών. Ιδιαίτερα, για τα κτίρια με ειδικές λειτουργίες και στα οποία συγκεντρώνεται μεγάλο πλήθος χρηστών, η παροχή οπτικής άνεσης και η αποφυγή της θάμβωσης είναι παράμετροι εξίσου σημαντικές με την επίτευξη της θερμικής άνεσης.

Η μελέτη του σκιασμού, του φυσικού φωτισμού και της οπτικής άνεσης, η οποία παρουσιάζεται, αποτελεί μέρος ερευνητικού προγράμματος που ανατέθηκε από το Δήμο Αμπελοκήπων με τη χρηματοδότηση της Γ.Γ.Α., το οποίο στοχεύει στον περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό και τη μεγαλύτερη δυνατή ενεργειακή αυτονομία του μελετώμενου κολυμβητηρίου Αμπελοκήπων Θεσσαλονίκης¹.

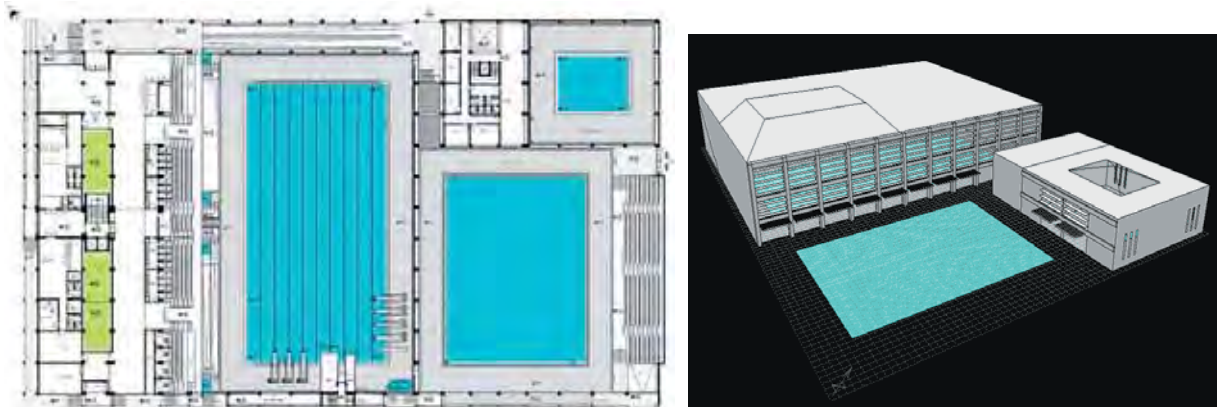
¹ Ο σχεδιασμός έγινε υπό την εποπτεία των Κ. Αντωνίου και Ε. Κάστρο με υπεύθυνη για τη βιοκλιματική μελέτη την Κ. Αξαρλή.

Η διερεύνηση του σκιασμού, του φυσικού φωτισμού και της οπτικής άνεσης είχε ως σκοπό να συμβάλει στη σωστή διαχείριση του κτιριακού κελύφους, το οποίο, λόγω της ιδιαιτερότητας της λειτουργίας και χρήσης του κτιρίου, απαιτούσε ειδική αντιμετώπιση.

Η απόδοση και η ασφάλεια των αθλητών, ιδίως αυτών που πραγματοποιούν καταδύσεις, απαιτεί τη δημιουργία συνθηκών άνεσης και την αποφυγή της οπτικής θάμβωσης. Συγχρόνως, ο σχεδιασμός οφείλει να παρέχει ικανοποιητικές συνθήκες οπτικής άνεσης και για τους θεατές. Το νερό, όταν προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία σε αυτό, προκαλεί σημαντικές ανακλάσεις και δημιουργεί μεγάλη φωτεινότητα, με συνέπεια η μεγάλη επιφάνεια της κολυμβητικής δεξαμενής, σε συνδυασμό με την αυξημένη επιφάνεια των υαλοστασίων που παρέχεται για τη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου, να αποτελεί στοιχείο δημιουργίας συνθηκών οπτικής δυσφορίας.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Καταρχήν, πρέπει να σημειωθεί ότι στο κολυμβητήριο Αμπελοκήπων ο κτιριακός όγκος σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε ο προσανατολισμός του κυριότερου χώρου, δηλαδή του χώρου με τη μεγάλη κολυμβητική δεξαμενή, να είναι νοτιοανατολικός. Το γεγονός αυτό προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η αξιοποίηση των πρωϊνών ηλιακών κερδών το χειμώνα, η μείωση του κινδύνου της θάμβωσης κατά τη διάρκεια των αγώνων (οι οποίοι συνήθως πραγματοποιούνται μετά τις 12.00 το μεσημέρι) και η αποφυγή της υπερθέρμανσης του χώρου το καλοκαίρι, αφού ο ανεπιθύμητος δυτικός ήλιος δεν «βλέπει» ποτέ το χώρο της πισίνας. Παρόλο που το κολυμβητήριο αποτελείται από δύο όγκους (εικόνες 1 & 2), τον κύριο που στεγάζει την μεγάλη κολυμβητική δεξαμενή και έναν μικρότερο με την παιδική δεξαμενή, επιλέχθηκε να παρουσιαστούν η διαδικασία προσέγγισης και οι σημαντικότερες αποφάσεις σχεδιασμού που αφορούν στον κύριο χώρο των αγώνων, ο οποίος φιλοξενεί μεγάλο αριθμό θεατών και στον οποίο διεξάγονται οι αγώνες.



Εικόνες 1 & 2: Κάτοψη και προοπτικό του Κολυμβητηρίου Αμπελοκήπων

Τα στάδια της έρευνας για την εξασφάλιση της απαραίτητης σκίασης και των συνθηκών οπτικής άνεσης, κατά τη διάρκεια τόσο των προπονήσεων όσο και των αγώνων, ήταν τα εξής:

- Αρχικά εξετάστηκε ο βέλτιστος σκιασμός του κύριου χώρου όπου διεξάγονται οι αγώνες, με το σκεπτικό ότι το σύστημα σκίασης δεν θα πρέπει να μειώνει υπερβολικά τα επίπεδα φυσικού φωτισμού στο χώρο.
- Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε έλεγχος των επιπέδων φυσικού φωτισμού.
- Τέλος, μελετήθηκε η θάμβωση που μπορεί να προκληθεί σε συγκεκριμένες χαρακτηριστικές θέσεις (τόσο σε αθλητές, όσο και σε θεατές).

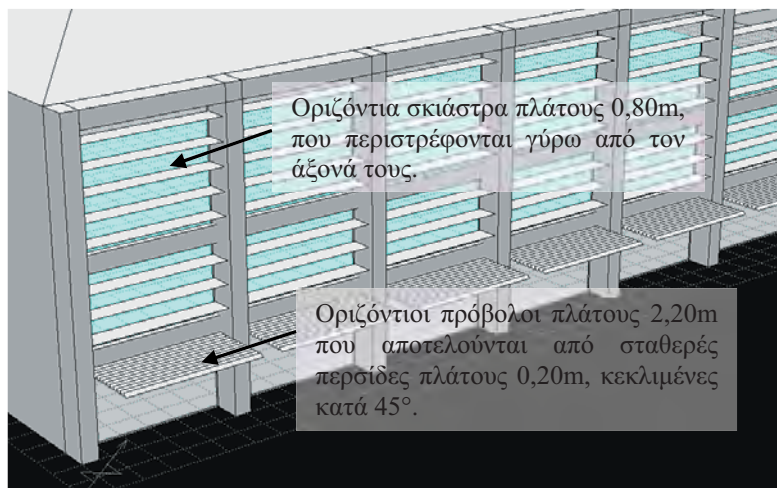
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 ΣΚΙΑΣΜΟΣ

Για την επίτευξη της οπτικής άνεσης των χρηστών (αθλητών και θεατών), καθώς και για τη βέλτιστη ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ήταν απαραίτητη η μελέτη του κατάλληλου συστήματος σκιασμού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το ηλιοπροστατευτικό σύστημα που μελετήθηκε αποτελείται από δύο στοιχεία (εικόνα 3):

- Οι δύο ανώτερες ζώνες των υαλοστασίων στην νοτιοανατολική όψη προστατεύονται από οριζόντια σκιάστρα πλάτους 0,80m. Τα σκιάστρα αυτά περιστρέφονται γύρω από τον άξονά τους, με σκοπό να έχουν την επιθυμητή, κάθε φορά, κλίση.
- Η κατώτερη ζώνη της νοτιοανατολικής όψης προστατεύεται από οριζόντιους προβόλους που αποτελούνται από σταθερές περσίδες πλάτους 0,20m, κεκλιμένες κατά 45°. Το συνολικό πλάτος των προβόλων αυτών είναι 2,20m.

Η βέλτιστη διαστασιολόγηση και κλίση των σκιάστρων προέκυψε μέσω μελέτης σκιασμού με το λογισμικό ECOTECT 5.5 [1].



Εικόνα 3: Το σύστημα σκίασης στη νοτιοανατολική όψη του Κολυμβητηρίου.

Ακολουθούν κάποιες ενδεικτικές εικόνες από τη μελέτη σκιασμού, για τις ημερομηνίες 21 Δεκεμβρίου και 21 Ιουνίου και για χαρακτηριστικές ώρες λειτουργίας του κολυμβητηρίου (εικόνες 4 - 7).

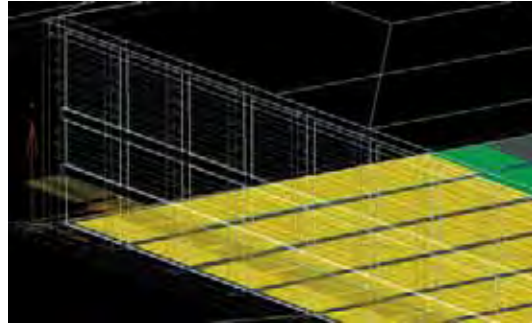
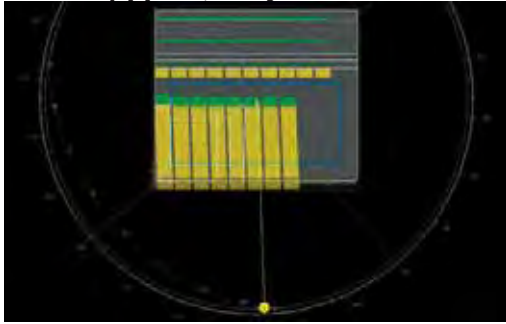
Όσον αφορά στη χειμερινή περίοδο, τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

1. Η οριζόντια θέση των περιστρεφόμενων σκιάστρων δεν καλύπτει επαρκώς τις ανάγκες σκίασης του χώρου της κολυμβητικής δεξαμενής.
2. Κατά τις πρωινές ώρες (μέχρι περίπου τις 10:00) η επαρκής σκίαση της πισίνας μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω της μείωσης της φωτο-διαπερατότητας των υαλοστασίων της χαμηλής ζώνης (π.χ. μέσω αμμοβολής).
3. Μετά τις 12:00 περίπου (ανάλογα με τον μήνα), παύει να εισέρχεται ηλιακή ακτινοβολία στο χώρο. Το διάστημα αυτό συμπίπτει με τις ώρες εντατικής χρήσης του κολυμβητηρίου.

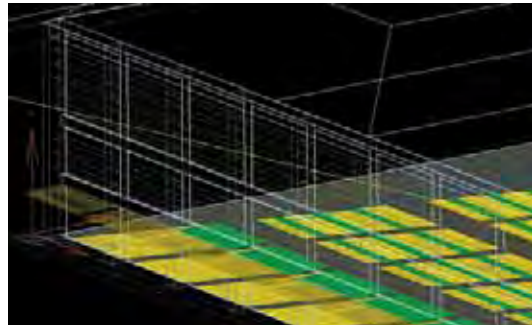
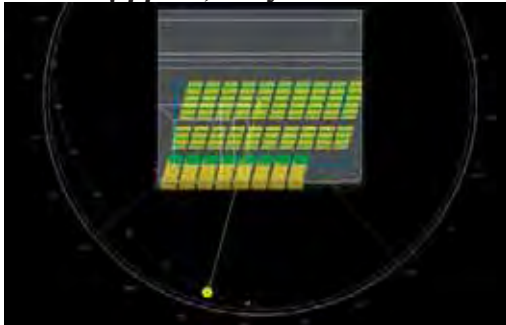
Το καλοκαίρι τα δεδομένα είναι αρκετά διαφορετικά από ότι το χειμώνα κι έτσι:

1. Η οριζόντια θέση των περιστρεφόμενων σκιάστρων καλύπτει επαρκώς τις ανάγκες σκίασης του χώρου της πισίνας.
2. Μετά τις 9:00 περίπου (ανάλογα με τον μήνα), παύει να εισέρχεται ηλιακή ακτινοβολία στο χώρο, γεγονός που συμβάλλει τόσο στην αποφυγή της θάμβωσης, όσο και της υπερθέρμανσης.

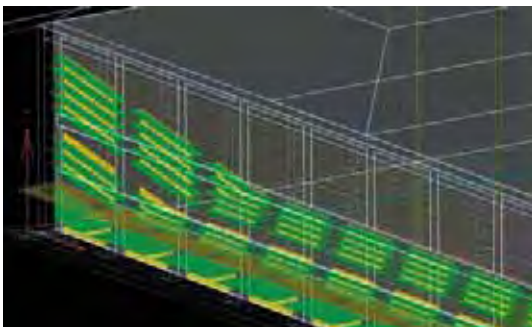
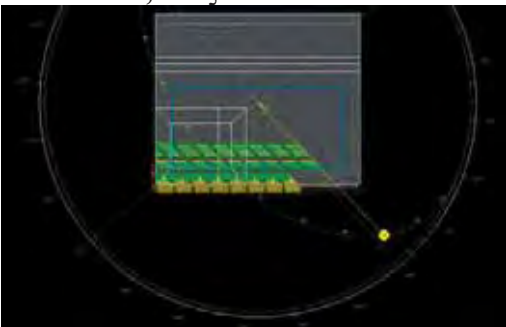
21 Δεκεμβρίου, στις 8:30



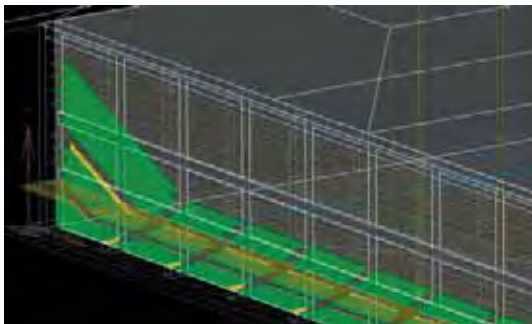
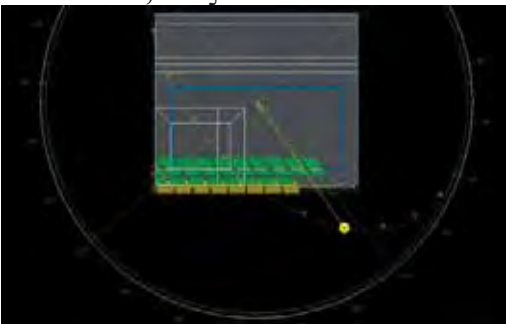
21 Δεκεμβρίου, στις 10:00



21 Ιουνίου, στις 7:30



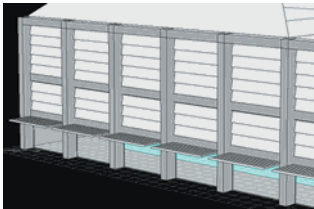
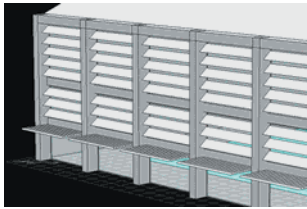
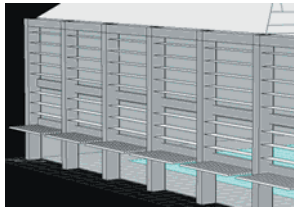
21 Ιουνίου, στις 9:00



Εικόνες 4-7: Ενδεικτικές εικόνες από τη μελέτη σκιασμού στο λογισμικό ECOTECT 5.5 όπου με πράσινο χρώμα απεικονίζεται η σκιά από το προτεινόμενο σύστημα σκίασης.

Με βάση τη μελέτη σκιασμού διαμορφώθηκε το ετήσιο διάγραμμα βέλτιστης λειτουργίας των περιστρεφόμενων περσίδων (Πίνακας 1).

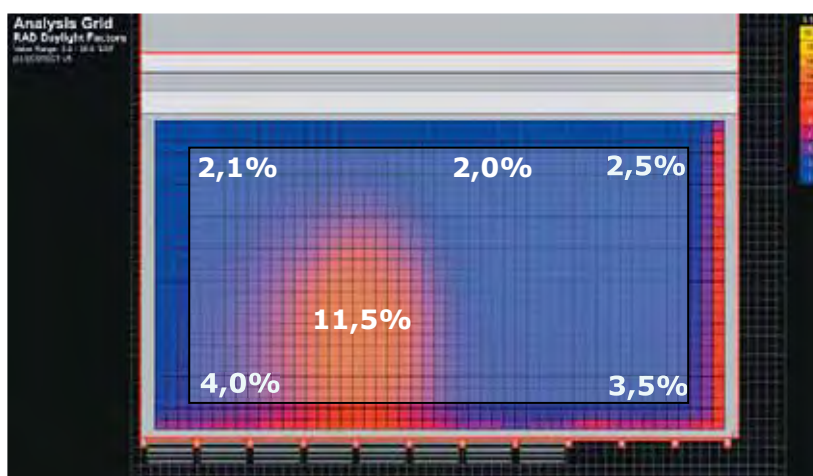
Πίνακας 1: Ετήσιο διάγραμμα βέλτιστης λειτουργίας των περιστρεφόμενων σκιάστρων

	Κλειστά	Σε κλίση 45°	Οριζόντια
			
Ιανουάριος	Μέχρι τις 11:00	Μέχρι τις 13:30	Μετά τις 13:30
Φεβρουάριος	Μέχρι τις 10:00	Μέχρι τις 12:30	Μετά τις 12:30
Μάρτιος	Μέχρι τις 09:00	Μέχρι τις 11:30	Μετά τις 11:30
Απρίλιος	Μέχρι τις 08:00	Μέχρι τις 10:30	Μετά τις 10:30
Μάιος	Μέχρι τις 07:00	Μέχρι τις 09:30	Μετά τις 09:30
Ιούνιος	-	Μέχρι τις 08:30	Μετά τις 08:30
Ιούλιος	Μέχρι τις 07:00	Μέχρι τις 09:30	Μετά τις 09:30
Αύγουστος	Μέχρι τις 08:00	Μέχρι τις 10:30	Μετά τις 10:30
Σεπτέμβριος	Μέχρι τις 09:00	Μέχρι τις 11:30	Μετά τις 11:30
Οκτώβριος	Μέχρι τις 10:00	Μέχρι τις 12:30	Μετά τις 12:30
Νοέμβριος	Μέχρι τις 11:00	Μέχρι τις 13:30	Μετά τις 13:30
Δεκέμβριος	Μέχρι τις 11:30	Μέχρι τις 14:00	Μετά τις 13:45

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τις βραδινές ώρες του χειμώνα η κλειστή θέση των σκιάστρων μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη μείωση των θερμικών απωλειών. Αντίστοιχα, κατά τους θερινούς μήνες, η θέση των σκιάστρων, τα οποία προτείνεται να τοποθετηθούν σε απόσταση από το υαλοστάσιο, συμβάλλει στον καλύτερο αερισμό (άρα και δροσισμό) της όψης.

3.2 ΦΥΣΙΚΟΣ ΦΩΤΙΣΜΟΣ

Για τη μελέτη του φυσικού φωτισμού χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά RADIANCE [2] και ECOTECT 5.5. Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται με τη βοήθεια του γραφικού περιβάλλοντος ECOTECT 5.5, η κατανομή του φυσικού φωτισμού σε συνθήκες νεφосκεπούς ουρανού, όπως υπολογίστηκε με το λογισμικό RADIANCE.



Εικόνα 8: Κατανομή του φυσικού φωτισμού στην επιφάνεια της κολυμβητικής δεξαμενής, σε συνθήκες νεφосκεπούς ουρανού.

Μελετήθηκε η περίπτωση του νεφосκεπούς ουρανού ως η χειρότερη περίπτωση από την άποψη της ποσότητας φωτισμού (τα περιστρεφόμενα σκίαστρα βρίσκονται σε οριζόντια θέση). Στα σκοτεινότερα σημεία της μεγάλης πισίνας ο Σ.Φ.Φ. κυμαίνεται γύρω στο 2%, ενώ στα φωτεινότερα γύρω στο 11,5%. Οι τιμές αυτές κρίνονται γενικά ικανοποιητικές, αφού η ελάχιστη προτεινόμενη τιμή είναι 2% [3]. Ο φωτισμός στο κέντρο της πισίνας ενισχύεται από άνοιγμα στην οροφή με βορειοανατολικό προσανατολισμό. Στις περιπτώσεις που οι περσίδες είναι υπό κλίση, αποκόπτουν την είσοδο της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά διευκολύνουν την είσοδο της ανακλώμενης από το έδαφος και τον περιβάλλοντα χώρο, γεγονός που συμβάλλει σε αυξημένα επίπεδα φυσικού φωτισμού.

3.3 ΘΑΜΒΩΣΗ

Σύμφωνα με τη Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού [4], *θάμβωση είναι η έλλειψη οπτικής άνεσης ή η μείωση της ικανότητας να διακρίνονται οι λεπτομέρειες των αντικειμένων, η οποία οφείλεται είτε σε ακατάλληλες αναλογίες λαμπρότητας των γύρω επιφανειών, είτε σε πολύ έντονες αντιθέσεις στη φωτεινότητά τους*. Η θάμβωση αποτελεί σύνθετο φαινόμενο, στο οποίο εμπλέκεται η κατανόηση πολλών παραμέτρων, όπως η χρονική διάρκεια της πηγής θάμβωσης, οι αναλογίες λαμπρότητας μεταξύ της πηγής θάμβωσης και των γύρω επιφανειών και οι απαιτήσεις σε φωτισμό του χώρου.

Για τον προσδιορισμό της θάμβωσης, υπολογίζεται ο δείκτης θάμβωσης φυσικού φωτισμού DGI (Daylight Glare Index). Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τους μέγιστους αποδεκτούς δείκτες θάμβωσης για φυσικό φωτισμό [5].

Πίνακας 2: Μέγιστοι αποδεκτοί δείκτες θάμβωσης για φυσικό φωτισμό	
Χαρακτηρισμός θάμβωσης	DGI
Ανεπαίσθητη θάμβωση	16 - 18
Αποδεκτή θάμβωση	20 - 22
Μη ανεκτή θάμβωση	24 - 26
Αφόρητη θάμβωση	28

Για την αξιολόγηση της θάμβωσης στο χώρο της κολυμβητικής δεξαμενής επιλέχθηκαν να μελετηθούν κάποιες χαρακτηριστικές περιπτώσεις. Ως ημερομηνία επιλέχθηκε η 21η Δεκεμβρίου γιατί τότε το ηλιακό ύψος είναι χαμηλότερο και είναι πιο πιθανό να υπάρξει θάμβωση. Αρχικά ως θέση θέασης επιλέχθηκε η «χειρότερη» για τους αθλητές, δηλαδή η θέα των υαλοστασίων μέσα από την πισίνα. Στη συνέχεια εξετάστηκε η περίπτωση ενός αθλητή που πραγματοποιεί κατάδυση από το βατήρα, όπως επίσης και η θέαση των υαλοστασίων από τους θεατές που βρίσκονται στις κερκίδες.

Αναλυτικότερα, εξετάστηκαν οι ακόλουθες περιπτώσεις:

Περίπτωση 1: 21 Δεκεμβρίου στις 10:00, με τα σκίαστρα σε οριζόντια θέση (εικόνα 9).

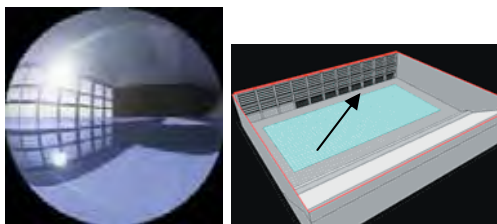
Θέση θέασης: κολυμβητής που κοιτάει προς τα υαλοστάσια.

Από τη μελέτη προέκυψε πως η οριζόντια θέση των σκιάστρων δεν προστατεύει τους αθλητές από τη θάμβωση, καθόσον τις πρωινές ώρες του χειμώνα το ηλιακό ύψος είναι μικρό. Ο δείκτης θάμβωσης (DGI) για τη συγκεκριμένη θέση θέασης αγγίζει την τιμή 44,6.

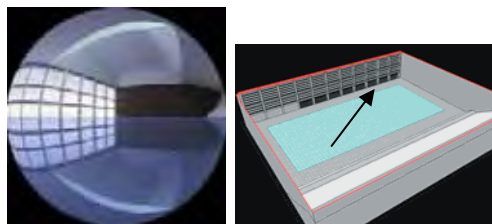
Περίπτωση 2: 21 Δεκεμβρίου στις 16:00, με τα σκίαστρα σε οριζόντια θέση (εικόνα 10).

Θέση θέασης: κολυμβητής που κοιτάει προς τα υαλοστάσια

Κατά τις απογευματινές ώρες που δεν εισέρχεται ηλιακή ακτινοβολία μέσα στο χώρο της πισίνας, δεν υπάρχει ο κίνδυνος της θάμβωσης (μηδενικός δείκτης θάμβωσης).



Εικόνα 9: Σκίαστρα σε οριζόντια θέση.
21/12 στις 10:00. Μέγιστη τιμή DGI: 44,6



Εικόνα 10: Σκίαστρα σε οριζόντια θέση.
21/12 στις 16:00. Μέγιστη τιμή DGI: 0

Περίπτωση 3: 21 Δεκεμβρίου στις 10:00, με τα σκίαστρα σε κλειστή θέση (εικόνα 11).

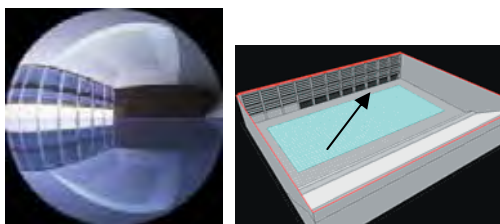
Θέση θέασης: κολυμβητής που κοιτάει προς τα υαλοστάσια

Η θάμβωση δεν είναι τόσο έντονη όπως στην περίπτωση 1 που ο ήλιος εισέρχεται στην πισίνα, παρ' όλα αυτά υπάρχει θάμβωση, λόγω της έντονης λαμπρότητας των υαλοστασίων της κάτω ζώνης. Ο δείκτης θάμβωσης (DGI) για τη συγκεκριμένη θέση θέασης αγγίζει την τιμή 28,1 κοντά στα υαλοστάσια.

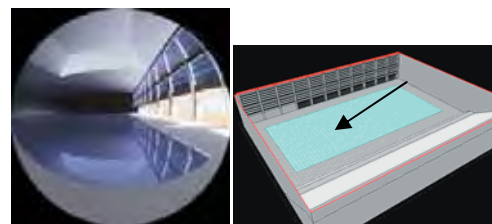
Περίπτωση 4: 21 Δεκεμβρίου στις 10:00, με τα σκίαστρα σε κλειστή θέση (εικόνα 12).

Θέση θέασης: κολυμβητής που ετοιμάζεται να βουτήξει.

Ο δείκτης θάμβωσης (DGI) για τη συγκεκριμένη θέση θέασης αγγίζει την τιμή 20,99, γεγονός που φανερώνει ότι η θάμβωση είναι μέσα σε ανεκτά επίπεδα.



Εικόνα 11: Σκίαστρα σε κλειστή θέση.
21/12 στις 10:00. Μέγιστη τιμή DGI: 28,1



Εικόνα 12: Σκίαστρα σε κλειστή θέση.
21/12 στις 10:00. Μέγιστη τιμή DGI: 20,99

Περίπτωση 5: 21 Δεκεμβρίου στις 10:00, με τα σκίαστρα σε κλειστή θέση (εικόνα 13).

Θέση θέασης: θεατής στις κερκίδες

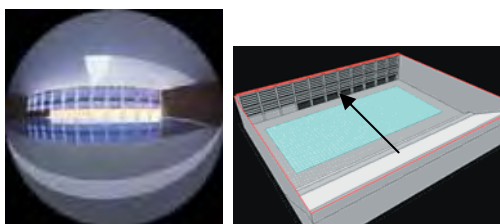
Ο δείκτης θάμβωσης (DGI) για τη συγκεκριμένη θέση θέασης είναι μηδενικός. Άρα, όταν τα σκίαστρα είναι κλειστά δεν υπάρχει κίνδυνος θάμβωσης για τους θεατές στις κερκίδες.

Περίπτωση 6: 21 Δεκεμβρίου στις 10:00, με τα σκίαστρα σε κλειστή θέση (εικόνα 14).

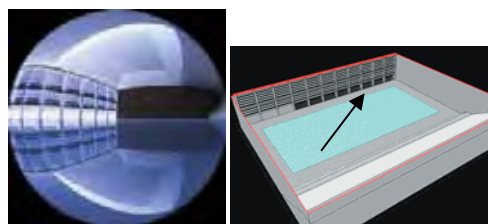
Θέση θέασης: κολυμβητής που κοιτάει προς τα υαλοστάσια

Χρήση ημιδιαφανών υαλοστασίων στην κάτω ζώνη, με φωτο-διαπερατότητα 30%².

Παρατηρείται μεγάλη βελτίωση της οπτικής άνεσης σε σχέση με την περίπτωση 3, αφού λόγω της ημιδιαφάνειας των υαλοστασίων είναι μειωμένη η λαμπρότητά τους, με συνέπεια να ελαττωθεί ο δείκτης θάμβωσης και να κυμαίνεται σε ανεκτά επίπεδα.



Εικόνα 13: Σκίαστρα σε κλειστή θέση.
21/12 στις 10:00. Μέγιστη τιμή DGI: 0

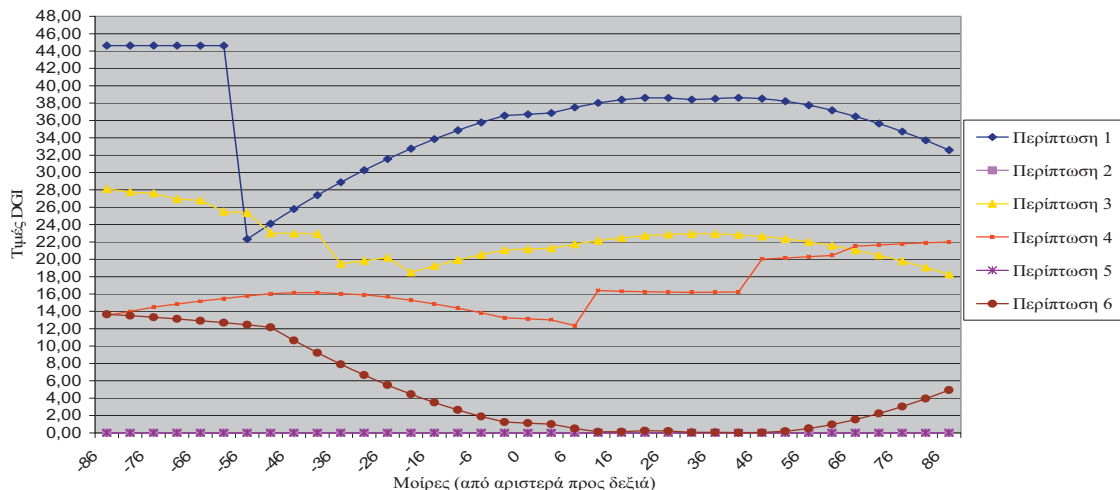


Εικόνα 14: Σκίαστρα σε κλειστή θέση.
21/12 στις 10:00. Μέγιστη τιμή DGI: 13,6

² Μελετήθηκαν και άλλες τιμές φωτο-διαπερατότητας (20%- 40%). Η τιμή 30% είναι η ψηλότερη που δεν προκαλεί θάμβωση. Μικρότερες τιμές μειώνουν υπερβολικά τα επίπεδα φυσικού φωτισμού.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως το χρώμα των σκιάστων που καλύπτουν τα ανώτερα τμήματα του υαλοστασίου θα πρέπει να είναι μεσαίας φωτεινότητας και κατοπτρικότητας, ώστε να μην αποτελούν πηγή θάμβωσης για τους χρήστες του χώρου. Για τα συγκεκριμένα σκίαστρα προτείνονται τιμές: ανακλαστικότητα 60% και κατοπτρικότητα 20%.

Στην εικόνα 15 παρουσιάζεται η διαβάθμιση των τιμών του Δείκτη Θάμβωσης (DGI) για κάθε μία από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.



Εικόνα 15: Διαβάθμιση τιμών Δείκτη Θάμβωσης (DGI) για τις Περιπτώσεις 1 – 6, στο συνολικό πεδίο όρασης -86° - $+86^{\circ}$ (κοιτώντας από αριστερά προς δεξιά).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με τη μελέτη αυτή εξετάστηκε ο σκιασμός, ο φυσικός φωτισμός και η οπτική άνεση στον κύριο χώρο της μεγάλης κολυμβητικής δεξαμενής στο υπό μελέτη κολυμβητήριο Αμπελοκήπων Θεσσαλονίκης. Για την αποφυγή της εισόδου της ηλιακής ακτινοβολίας στο χώρο, στο χρονικό διάστημα που δεν είναι επιθυμητή, είναι απαραίτητη η ύπαρξη του συστήματος σκίασης που αναλύθηκε και το οποίο αποτελείται από κινητά σκίαστρα στις δύο ανώτερες ζώνες των υαλοστασίων και σταθερές περσίδες υπό μορφή προβόλου στην κατώτερη ζώνη. Η κατάλληλη χρήση του συστήματος αυτού, σύμφωνα με το ετήσιο διάγραμμα βέλτιστης λειτουργίας που προτείνεται, θα συμβάλει στην πλήρη κάλυψη των αναγκών σε σκίαση. Η μελέτη φυσικού φωτισμού απέδειξε ότι το ηλιοπροστατευτικό σύστημα δεν μειώνει τα επίπεδα φυσικού φωτισμού κάτω από τα επιτρεπτά όρια. Επιπλέον, η τοποθέτηση ημιδιαφανών υαλοστασίων στην κατώτερη ζώνη της όψης θα προστατεύσει από τη θάμβωση κατά τις περιπτώσεις που η κολυμβητική δεξαμενή θα χρησιμοποιείται τις πρωινές ώρες της ημέρας.

Πιστεύεται πως η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε μπορεί να αποτελέσει υπόδειγμα για την ολοκληρωμένη μελέτη σκιασμού, φυσικού φωτισμού και θάμβωσης σε κτίρια με μεγάλες επιφάνειες υαλοστασίων και γενικότερα με ιδιαίτερες απαιτήσεις σε οπτική άνεση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. AUTODESK® ECOTECT™ v5.5 <http://ecotect.com/products/ecotect>
2. RADIANCE software <http://radsite.lbl.gov/radiance/HOME.html>
3. Energy and Resources Institute, Institut Catalá d'Energia, Asia Urbs Programme, "Sustainable Building Design Manual", Volume II, TERI Press, 2004, pp. 79
4. Baker N., Fanchiotti A., Steemers K. (eds), "Daylighting in Architecture – A European Reference Book", Commission of the European Communities Directorate - General XII for Science Research and Development, James & James Ltd, Brussels, 1993, pp. 2.15
5. ο.π., 2.17, 2.18

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ EN ISO 13790:2008 ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΓΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.

Κ. Λάσκος, Κ. Αξαρλή

Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτιρίων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Αριστοτέλειο
Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, e-mail:klaskos@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να υλοποιήσει το EN ISO 13790:2008 “Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling” με χρήση τριών διαφορετικών προγραμμάτων δυναμικής προσομοίωσης (TRNSYS 16, EnergyPlus 2.2 και SUNREL1.14), να συγκρίνει τις τυχόν διαφορές που προκύπτουν και να διακρίνει ενδεχόμενες δυσκολίες που θα έχει η χρήση καθενός από αυτά. Γι’ αυτό το σκοπό μοντελοποιήθηκε ένα μονώροφο συμβατικό κτίριο για πρότυπες συνθήκες λειτουργίας και υπολογίσθηκε η ενεργειακή του ζήτηση για θέρμανση και ψύξη. Παράλληλα υπολογίσθηκαν οι συνιστώσες του ενεργειακού του ισοζυγίου και έγιναν οι κατάλληλες συγκρίσεις και ερμηνείες των αποτελεσμάτων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο τομέας της κατοικίας και ο τριτογενής τομέας, το μεγαλύτερο μέρος των οποίων είναι κτίρια, αντιπροσωπεύει περισσότερο από το 40 % της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στην Κοινότητα και αναπτύσσεται, τάση που πρόκειται να αυξήσει την ενεργειακή του κατανάλωση και, κατά συνέπεια, τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Το γεγονός αυτό και σε συνδυασμό με τις παρατηρήσεις ότι:

- η συνετή και ορθολογική χρησιμοποίηση των φυσικών πόρων αναφέρεται στη συνθήκη για την ίδρυση της Ευρωπαϊκής Κοινότητας
- η αυξημένη ενεργειακή απόδοση αποτελεί σημαντικό μέρος της δέσμης των πολιτικών και των μέτρων που απαιτούνται για τη συμμόρφωση με το πρωτόκολλο του Κιότο
- η διαχείριση της ενεργειακής ζήτησης είναι σημαντικό εργαλείο που επιτρέπει στην Κοινότητα να επηρεάζει την παγκόσμια αγορά ενέργειας και ως εκ τούτου την μεσομακροπρόθεσμη ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού,

οδηγεί το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης να εκδώσει το Δεκέμβριο του 2002 τη Κοινοτική Οδηγία 2002/91/EK «Για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων» [1].

Για την υλοποίηση της Οδηγίας, το Ευρωπαϊκό Κέντρο Τυποποίησης (CEN) ανέλαβε να συντάξει μία σειρά 28 περίπου τεχνικών προτύπων. Κεντρικό πρότυπο σε αυτήν την ομάδα είναι το EN ISO 13790 [2] στο οποίο αναπτύσσονται τρεις εναλλακτικές μεθοδολογίες υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη των κτιρίων: μία μηνιαία ή εποχιακή ημι-στατική, μία απλοποιημένη ωριαία δυναμική, και προγράμματα δυναμικής προσομοίωσης. Όσον αφορά στις δυναμικές μεθόδους προσομοίωσης, το πρότυπο καθορίζει τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου (input data) και τις συνοριακές συνθήκες που πρέπει να

χρησιμοποιηθούν ούτως ώστε να εξασφαλίζεται συμβατότητα και συνέπεια μεταξύ της εφαρμογής και των αποτελεσμάτων και των τριών μεθόδων.

Βασικό χαρακτηριστικό της διαδικασίας υπολογισμού είναι μερική αποσύζευξη κτιριακού κελύφους και συστήματος θέρμανσης-ψύξης-αερισμού. Αρχικά απαιτείται ο υπολογισμός της ενεργειακής ζήτησης του κτιριακού κελύφους κάνοντας θεώρηση ενός ιδανικού H/M συστήματος (επαρκής δυναμικότητα, άμεση απόκριση, έλλειψη υστέρησης). Με βάση την ενεργειακή ζήτηση και με τη χρήση προτύπων σχετικών με την απόδοση των H/M εγκαταστάσεων[3],[4],[5], προκύπτει η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη.

Σημαντική αλλαγή που εισάγεται στη γενικότερη φιλοσοφία των υπολογισμών είναι η απαίτηση, ανεξαρτήτως μεθοδολογίας, χρήσης, ως θερμοκρασία ελέγχου του συστήματος θέρμανσης-ψύξης, της λειτουργικής θερμοκρασίας (operative) και όχι της θερμοκρασίας αέρα, θεωρώντας ότι είναι αντιπροσωπευτικότερη θερμοκρασία για την θερμική άνεση [7]. Ως λειτουργική θερμοκρασία ορίζεται ο αριθμητικός μέσος όρος της θερμοκρασίας αέρα και της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας της υπό μελέτη θερμικής ζώνης [2].

Τέλος, σύμφωνα με το πρότυπο, για τον υπολογισμό της μετάδοσης θερμότητας με αγωγή από το κέλυφος του κτιρίου απαιτείται να ληφθεί υπ' όψη η δυσδιάστατη φύση του φαινομένου. Γενικά, φαινόμενα τρισδιάστατης ροής θερμότητας μπορούν να αγνοηθούν [8]. Όταν οι υπολογισμοί στηρίζονται στην παραδοχή μονοδιάστατης ροής θερμότητας από τα δομικά στοιχεία, επιβάλλεται κατάλληλη διόρθωση με τη χρήση της γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ και του αντίστοιχου μήκους θερμογέφυρας που προκύπτει από την θεώρηση μονοδιάστατης αντί δυσδιάστατης ροής. Οι τιμές γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ υπολογίζονται σύμφωνα με το [9] ή εναλλακτικά λαμβάνονται απλοποιητικά από το [8].

2. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Τα προγράμματα δυναμικής προσομοίωσης είναι ένα σημαντικό εργαλείο για τον έλεγχο εναλλακτικών σχεδιασμών του κτιριακού κελύφους και του συστήματος θέρμανσης-ψύξης-αερισμού. Πλέον αναγνωρίζονται επίσημα και κατάλληλα για να χρησιμοποιηθούν από τους εθνικούς κανονισμούς που θα προκύψουν για τα διάφορα κράτη μέλη της Ε.Ε. στα πλαίσια συμμόρφωσης τους με την Κοινοτική Οδηγία 2002/91/ΕΚ. Στην παρούσα εργασία επιλεχθήκαν να χρησιμοποιηθούν τρία προγράμματα προσομοίωσης: το SUNREL 1.14 [10], το TRNSYS 16 [11] και το EnergyPlus 2.2. [12], τα οποία έχουν ελεγχθεί με επιτυχία με το BESTEST [13] και είναι διεθνώς αναγνωρισμένα.

Το SUNREL είναι ένα πρόγραμμα ωριαίας προσομοίωσης ενεργειακής συμπεριφοράς κτιρίων με κύριο στόχο το σχεδιασμό μικρών κτισμάτων. Αποτελεί εξέλιξη του SERI-RES καθώς και κλώνο του Suncode-PC. Αναπτύσσεται από το NREL. Στην τελευταία του έκδοση έχει ένα λιτό γραφικό περιβάλλον εισαγωγής δεδομένων. Είναι εμπορικό πρόγραμμα.

Είναι ένα περιγραφικό πρόγραμμα προσομοίωσης υπό την έννοια ότι ο χρήστης εισάγει τις θερμικές ζώνες και τις επιφάνειες των δομικών στοιχείων περιγράφοντας τα χαρακτηριστικά τους και δίνοντας τους συσχετισμούς τους. Για τους υπολογισμούς των θερμικών ροών γίνεται θεώρηση ενός ιδανικού συστήματος θέρμανσης-ψύξης-αερισμού χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης πραγματικών H/M εγκαταστάσεων. Χρησιμοποιεί ένα κεντρικό κόμβο ανά θερμική ζώνη, του οποίου η θερμοκρασία πλησιάζει αυτή της μέσης ακτινοβολούμενης, με τον οποίο συνδέονται οι εσωτερικές επιφάνειες μέσω ενός σταθερού συνδυασμένου συντελεστή συναγωγής και ακτινοβολίας. Ο υπολογισμός των ροών θερμότητας με αγωγή μέσω των δομικών στοιχείων του κτιρίου γίνεται με θεώρηση μονοδιάστατης ροής με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών. Οι εξωτερικές επιφάνειες

συνδέονται και αυτές μέσω ενός σταθερού συνδυασμένου συντελεστή συναγωγής και ακτινοβολίας με τον κόμβο του εξωτερικού αέρα. Για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο γίνεται παραδοχή ισοτροπικού ουρανού.

Το TRNSYS είναι ένα πλήρες και επεκτάσιμο περιβάλλον προσομοίωσης για δυναμικά ενεργειακά συστήματα συμπεριλαμβανομένων και πολυζωνικών κτιρίων. Ο χρήστης εισάγει, ρυθμίζει και συνδέει αρθρώματα που αντιπροσωπεύουν φυσικά τμήματα του γενικότερου υπό μελέτη συστήματος των οποίων τη λειτουργία προσομοιώνει στη συνέχεια ο κύριος πυρήνας του προγράμματος. Αναπτύσσεται κυρίως από πανεπιστήμιο Wisconsin, το CSTB και τη Transsolar, αν και λόγω της φύσης του τμήματα του αναπτύσσονται από διάφορα πανεπιστήμια, εταιρίες και ιδιώτες. Είναι εμπορικό πρόγραμμα με έντονα σημάδια ερευνητικού χαρακτήρα.

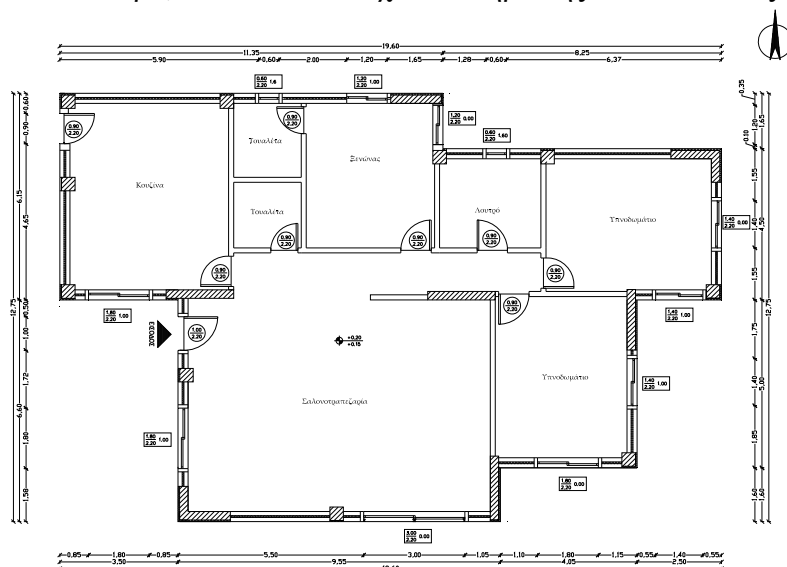
Το άρθρωμα που αντιπροσωπεύει το κτιριακό κέλυφος είναι αρκετά σύνθετο και η διαχείριση του γίνεται μέσω ξεχωριστού υποπρογράμματος του TRBuild. Η εισαγωγή του κελύφους γίνεται περιγραφικά και περιλαμβάνει ένα ιδανικό σύστημα θέρμανσης-ψύξης-αερισμού ο έλεγχος του οποίου μπορεί να γίνει μόνο μέσω της θερμοκρασίας αέρα της ζώνης. Η μοντελοποίηση οποιουδήποτε άλλου συστήματος γίνεται εντός του TRNSYS με σύνθεση διαφορετικών αρθρωμάτων. Για τον υπολογισμό των ανταλλαγών ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος μεταξύ των εσωτερικών επιφανειών της θερμικής ζώνης γίνεται θεώρηση ενός ιδεατού κόμβου (star network) ο οποίος συνδέεται με τις εσωτερικές επιφάνειες και τον κόμβο αέρα. Οι συντελεστές συναγωγής των εσωτερικών επιφανειών εισάγονται ως σταθερές τιμές ή υπολογίζονται από το πρόγραμμα ανά χρονικό βήμα αν και το δεύτερο προτείνεται μόνο εφόσον τα εν λόγω δομικά στοιχεία είναι θερμαινόμενα ή ψυχόμενα. Για τις εξωτερικές επιφάνειες οι συντελεστές συναγωγής λαμβάνονται ως σταθερές τιμές. Αντίθετα οι συντελεστές ακτινοβολίας υπολογίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα. Ο υπολογισμός των ροών θερμότητας μέσω των δομικών στοιχείων γίνεται με την μέθοδο συνάρτησης μεταφοράς (transfer function) με θεώρηση μονοδιάστατης ροής. Για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο είναι δυνατή η επιλογή ανάμεσα σε τέσσερα διαφορετικά μοντέλα. Αν όμως γίνει χρήση αρθρώματος οριζόντιων ή κατακόρυφων προεξοχών για το σκιασμό ανοιγμάτων, η ακτινοβολία επαναυπολογίζεται με την παραδοχή ισοτροπικού ουρανού.

Το EnergyPlus είναι από τα πλέον σύγχρονα προγράμματα δυναμικής ανάλυσης ενεργειακής συμπεριφοράς κτιρίων. Η ανάπτυξη του γίνεται απευθείας από το Υπουργείο Ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών, και η αναβάθμιση και ανανέωση του κώδικά του πραγματοποιείται σε σταθερή βάση ανά εξάμηνο. Η διάθεση του γίνεται δωρεάν.

Είναι το μόνο λογισμικό, από τα τρία που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη, που η εισαγωγή του κελύφους γίνεται γεωμετρικά. Κάθε δομικό στοιχείο εισάγεται με τις συντεταγμένες του είτε μέσω του προγράμματος AutoCAD, είτε μέσω του προγράμματος SketchUp. Το γεγονός αυτό αυξάνει την δυσκολία και τον χρόνο εισαγωγής δεδομένων σε σχέση με τα δυο προηγούμενα προγράμματα αλλά δίνει πολύ μεγαλύτερη ευελιξία στον τρόπο που αντιμετωπίζει το πρόγραμμα την μικρού και μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία. Οι συντελεστές συναγωγής υπολογίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα ανά χρονικό βήμα, αν και δίνεται προαιρετικά η δυνατότητα εισαγωγής σταθερών τιμών. Ο υπολογισμός των ροών θερμότητας μέσω των δομικών στοιχείων γίνεται με τη μέθοδο συνάρτησης μεταφοράς ή εναλλακτικά με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών με θεώρηση μονοδιάστατης ροής και για τις δύο μεθόδους. Ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο γίνεται μέσω του μοντέλου του Perez. Υποστηρίζεται η προσομοίωση μεγάλου αριθμού Η/Μ συστημάτων, καθώς και ενός ιδανικού συστήματος ο έλεγχος του οποίου γίνεται μέσω της θερμοκρασίας αέρα ή της λειτουργικής θερμοκρασίας.

3. ΚΤΙΡΙΟ - ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ - ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Το κτίριο που επιλέχθηκε να μοντελοποιηθεί είναι μία μονώροφη ισόγεια μονοκατοικία. Ο φέρων οργανισμός του είναι από οπλισμένου σκυρόδεμα με θερμομόνωση στην εξωτερική του πλευρά, ενώ τα στοιχεία πλήρωσης είναι διπλές δρομικές οπτοπλινθοδομές με



Εικόνα 1: Κάτοψη κτιρίου

θερμομόνωση στον πυρήνα. Όλες οι κατακόρυφες επιφάνειες είναι επιχρισμένες εκατέρωθεν. Οι τοιχοποιίες είναι ενισχυμένες με περίδεσμο ενίσχυσης, ο οποίος φέρει θερμομόνωση εξωτερικά. Στο ύψος της ποδιάς των παραθύρων και των υπερθύρων όλων των ανοιγμάτων κατασκευάζονται επίσης περίδεσμοι ενίσχυσης από ελαφρώς οπλισμένο σκυρόδεμα με εξωτερική θερμομόνωση. Η επικάλυψη του κτιρίου είναι με δώμα συμβατικού τύπου, και η πλάκα της οροφής είναι θερμομο-

νωμένη από την άνω παρειά της. Η πλάκα δαπέδου εδράζεται στο έδαφος και φέρει εσωτερικά θερμομόνωση. Η θερμομόνωση όλων των δομικών στοιχείων είναι εξηλασμένη πολυστερίνη 4εκ. εκτός από αυτήν της οροφής που είναι 6εκ. Τα κουφώματα είναι αλουμινίου και φέρουν διπλούς υαλοπίνακες 4χιλ. με διάκενο αέρα 12χιλ. Το κτίριο φέρει προστέγασμα σε όλη την περίμετρο στο ύψος της πλάκας της οροφής, πλάτους 80εκ.

Το σύστημα θέρμανση-ψύξης θεωρήθηκε λειτουργεί σύμφωνα με το πρόγραμμα που δίνεται στον πίνακα 1. Στον ίδιο πίνακα δίνονται και τα αισθητά εσωτερικά κέρδη τα οποία ελήφθησαν υπ' όψη για τους ενεργειακούς υπολογισμούς [2]. Σημειώνεται ότι για κτίρια κατοικίας δεν υπάρχει υποχρέωση να συμπεριληφθούν κέρδη από τη χρήση του τεχνητού φωτισμού [14]. Το κτίριο θεωρήθηκε ότι έχει σταθερή διήθηση αέρα σε όλη τη διάρκεια του έτους, ίση με 0,6 εναλλαγές αέρα την ώρα [15]. Φυσικός αερισμός κατά τη διάρκεια της χειμερινής και της θερινής περιόδου δεν λήφθηκε υπ' όψη.

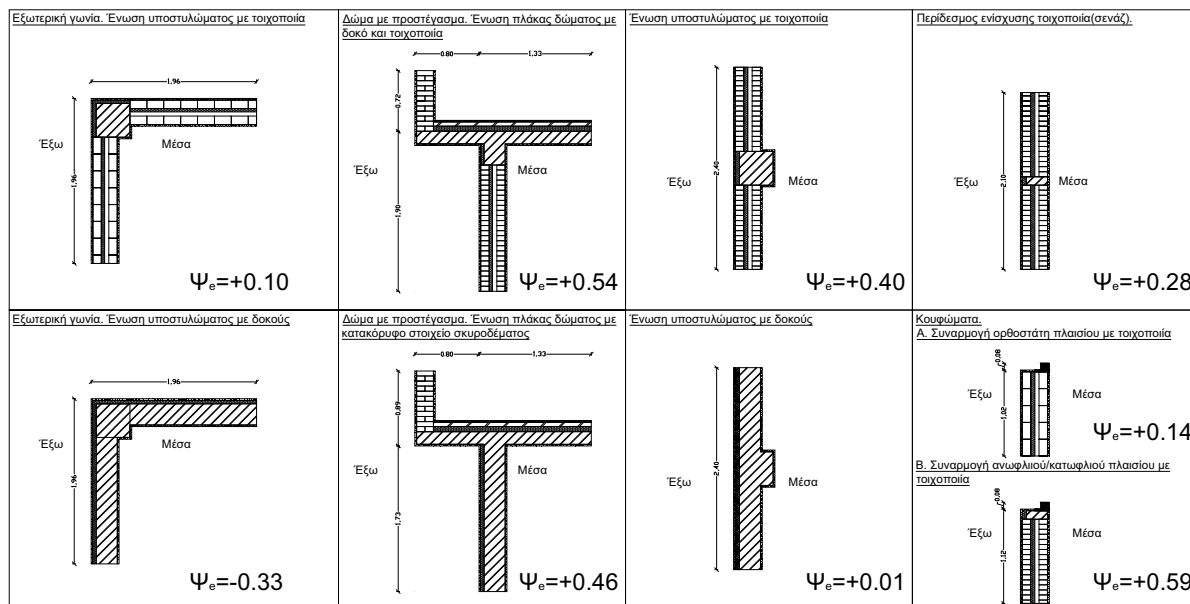
Πίνακας 1: Θερμοκρασίες θερμοστάτη και εσωτερικά κέρδη				
		Επιθυμητές θερμοκρασίες		Εσωτερικά κέρδη (W)
		θέρμανση (°C)	ψύξη (°C)	
Καθημερινές	07:00-17:00	16	-	820
	17:00-23:00	20	26	1900
	23:00-07:00	16	-	780
Σαββατοκύριακο	07:00-17:00	20	26	920
	17:00-23:00	20	26	2200
	23:00-07:00	16	-	780

Ελλείπει αντιπροσωπευτικών κλιματικών ετών (TRY, TMY, κτλ) για την Ελλάδα, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα βάσης δεδομένων Meteororm [16]. Με τη χρήση του συγκεκριμένου λογισμικού έγινε παραγωγή κλιματικού αρχείου για την Θεσσαλονίκη, το οποίο μεταξύ των άλλων περιλαμβάνει ωριαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα, και ολικής, άμεσης και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο. Το αρχείο δημιουργήθηκε στη μορφή TMY2 η οποία είναι συμβατή και με τα τρία προγράμματα δυναμικής προσομοίωσης.

4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΤΙΡΙΟΥ

Το κτίριο θεωρήθηκε ότι αποτελείται από μία θερμική ζώνη αφού καλύπτει τις αντίστοιχες προϋποθέσεις που δίνονται στο EN ISO 13790. Ο υπολογισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κτιρίου έγινε με βάση τις εξωτερικές διαστάσεις, ενώ ο υπολογισμός του όγκου αέρα της θερμικής ζώνης με βάση τις εσωτερικές διαστάσεις. Οι φυσικές ιδιότητες όλων των δομικών υλικών ελήφθησαν από το [17], εκτός από αυτές της οπτοπλινθοδομής οι οποίες δεν καλύπτονται από το συγκεκριμένο πρότυπο και ελήφθησαν από τον ισχύοντα Ελληνικό Κανονισμό Θερμομόνωσης.

Επειδή και τα τρία προγράμματα δυναμικής προσομοίωσης εκτελούν τους υπολογισμούς μετάδοσης θερμότητας με αγωγή μέσω των δομικών στοιχείων κάνοντας παραδοχή μονοδιάστατης ροής, κρίθηκε απαραίτητο να συμπεριληφθούν οι θερμογέφυρες που προκύπτουν από αυτή τη θεώρηση. Ο υπολογισμός των τιμών γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ για όλα τα σημεία δημιουργίας θερμογεφυρών για το συγκεκριμένο κτίριο έγινε σύμφωνα με το [7] και με τη βοήθεια του προγράμματος ανάλυσης δυσδιάστατης ροής θερμότητας THERM 5 [18]. Συνολικά εντοπίστηκαν και υπολογίστηκαν 15 διαφορετικοί τύποι θερμογεφυρών. Στην εικόνα 2 δίνονται ενδεικτικά 9 από αυτές.



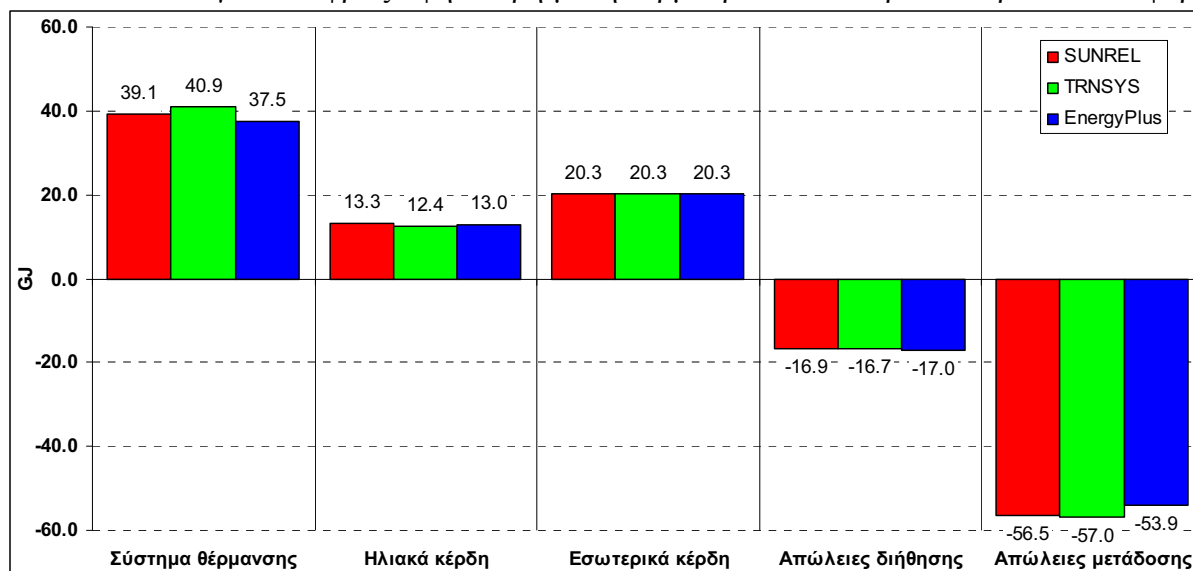
Εικόνα 2: Θερμογέφυρες

Για τον υπολογισμό των θερμικών ροών από και προς το έδαφος έγινε χρήση του υποπρογράμματος που συνοδεύει το EnergyPlus. Το συγκεκριμένο λογισμικό εκτελεί τρισδιάστατη προσομοίωση των θερμικών ροών ανάμεσα στο έδαφος και την πλάκα σε έδαφος και υπολογίζει τις θερμοκρασίες στην διεπαφή τους [19]. Οι θερμοκρασίες που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν ως συνοριακές συνθήκες του δαπέδου στην εξωτερική πλευρά του και για τα τρία προγράμματα.

Γενικά, και στα τρία προγράμματα δυναμικής προσομοίωσης αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθούν οι προτεινόμενες από τους δημιουργούς τους ρυθμίσεις όταν αυτές δεν έρχονταν σε αντίθεση με τους περιορισμούς που θέτει το EN ISO 13790.

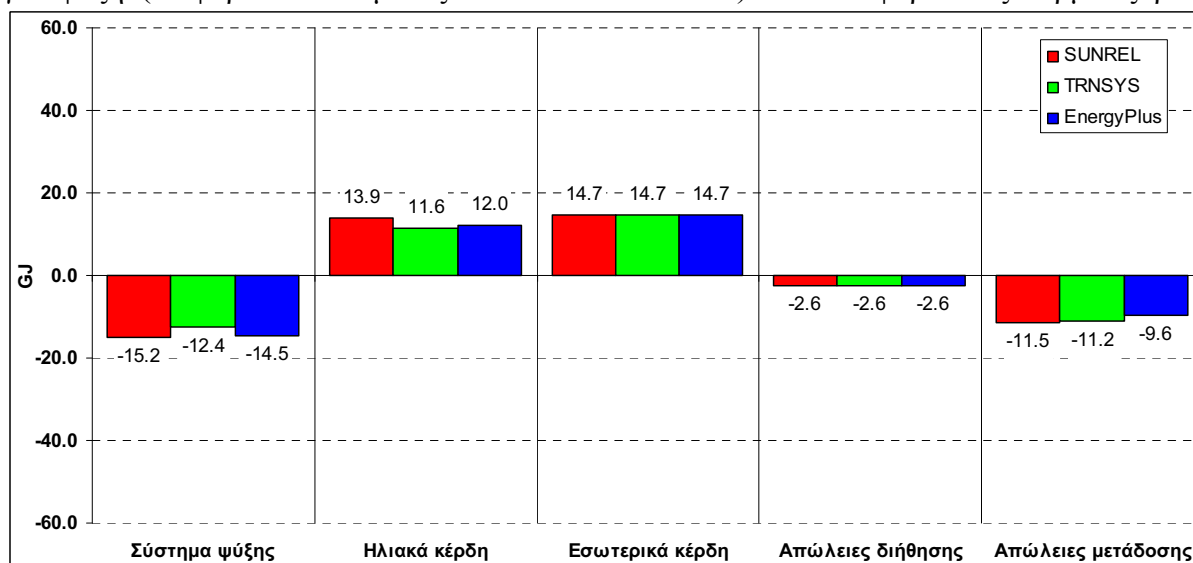
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Όπως φαίνεται και στις εικόνες 3 και 4 τα αποτελέσματα των θερμικών προσομοιώσεων από τα τρία διαφορετικά προγράμματα που αποτυπώνουν τις θερμικές ροές, βρίσκονται σε συμφωνία μεταξύ τους. Όπως ήταν αναμενόμενο οι θερμικές ροές από τα εσωτερικά κέρδη ταυτίζονται. Οι απώλειες λόγω διήθησης αέρα δείχνουν ότι κατά την θερμαντική περίοδο το TRNSYS υπολόγισε ελαφρώς υψηλότερη μέση θερμοκρασία εσωτερικού αέρα. Όσον αφορά

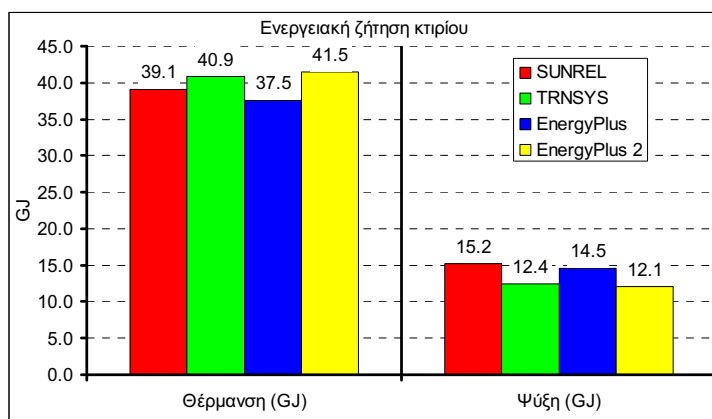


Εικόνα 3: Ενεργειακό ισοζύγιο κτιρίου για τη θερμαντική περίοδο

τα ηλιακά κέρδη προκύπτει ότι, λόγω των διαφορετικών μοντέλων υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο, του σκιασμού από τα εξωτερικά στοιχεία και της διαπερατότητας των υαλοπινάκων υπάρχει μια διαφοροποίηση η οποία γίνεται πιο έντονη για το SUNREL κατά την διάρκεια της ψυκτικής περιόδου (διαφορά 16.6% μεταξύ SUNREL-TRNSYS). Η συγκεκριμένη διαφοροποίηση αντικατοπτρίζεται και στην ενεργειακή ζήτηση για ψύξη (διαφορά 18.0% μεταξύ SUNREL-TRNSYS). Όσον αφορά στις θερμικές ροές



Εικόνα 4: Ενεργειακό ισοζύγιο κτιρίου για τη ψυκτική περίοδο



Εικόνα 5: Ενεργειακή ζήτηση κτιρίου

άμεση αύξηση της ενεργειακής ζήτησης για ψύξη (14,5%). Για την διερεύνηση της παραπάνω διαφοροποίησης έγινε μία ακόμη προσομοίωση του κτιρίου με το EnergyPlus εισάγοντας αυτή τη φορά σταθερούς συντελεστές συναγωγής. Όπως προκύπτει και από την εικόνα 5 (EnergyPlus2) σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα ανάμεσα στο TRNSYS και το EnergyPlus διαφέρουν μόλις κατά 1,5% για θέρμανση και 2,8% για ψύξη, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι ο τρόπος υπολογισμού των συντελεστών συναγωγής επηρεάζει σημαντικά τους υπολογισμούς.

μετάδοσης με αγωγή προκύπτει ότι το EnergyPlus υπολόγισε χαμηλότερες τιμές απωλειών από τα δομικά στοιχεία του κτιρίου σε σχέση με τα άλλα δύο προγράμματα κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου (διαφορά 5.8% μεταξύ EnergyPlus-TRNSYS) με άμεσο αποτέλεσμα την μειωμένη ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση (9,1%), αλλά και κατά τη διάρκεια θερινής περιόδου (διαφορά 16.6% μεταξύ EnergyPlus - TRNSYS) με

6. ΣΧΟΛΙΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη μοντελοποίηση του συγκεκριμένου κτιρίου, από ανάλογες προσομοιώσεις, από την θεωρητική διερεύνηση των λογισμικών και από τη γενικότερη εμπειρία τους, οι συγγραφείς θα ήθελαν να παρατηρήσουν τα εξής:

Το SUNREL αν και με τις λιγότερες δυνατότητες προσομοίωσης φυσικών συστημάτων και λειτουργιών σε σχέση με τα άλλα δυο προγράμματα, φαίνεται να καλύπτει στο σύνολο τις απαιτήσεις και περιορισμούς που θέτει το EN ISO 13790. Η θερμοκρασία κόμβου ζώνης που χρησιμοποιείται βρίσκεται πολύ κοντά στη λειτουργική θερμοκρασία. Λόγω της περιγραφικής του φύσης, απαιτεί αντίληψη της θερμικής λειτουργίας του κτιρίου. Για απλές γεωμετρίες και λίγα εξωτερικά εμπόδια, η μοντελοποίηση του κτιρίου μπορεί να γίνει πολύ γρήγορα όπως επίσης και η επίλυση του μοντέλου. Η χρήση του προτείνεται για την θερμική ανάλυση μικρών κτιρίων αλλά και μεγάλων και σύνθετων σε φάση προμελέτης ή όταν απαιτούνται γρήγορα αποτελέσματα.

Το TRNSYS όπως αναφέρθηκε ήδη είναι περιβάλλον προσομοίωσης για δυναμικά ενεργειακά συστήματα που υποστηρίζει και κτιριακά κελύφη έχοντας έντονο ερευνητικό χαρακτήρα. Αυτό σημαίνει ότι έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει σχεδόν κάθε λειτουργία φυσικού συστήματος. Αυτό όμως γίνεται σε βάρος της ευχρηστίας και της ευκολίας εισαγωγής δεδομένων. Καλύπτει όλες τις απαιτήσεις και περιορισμούς που θέτει το EN ISO 13790. Για απλές γεωμετρίες και λίγα εξωτερικά εμπόδια, η μοντελοποίηση του κτιρίου μπορεί να γίνει γρήγορα και απλά, όχι όμως τόσο όπως με το SUNREL. Όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα των γεωμετρικών μορφών και ιδιαίτερα τα εξωτερικά εμπόδια που δημιουργούν σκιασμούς των ανοιγμάτων, η δυσκολία εισαγωγής δεδομένων λειτουργεί αποτρεπτικά για την χρήση του. Η απαίτηση χρήσης της λειτουργικής θερμοκρασίας αντί της θερμοκρασίας αέρα για τη λειτουργία του συστήματος Θ/Ψ οδηγεί στη μοντελοποίηση ενός ιδανικού συστήματος εκτός του αρθρώματος του κτιριακού κελύφους. Η αναγκαστική έλλειψη υστέρησης που πρέπει να παρουσιάζει το σύστημα αυτό και σε συνδυασμό με τη

μέθοδο επίλυσης που χρησιμοποιεί το TRNSYS, δημιουργεί την ανάγκη εφαρμογής πολύ μικρού χρονικού βήματος επίλυσης το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται πολύ μεγάλος χρόνος για την προσομοίωση. Η χρήση του συνιστάται για ερευνητικούς σκοπούς ή σε περιπτώσεις που ο χρήστης θέλει να έχει γνώση και δυνατότητα επέμβασης σε κάθε μεταβλητή που εισέρχεται στο σύστημα κάθε χρονική στιγμή.

Το EnergyPlus είναι το πιο σύγχρονο από τα τρία προγράμματα και έχει καθαρά κτιριακό προσανατολισμό. Η ευκολία με την οποία ο χρήστης εισάγει τα γεωμετρικά δεδομένα, αν και χρονοβόρα, αφού πρέπει να δημιουργηθεί το τρισδιάστατο μοντέλο του κτιρίου, μπορεί να τον παρασύρει μερικές φορές στη δημιουργία πολύ σύνθετων μοντέλων τα οποία χρειάζονται πολύ χρόνο για να επιλυθούν και είναι αρκετά δύσκολο να ελεγχθούν. Επίσης είναι το μόνο από τα τρία προγράμματα που έχει τη δυνατότητα να προσδιορίσει τις απαιτήσεις για τη χρήση τεχνητού φωτισμού και συνεπώς να συνυπολογίσει με ακρίβεια τα εσωτερικά φορτία που παράγονται από τον τεχνητό φωτισμό. Γενικά, το EnergyPlus καλύπτει όλες τις απαιτήσεις και περιορισμούς που θέτει το EN ISO 13790 για την επίλυση όλων των τύπων κτιρίων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. COM (2003), Κοινοτική Οδηγία 2002/91/EK Για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων
2. EN ISO 13790:2008 Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling
3. EN 15316-1:2007 Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 1: General
4. EN 15316-2-1:2007 Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 2-1: Space heating emission systems
5. EN 15316-4-1:2008 Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 4-1: Space heating generation systems, combustion systems (boilers)
6. EN 15243:2007 Ventilation for buildings - Calculation of room temperatures and of load and energy for buildings with room conditioning systems
7. EN 15251:2007 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics
8. EN ISO 14683:2007 Thermal bridges in building construction - Linear thermal transmittance - Simplified methods and default values
9. EN ISO 10211:2007 Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculation
10. Deru, M., R. Judkoff, P. Torcellini. (2002). SUNREL, Technical Reference Manual, NREL/BK-550-30193. Golden: NREL.
11. Klein, S.A. et al. (2000). TRNSYS: A Transient System Simulation Program. Madison, WI: SolarEnergy Laboratory, University of Wisconsin –Madison.
12. EnergyPlus (2008). U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies.
13. Judkoff, R., and J. Neymark. (1995). International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method. National Renewable Energy Laboratory.
14. EN 15193:2007 Energy performance of buildings - Energy requirements for lighting.
15. EN ISO 13789:2007 Thermal performance of buildings - Transmission and ventilation heat transfer coefficients - Calculation method.
16. Remund, J. and S. Kunz, (2003): METEONORM Version 5.0. Software and Handbook on CD-ROM. Meteotest.

17. EN ISO 10456:2007 Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values.
18. Finlayson, E.U. et. al., (1998) THERM 2.0: Program Description: A PC Program for Analyzing Two- Dimensional Heat Transfer Through Building Products, Lawrence Berkeley National Laboratory.
19. Clements, Edward (2004). Three Dimensional Foundation Heat Transfer Modules for Whole-Building Energy Analysis, MS Thesis, Pennsylvania State University.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΒΑΘΜΟΗΜΕΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Αχιλλέας Γ. Κωστούλας¹, Άγγελος Δ. Τζαχάνης², Κωνσταντίνος Ι. Μενάγιας³

¹ Μηχανολόγος Μηχανικός (Τ.Ε.) MSc, e-mail: k.axilleas@gmail.com

² Μηχανολόγος Μηχανικός, καθηγητής ΤΕΙ Λάρισας, Τμήμα Μηχανολογίας,
e-mail: tzach@teilar.gr

³ Μηχανολόγος Μηχανικός (Τ.Ε.) , e-mail: k.menagias@aerioattikis.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή γίνεται μια προσπάθεια εκτίμησης της κατανάλωσης ενέργειας ενός κτιρίου στην περιοχή της Λάρισας κατά την διάρκεια της θερμαντικής περιόδου. Η εκτίμηση γίνεται με την βοήθεια της μεθόδου των βαθμοημερών θέρμανσης (HDD), την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο διεθνώς. Ο υπολογισμός των βαθμοημερών (και κατ' επέκταση της ενεργειακής κατανάλωσης) γίνεται με δύο διαφορετικές μεθόδους. Τα προβλεπόμενα μεγέθη κατανάλωσης ενέργειας, συγκρίνονται με πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την ενεργειακή επιθεώρηση ενός κτιρίου στην περιοχή της Λάρισας. Από την σύγκριση προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για την δυνατότητα εκτίμησης ενεργειακών μεγεθών. Τέλος επιχειρείται μια εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας κτιρίων με τα ίδια δομικά χαρακτηριστικά με αυτό της Λάρισας, σε άλλες πόλεις της Θεσσαλίας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες κατά την διάρκεια σχεδιασμού ενός κτιρίου θα πρέπει να είναι η μελέτη της ενεργειακής του συμπεριφοράς. Ο κτιριακός τομέας στην Ελλάδα (οικιακός και τριτογενής) καταναλώνει το 39% περίπου της ενέργειας της χώρας και ευθύνεται για το 40% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα [1]. Ακόμα πιο ενδεικτικά της κατάστασης είναι τα δεδομένα για τον οικιακό μόνο τομέα όπου το 70% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης τους καλύπτει τις ανάγκες θέρμανσής τους. Αν και στην Ελλάδα από το 1998, με Κοινή Υπουργική Απόφαση προβλέπεται η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων κυρίως μέσω της σύνταξης του Κανονισμού Ορθολογικής Χρήσης και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΟΧΕΕ), μέχρι σήμερα ο εν λόγω κανονισμός δεν έχει δυστυχώς τεθεί σε εφαρμογή. Στην εργασία αυτή γίνεται μια προσπάθεια εκτίμησης της κατανάλωσης καύσιμου μιας κατοικίας στην περιοχή της Λάρισας κατά την διάρκεια της θερμαντικής περιόδου. Η εκτίμηση γίνεται με την βοήθεια της μεθόδου των βαθμοημερών (Degree Days Concept) [2], την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο διεθνώς. Όπως είναι γνωστό, για τον υπολογισμό των βαθμοημερών απαιτούνται αναλυτικά και ενημερωμένα θερμοκρασιακά δεδομένα της περιοχής, γεγονός που τις περισσότερες φορές καθιστά δύσκολο τον υπολογισμό τους, με αποτέλεσμα οι μελετητές να καταφεύγουν σε πινακοποιημένα δεδομένα [3]. Δεδομένα που στην πλειονότητά τους προέρχονται από την επεξεργασία θερμοκρασιακών τιμών παλαιότερων δεκαετιών. Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής ο υπολογισμός των βαθμοημερών γίνεται με την βοήθεια μεθόδου υπολογισμού μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών. Τα εκτιμώμενα δεδομένα της ενεργειακής κατανάλωσης, συγκρίνονται με τα πραγματικά μεγέθη ενός κτιρίου στην περιοχή της Λάρισας.[4] Από την σύγκριση προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για την δυνατότητα εκτίμησης ενεργειακών μεγεθών. Τέλος επιχειρείται μια εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση κτιρίων, με τα ίδια δομικά χαρακτηριστικά με αυτό της Λάρισας, σε άλλες πόλεις της Θεσσαλίας.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Στην διάρκεια μιας θερμαντικής περιόδου πραγματοποιήθηκε ενεργειακή επιθεώρηση σε πολυώροφη οικοδομή στο κέντρο της Λάρισας. Το κτίριο αποτελείται από 8 ανεξάρτητες κατοικίες όπου έχουν εγκατασταθεί θερμιδομετρητές οι οποίοι καταγράφουν την κατανάλωση ενέργειας σε [kWh]. Ο συνολικός όγκος του κτιρίου ανέρχεται σε $V_{\text{tot}} = 3086,5 \text{ m}^3$, η επιφάνεια του κελύφους του κτιρίου είναι $A_{\text{tot}} = 976,9 \text{ m}^2$ και η συνολική επιφάνεια είναι ίση με 1102 m^2 . Το γινόμενο του ολικού συντελεστή μετάδοσης με την επιφάνεια του κελύφους υπολογίστηκε σε $(UA)_{\text{tot}} = 1,9 \text{ kW/}^\circ\text{K}$ συμπεριλαμβάνοντας και την εναλλαγή του αέρα των χώρου με ρυθμό 0,5 αλλαγές ανά ώρα [4].

Πίνακας 1 : Μετρούμενα και υπολογίσιμα μεγέθη για το κτίριο αναφοράς στην περιοχή της Λάρισας						
Μήνας	N	Δ	I	Φ	M	A
$t_{\text{am}}(^{\circ}\text{C})$	11.83	7.67	8.54	3.67	8.68	14.24
$t_{\text{bal}}(^{\circ}\text{C})$	17.04	16.98	17.13	17.01	16.90	16.87
Ώρες λειτουργίας συστήματος θέρμανσης (h)	133.8	189.7	202.3	241.6	198.2	98.3
Κατανάλωση καυσίμου (lt)	1455.3	2061	2199.8	2626.6	2154.7	1068.9
Μετρούμενη Κατανάλωση ενέργειας (kWh)	14443.7	20448.8	21833.0	26069.5	21385.0	10609.2

Με χρήση ενός αναλυτή καυσαερίων υπολογίστηκε επίσης ο βαθμός απόδοσης καύσης της εγκατάστασης θέρμανσης σε 87,4%. Επιπρόσθετα υπολογίστηκαν οι απώλειες διανομής του δικτύου και προέκυψε ο συνολικός βαθμός της εγκατάστασης θέρμανσης ($\eta = 71.6\%$), ο οποίος ανταποκρίνεται στην σχέση της προσαγωγής ωφέλιμης ενέργειας στα διαμερίσματα όπως καταγράφουν οι θερμιδομετρητές προς την συνολική κατανάλωση καυσίμου σύμφωνα με την παρακάτω σχέση

$$\eta_h = \frac{\text{Συνολική Καταναλισκόμενη Ενέργεια που κατέγραψαν οι θερμιδομετρητές}}{\text{Ώρες λειτουργίας του καυστήρα} \times \text{Ρυθμός κατανάλωσης πετρελαίου} \times \Delta\Theta_{\text{πετρελαίου}}}$$

Οι συνολικές ώρες λειτουργίας του καυστήρα προέκυψαν με την βοήθεια ενός ωρομετρητή. Ο υπολογισμός του ρυθμού κατανάλωσης καυσίμου ($9,1 \text{ kg/hr}$), έγινε μετρώντας την πίεση παροχής ελαφρού πετρελαίου στον καυστήρα ($11,5 \text{ Bar}$) και λαμβάνοντας υπ' όψιν την πυκνότητα του καυσίμου.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ

3.1 ΠΡΩΤΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΑΘΜΟΗΜΕΡΩΝ

Για την εκτίμηση των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου επιλέξαμε δύο μοντέλα βαθμοημερών που χρησιμοποιούνται ευρύτερα. Το πρώτο από τα δύο αυτά μοντέλα χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό των ημερησίων βαθμοημερών θέρμανσης (HDD) την παρακάτω σχέση [5,6]:

$$\text{HDD} = (1 \text{ day}) \sum_{\text{day}} (T_b - T_m)^+ , \quad (1\alpha)$$

όπου T_m είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος και T_b είναι η θερμοκρασία βάσης. Ως θερμοκρασία βάσης ορίζεται η τιμή εκείνη της εξωτερικής θερμοκρασίας για την

οποία δεν απαιτείται κατανάλωση ενέργειας για την θέρμανση ή την ψύξη του κτιρίου. Στην περίπτωση που $T_b < T_m$ τότε $HDD=0$. Το θετικό πρόσημο υποδεικνύει ότι μόνο τα θετικά αποτελέσματα λαμβάνονται υπόψη. Η «απαίτηση» αυτή της μεθόδου για γνώση των μέσων ημερήσιων τιμών της θερμοκρασίας την καθιστά δύσκολη στην εφαρμογή της. Θεωρώντας ότι η μέση μηνιαία θερμοκρασία έχει προκύψει από την επεξεργασία των μέσων ημερήσιων τιμών της, τότε η σχέση (1α) μπορεί να γραφεί και ως εξής [7, 8]:

$$HDD = N(T_b - T_{m,month})^+ , \quad (1\beta)$$

όπου N ο αριθμός των ημερών του μήνα και $T_{m,month}$ η μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση (1β) δεχόμενοι αφενός την επάρκειά της και αφετέρου το γεγονός ότι μόνο μέσες μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας είναι διαθέσιμες στο μεγαλύτερο ποσοστό των περιπτώσεων [9].

3.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΑΘΜΟΗΜΕΡΩΝ

Η δεύτερη επιλεγόμενη μέθοδος αποσκοπεί στην διόρθωση των χαμηλών ή /και υψηλών τιμών των βαθμοημερών όταν στους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Η μέθοδος αυτή δεν ερμηνεύει τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις εντός του μήνα. Για να αντισταθμιστεί το γεγονός αυτό, χρησιμοποιείται η μέθοδος υπολογισμού της τυπικής απόκλισης της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας (σ_y) και της μέσης ημερήσιας του μήνα (σ_m). Εν συνεχεία, μέσω της τυπικής απόκλισης της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας του μήνα υπολογίζεται η μέση ημερήσια διακύμανση του μήνα. Οι βαθμοημέρες του μήνα (DD_m) υπολογίζονται τότε από την παρακάτω εξίσωση [10, 11, 12, 13]:

$$DD_m = \sigma_m (D_m)^{1,5} \left[\frac{h}{2} + \left(\frac{\ln(e^{-\alpha h} + e^{\alpha h})}{2\alpha} \right) \right] , \quad (2)$$

όπου η παράμετρος h υπολογίζεται από τη σχέση:

$$h = \frac{T_b - T_a}{\sigma_m D_m^{1/2}} \quad (3)$$

Ακόμα ισχύει: $\alpha = 1,698 D_m^{1/2}$, $\sigma_m = 1.45 - 0.029 T_a + 0.0664 \sigma_y$ και T_a =μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος.

3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Υπάρχουν εφαρμογές οι οποίες απαιτούν την γνώση αναλυτικών θερμοκρασιακών δεδομένων (μέσες ημερήσιες ή και μέσες ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας). Στην εργασία αυτή ερευνάται η δυνατότητα χρησιμοποίησης μαθηματικών εκφράσεων προσδιορισμού των μέσων ημερήσιων τιμών της θερμοκρασίας, ώστε να καταστεί δυνατός ο αναλυτικός υπολογισμός των βαθμοημερών θέρμανσης. Από τις μεθόδους που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία για τον προσδιορισμό των ημερήσιων τιμών της θερμοκρασίας επιλέχθηκε εκείνη η οποία έχει μελετηθεί αναλυτικά για τον Ελλαδικό χώρο και στηρίζεται στην επεξεργασία θερμοκρασιακών μετρήσεων της Ε.Μ.Υ[13]. Η ανάλυση των δεδομένων αυτών έδειξε ότι οι ετήσιες μεταβολές των μέσων, ελαχίστων και μεγίστων θερμοκρασιών μπορούν να προσεγγιστούν με ικανοποιητική ακρίβεια με την βοήθεια της γενικής σχέσης :

$$T(D) = A + B \sin\left(\frac{360}{365} D - f\right), \quad (4)$$

όπου D είναι ο αριθμός της ημέρας του έτους (1-365), ενώ οι ποσότητες A (η μέση ετήσια θερμοκρασία σε °C), B (το πλάτος της ετήσιας θερμοκρασιακής διακύμανσης σε °C) και f (διαφορά φάσης σε μοίρες ή ημέρες), είναι χαρακτηριστικές και σταθερές για κάθε πόλη. Με την βοήθεια της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων υπολογίστηκαν οι σταθερές αυτές για διάφορες Ελληνικές πόλεις. Για την περιοχή της Θεσσαλίας οι σταθερές (A, B και f) έχουν υπολογιστεί για την Λάρισα, τα Τρίκαλα και το Βόλο [13], με αποτέλεσμα η χρήση της μεθόδου αυτής να είναι δυνατή μόνο για τις πόλεις αυτές. Οι τιμές των σταθερών δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 2: Τιμές των σταθερών για Ελληνικές πόλεις			
	Λάρισα (1950-1974)	Τρίκαλα (1963-1977)	Βόλος (1963-1974)
A	15.312	15.881	16.872
B	-10.272	-10.29	-8.696
F	-67.065	-69.518	-64.297

Με την βοήθεια της εξίσωσης (4) του πίνακα 2 υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας για τις εν λόγω πόλεις και στην συνέχεια μέσω των σχέσεων (1β), (2) και (3) οι μηνιαίες βαθμοημέρες θέρμανσής τους. Ακολουθήθηκε αυτή η διαδικασία αφενός για να ελεγχθεί η αξιοπιστία της άνω περιγραφόμενης μεθόδου προσδιορισμού αναλυτικών θερμοκρασιακών δεδομένων και αφετέρου διότι υπάρχουν περιοχές της χώρας για τις οποίες είτε δεν υπάρχουν θερμοκρασιακά δεδομένα είτε είναι ελλιπή. Γεγονός είναι επίσης ότι η πιο πάνω μέθοδος χρήζει τροποποίησης και ειδικότερα υπολογισμό των τριών σταθερών με σύγχρονες και αξιόπιστες μετρήσεις.

Για την περιοχή της Λάρισας όπου και βρίσκεται το κτίριο αναφοράς οι βαθμοημέρες θέρμανσης όπως αυτές υπολογίστηκαν με τις μεθόδους που αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους με βάση τους 20°C, χρησιμοποιώντας ως μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες αυτές που προέκυψαν από την σχέση (4) και τον πίνακα 2, και δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί

Πίνακας 3: βαθμοημέρες θέρμανσης με τις δύο μεθόδους (ΛΑΡΙΣΑ)							
Μήνας	N	Δ	I	Φ	M	A	Σύνολο
βαθμοημέρες θέρμανσης με την 1 ^η μέθοδο	255.71	394.2	457.56	395.44	343.2	187.69	2033,8
βαθμοημέρες θέρμανσης με την 2 ^η μέθοδο	258.46	395.14	458.12	395.88	344.67	193.3	2045,57

Θεωρώντας ότι το κτίριο αναφοράς βρίσκεται στις πόλεις των Τρικάλων και του Βόλου υπολογίστηκαν με τις ίδιες μεθόδους και με βάση τους 20°C οι βαθμοημέρες θέρμανσης τους οι οποίες δίνονται στον πίνακα 4.

Πίνακας 4: βαθμομέρες θέρμανσης με τις δύο μεθόδους (ΤΡΙΚΑΛΑ - ΒΟΛΟΣ)								
ΠΟΛΗ	Μήνας	N	Δ	I	Φ	M	A	Σύνολο
ΤΡΙΚΑΛΑ	βαθμομέρες θέρμανσης με την 1 ^η μέθοδο	250.87	385.04	441.85	375.21	315.23	157.73	1925.93
	βαθμομέρες θέρμανσης με την 2 ^η μέθοδο	253.77	386.06	442.49	375.74	317.12	165.56	1940.74
ΒΟΛΟΣ	βαθμομέρες θέρμανσης με την 1 ^η μέθοδο	179.64	299.52	359.36	315.35	274.27	145.92	1574.06
	βαθμομέρες θέρμανσης με την 2 ^η μέθοδο	184.83	301.28	360.37	316.11	276.53	153.60	1592.72

4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Για τον υπολογισμό της μηνιαίας κατανάλωσης ενέργειας θέρμανσης του κτιρίου χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (5) η οποία συσχετίζει αφενός μεν τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κτιριακού κελύφους $(UA)_{tot}$, αφετέρου δε τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης θέρμανσης (η_h) και τέλος τις θερμοκρασιακές συνθήκες της περιοχής οι οποίες εκφράζονται με τις βαθμομέρες θέρμανσης (DD_h):

$$Q_{h,mo} = \frac{(UA)_{tot}}{\eta_h} DD_h \quad (5)$$

Η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση για θέρμανση υπολογίζεται με την εξίσωση (6) αθροίζοντας τις μηνιαίες καταναλώσεις:

$$Q_{h,yr} = \sum_1^j Q_{h,mo} \quad , \quad (6)$$

όπου j ο αριθμός μηνών της περιόδου θέρμανσης

Για την περιοχή της Λάρισας όπου βρίσκεται το κτίριο αναφοράς χρησιμοποιώντας τις βαθμομέρες θέρμανσης της παραγράφου 3.3 (πίνακας 3) και την εξίσωση (5) υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες καταναλώσεις ενέργειας (kWh) που δίνονται στον πίνακα 4. Στην τελευταία στήλη του πίνακα δίνονται οι ανά μήνα μετρηθείσες καταναλώσεις ενέργειας (kWh) σύμφωνα με τις ενδείξεις των θερμιδομετρητών.

Θεωρώντας ότι το κτίριο αναφοράς βρίσκεται στις πόλεις των Τρικάλων και του Βόλου, και χρησιμοποιώντας τις βαθμομέρες θέρμανσης της παραγράφου 3.3 (πίνακας 4) υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες καταναλώσεις ενέργειας (kWh) με χρήση της εξίσωσης (5). Οι πόλεις αυτές μαζί με την πόλη της Λάρισας, όπως όλη η περιοχή της Θεσσαλίας βρίσκονται στην ίδια ζώνη όσο αφορά τον κανονισμό θερμομόνωσης, οπότε τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κτιρίου μπορούν να θεωρηθούν τυπικά για την περιοχή. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα (6).

Πίνακας 5: Σύγκριση καταναλώσεων ενέργειας (kWh) για την Λάρισα			
Μήνας	Κατανάλωση ενέργειας (kWh) χρησιμοποιώντας τις βαθμοημέρες της πρώτης μεθόδου	Κατανάλωση ενέργειας (kWh) χρησιμοποιώντας τις βαθμοημέρες της δεύτερης μεθόδου	Ενδείξεις θερμομετρητών (kWh)
N	16285.44	16460.79	14443,7
Δ	25105.47	25165.61	20448,8
I	29140.69	29176.62	21833,0
Φ	25184.45	25212.40	26069,5
M	21857.43	21950.88	21385,0
A	11953.44	12311.74	10609,2
Σύνολο	129526,9	130278	114789,2

Πίνακας 6: Σύγκριση καταναλώσεων ενέργειας (kWh) για τις πόλεις Τρίκαλα, Βόλο.

	ΤΡΙΚΑΛΑ		ΒΟΛΟΣ	
	Κατανάλωση ενέργειας (kWh) χρησιμοποιώντας τις βαθμοημέρες της πρώτης μεθόδου	Κατανάλωση ενέργειας (kWh) χρησιμοποιώντας τις βαθμοημέρες της δεύτερης μεθόδου	Κατανάλωση ενέργειας (kWh) χρησιμοποιώντας τις βαθμοημέρες της πρώτης μεθόδου	Κατανάλωση ενέργειας (kWh) χρησιμοποιώντας τις βαθμοημέρες της πρώτης μεθόδου
Μήνας	15977.20	16161.77	11440.76	22950.77
Δ	24522.10	24587.23	19075.58	20132.10
I	28140.17	28180.96	22886.61	17611.16
Φ	23896.06	23930.02	20083.74	9782.28
M	20076.10	20196.61	17467.47	11771.43
A	10045.37	10543.90	9293.23	19187.77
Σύνολο	122657	123600.5	100247.4	101435.5

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Διερευνήθηκε η ικανότητα χρήσης δύο διαφορετικών μοντέλων υπολογισμού βαθμομερών θέρμανσης στην εκτίμηση του προσδιορισμού κατανάλωσης ενέργειας κτιρίων στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας. Εφαρμόστηκε μέθοδος προσδιορισμού των μέσων ημερήσιων τιμών της θερμοκρασίας, ώστε να καταστεί ακριβέστερος ο υπολογισμός των βαθμομερών θέρμανσης.

Όπως φαίνεται από τους πιο πάνω πίνακες οι βαθμοημέρες θέρμανσης, όπως αυτές υπολογίστηκαν με τις δύο μεθόδους, δεν εμφανίζουν αξιόλογες αποκλίσεις. Μικρές διαφοροποιήσεις προς τα πάνω προκύπτουν από την εφαρμογή της δεύτερης μεθόδου. Σε σύνολο έτους η διαφορά ανέρχεται για την Λάρισα σε 12 περίπου βαθμοημέρες μόνο. Αντίστοιχα για τις άλλες δυο Θεσσαλικές πόλεις η διαφορά ανέρχεται σε 15 περίπου βαθμοημέρες για τα Τρίκαλα και 19 περίπου για την πόλη του Βόλου.

Ειδικότερα, σε μεγέθη καταναλώσεων (kWh), οι διαφορές των δυο μεθόδων βρίσκονται για την Λάρισα σε ποσοστό 0.5% . Αντίστοιχα για τις άλλες δυο Θεσσαλικές πόλεις η διαφορά ανέρχεται σε 0.8% για τα Τρίκαλα και 1.2% για το Βόλο.

Συγκρίνοντας τέλος τις πραγματικές καταναλώσεις του κτιρίου στην Λάρισα, οι οποίες προέκυψαν από τις ενδείξεις των θερμιδομετρητών, με αυτές που προκύπτουν από τις προβλέψεις με χρήση μοντέλων βαθμομερών διαπιστώνονται αξιόλογες αποκλίσεις. Συγκεκριμένα, για την Λάρισα τα μοντέλα βαθμομερών προβλέπουν σε ετήσια βάση 11.4% περισσότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε.

Για την περιοχή του Βόλου οι καταναλώσεις ενέργειας για την ίδια θερμαντική περίοδο εκτιμάται ότι θα ήταν τουλάχιστον 10% λιγότερη σε σχέση με Λάρισα και Τρίκαλα, εξαιτίας του μικρότερου ετήσιου αριθμού βαθμομερών.

Τέλος εκτιμάται ότι τα μοντέλα αποτελούν σημαντικό εργαλείο για την ενεργειακή διαχείριση των κτιρίων και ειδικότερα για την πρόβλεψη των ενεργειακών καταναλώσεων θέρμανσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων έργων “Εθνικό πρόγραμμα για τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ελλάδα”, Μάρτιος 2002.
2. ASHRAE, Handbook of Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, New York: 1993.
3. Παπακόστας Κ.Τ, Εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση σε κτίρια κατοικιών στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, Πρακτικά 7^{ου} Εθνικού Συνεδρίου I.H.T για τις Α.Π.Ε, Πάτρα 2002.
4. A. Tzachanis, V. Kampanas, An experimental Investigation into the Sufficiency of estimating Energy Consumption in Buildings using Constant and Variable Base Degree-Days Concepts, Proceeding of the International conference “The integration of the Renewable Energy Systems into the building structures”. Patra 2005.
5. Cartalis, C., Synodinou, A., Proedrou, M., Tsangrassoulis, A., Santamouris, M., 2001. Medications in energy demand in urban areas as a result of climate changes: an assessment for the southeast Mediterranean region. Energy Conversion and Management 42 (14), 1647 –1656.
6. Kreider J.F. and Rabl A., 1994, Heating and Cooling of Buildings: Design for Efficiency, New York : McGraw-Hill.
7. Matzarakis A., Balafoutis C., Heating Degree-Days over Greece as an Index of energy consumption, International Journal of Climatology, 24, pp. 1817-1828, 2004.
8. Erbs, D.G., S.A. Klein, and W.A. Bechman. 1983. Estimation of degree-days and ambient temperature bin data from monthly-average temperatures. *ASHARE Journal*, 25(6):60-65.
9. Κωστούλας Αχ. Ν. Θεοδωρόπουλος, Γ. Βόκας, «υπολογισμός βαθμομερών θέρμανσης και ψύξης για ελληνικές πόλεις με την χρήση διαφόρων μεθοδολογιών», Πρακτικά 8^{ου} Εθνικού Συνεδρίου I.H.T για τις Α.Π.Ε, Θεσσαλονίκη 2006.
10. Duffie, J.A. and W.A. Beckman, 1991, Solar engineering of thermal processes, 2nd ed., Canada: John Willey and Sons Inc.
11. Matzarakis A., Balafoutis C., Heating Degree-Days over Greece as an Index of energy consumption, International Journal of Climatology, 24, pp. 1817-1828, 2004.

12. Al-Homoud, M. S. 1998. Variable-Base Heating and Cooling Degree-Day Data for 24 Saudi Arabian Cities. *ASHRAE Transactions*, 104(2):320-330.
13. Κουρεμένος Δ.Α, Αντωνόπουλος Κ.Α, Θερμοκρασιακά χαρακτηριστικά 35 Ελληνικών Πόλεων, Αθήνα 1993 (Β έκδοση)
14. Κ. Παπακώστας κ.α Βαθμοημέρες Θέρμανσης 50 Ελληνικών Πόλεων Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, IV, τεύχ. 1-2 2005

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ ΓΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Κ. Παπακώστας¹, Δ. Μπιλαδέρης, Θ. Μαυρομμάτης², Ν. Κυριάκης¹

¹Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Ενεργειακός Τομέας, 54124 Θεσσαλονίκη, e-mail: dinpap@eng.auth.gr

²Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Σχολή Θετικών Επιστημών -Τμήμα Γεωλογίας, 541 24 Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται καταρχήν μία παρουσίαση της εξέλιξης των βαθμοημερών θέρμανσης και ψύξης από το έτος 1983 έως το έτος 2002, για τις δύο μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδας, την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη. Οι βαθμοημέρες υπολογίστηκαν από στατιστική επεξεργασία των ωριαίων τιμών της θερμοκρασίας ξηρού θερμομέτρου των δύο περιοχών και δίδονται ενδεικτικά σε δύο τυπικές θερμοκρασίες βάσεις, τους 15°C για τη θέρμανση και τους 24°C για την ψύξη. Στη συνέχεια συγκρίνονται οι μέσες τιμές βαθμοημερών θέρμανσης και ψύξης των δεκαετιών 1983-1992 και 1993-2002 για τις δύο πόλεις, σε διάφορες θερμοκρασίες βάσης. Τέλος, με την εφαρμογή της μεθόδου βαθμοημερών μεταβλητής βάσης, υπολογίζεται η κατανάλωση ενέργειας σε τυπικό κτίριο κατοικιών για θέρμανση και ψύξη και συγκρίνονται οι ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου ανάμεσα στις δύο δεκαετίες. Από τα αποτελέσματα της εργασίας είναι εμφανής η μεταβολή της θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος και η επίδρασή της στην κατανάλωση ενέργειας. Η μέση τιμή των βαθμοημερών θέρμανσης στην Αθήνα κατά τη δεκαετία 1993-2002 μειώθηκε από 8% έως 22% , ανάλογα με τη θερμοκρασία βάσης, σε σχέση με τη δεκαετία 1983-1992. Η αντίστοιχη μείωση στη Θεσσαλονίκη κυμαίνεται από 4.5% έως 9.5%. Η μέση τιμή των βαθμοημερών ψύξης αυξήθηκε από 25% έως 69% για την Αθήνα και από 10% έως 21% για τη Θεσσαλονίκη, ανάλογα με τη θερμοκρασία βάσης. Όσον αφορά τις ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου κατοικιών για θέρμανση, αυτές μειώθηκαν κατά 11.5% και 5% αντίστοιχα για Αθήνα και Θεσσαλονίκη, ενώ για ψύξη αυξήθηκαν κατά 26% και 10% αντίστοιχα για τις δύο πόλεις.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αλλαγή του κλίματος βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη και είναι βέβαιο ότι θα συνεχισθεί κατά τις επόμενες δεκαετίες, ακόμη και αν οι προσπάθειες που καταβάλλονται για το μετριασμό του φαινομένου στεφθούν με επιτυχία.

Στην Ευρώπη και ιδιαίτερα στις νότιες περιοχές και στην λεκάνη της Μεσογείου, όπου γεωγραφικά ανήκει και η Ελλάδα, παρατηρείται αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, τόσο κατά τους θερινούς όσο και κατά τους χειμερινούς μήνες. Η αλλαγή του κλίματος έχει άμεσες συνέπειες και στον ενεργειακό τομέα και στα πρότυπα ενεργειακής κατανάλωσης. Η ζήτηση ενέργειας για θέρμανση στα κτίρια μειώνεται ενώ αντίθετα αυξάνεται η ζήτηση ενέργειας για ψύξη.

Ένας από τους δείκτες του κλίματος μιας περιοχής είναι και οι βαθμοημέρες θέρμανσης και ψύξης. Οι βαθμοημέρες είναι μία έμμεση ένδειξη της διακύμανσης της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση και ψύξη σε κτίρια [1], [2], [3], [4], [5], [6].

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας υπολογίστηκαν οι συνολικές ετήσιες τιμές των βαθμοημερών θέρμανσης και ψύξης για τις δύο μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδας, την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξή τους από το έτος 1983 έως το έτος 2002 σε τυπικές θερμοκρασίες βάσης, συγκρίνονται οι μέσες τιμές βαθμοημερών θέρμανσης και ψύξης των δεκαετιών 1983-1992 και 1993-2002, σε διάφορες θερμοκρασίες βάσης, και διερευνάται η επίδραση της μεταβολής τους στις ενεργειακές απαιτήσεις ενός κτιρίου-μοντέλου κατοικιών κατά στις δύο δεκαετίες.

2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΒΑΘΜΟΗΜΕΡΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΨΥΞΗΣ

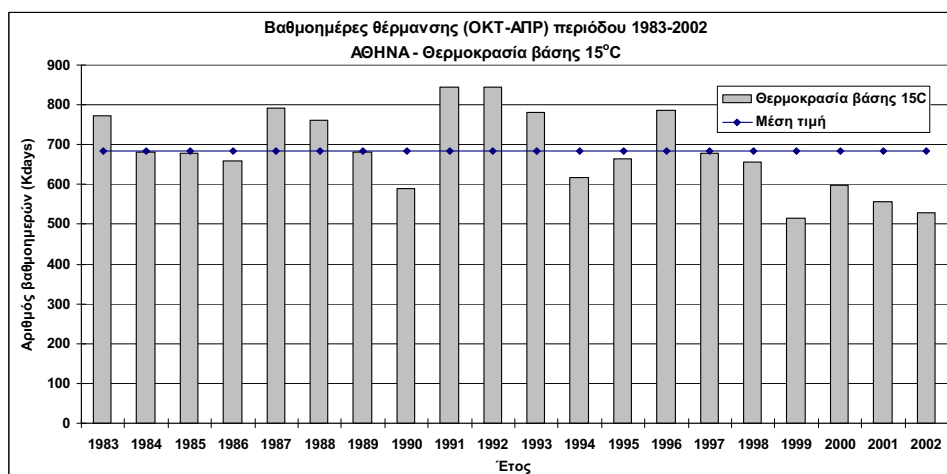
Οι βαθμοημέρες θέρμανσης-ψύξης υπολογίζονται είτε από την μέση ημερήσια θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου του εξωτερικού περιβάλλοντος είτε από τις μέσες ωριαίες θερμοκρασίες ή από τη μέση τιμή της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας της ημέρας. Οι διαφορετικοί τρόποι υπολογισμού εξηγούν και τις διαφορές που παρατηρούνται στις τιμές που δίδονται από διάφορες πηγές.

Στην παρούσα εργασία οι τιμές των βαθμοημερών προέκυψαν από την στατιστική επεξεργασία των ωριαίων μετρήσεων της θερμοκρασίας ξηρού θερμομέτρου του εξωτερικού αέρα των ετών 1983 έως 2002. Τα θερμοκρασιακά δεδομένα ελήφθησαν από τους μετεωρολογικούς σταθμούς του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών [7] και του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

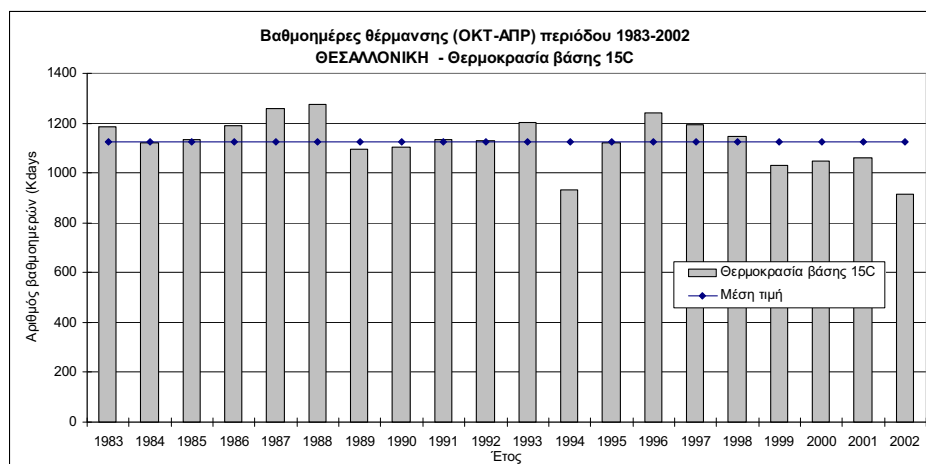
Υπολογίστηκαν οι συνολικές βαθμοημέρες της χειμερινής περιόδου (Οκτώβριος - Απρίλιος), σε θερμοκρασίες βάσης από 10 έως 20°C, και οι συνολικές βαθμοημέρες της θερινής περιόδου (Ιούνιος – Σεπτέμβριος), σε θερμοκρασίες βάσης από 20 έως 28°C.

Λόγω του μεγάλου εύρους των αποτελεσμάτων, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι συνολικές βαθμοημέρες θέρμανσης της περιόδου 1983-2002 για θερμοκρασία βάσης 15°C (εικόνες 1 και 2 για Αθήνα και Θεσσαλονίκη αντίστοιχα) και οι συνολικές βαθμοημέρες ψύξης για θερμοκρασία βάσης 24°C (εικόνες 3 και 4 για Αθήνα και Θεσσαλονίκη αντίστοιχα). Οι θερμοκρασίες αυτές είναι οι πλέον συνήθεις θερμοκρασίες ισορροπίας κανονικών θερμομονωμένων κτιρίων χωρίς ιδιαίτερα μεγάλα θερμικά κέρδη από εσωτερικές πηγές θερμότητας και ηλιακή ακτινοβολία.

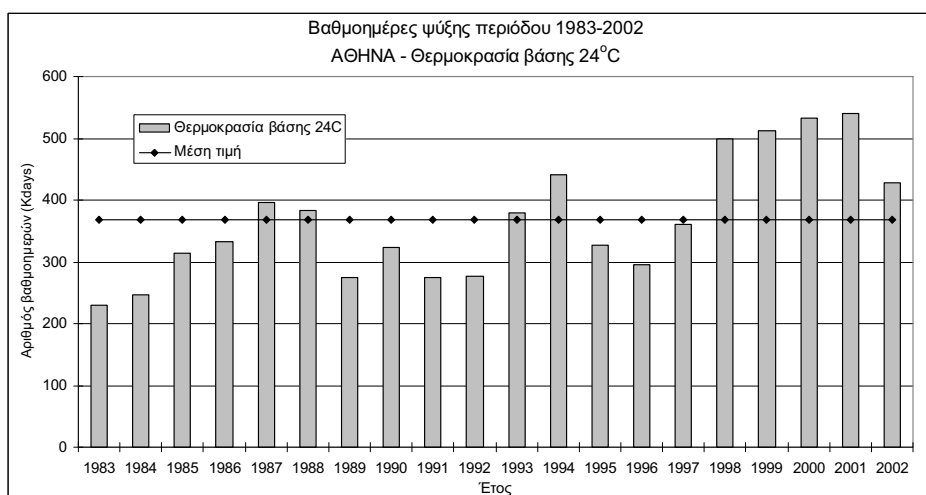
Από τα διαγράμματα των εικόνων 1-4 προκύπτει μία σταθερή τάση μείωσης των βαθμοημερών θέρμανσης και αύξησης των βαθμοημερών ψύξης και για τις δύο πόλεις, κυρίως από το έτος 1996 και μετά. Οι βαθμοημέρες θέρμανσης είναι μικρότερες και οι



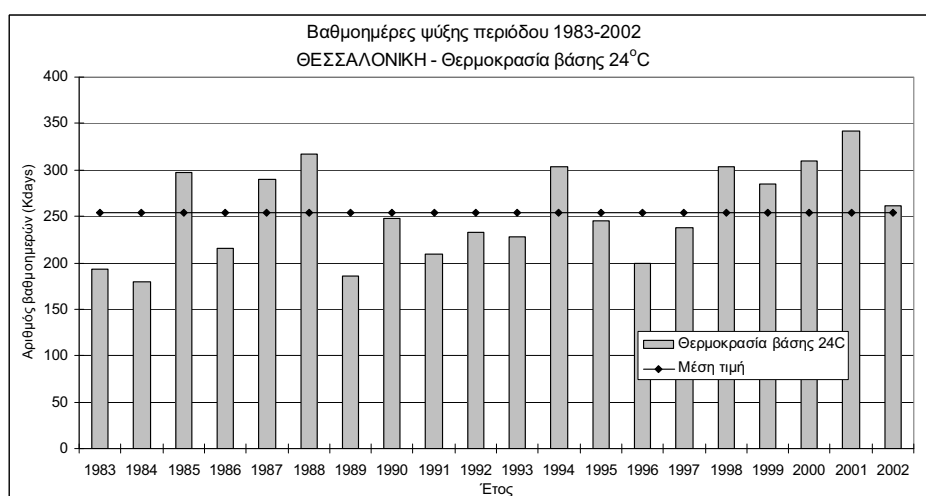
Εικόνα 1: Βαθμοημέρες θέρμανσης (Οκτώβριος-Απρίλιος) της περιόδου 1983-2002 στην Αθήνα. Θερμοκρασία βάσης: 15°C.



Εικόνα 2: Βαθμομέρες θέρμανσης (Οκτώβριος-Απρίλιος) της περιόδου 1983-2002 στην Θεσσαλονίκη. Θερμοκρασία βάσης: 15°C.



Εικόνα 3: Βαθμομέρες ψύξης (Ιούνιος-Σεπτέμβριος) της περιόδου 1983-2002 στην Αθήνα. Θερμοκρασία βάσης: 24°C.



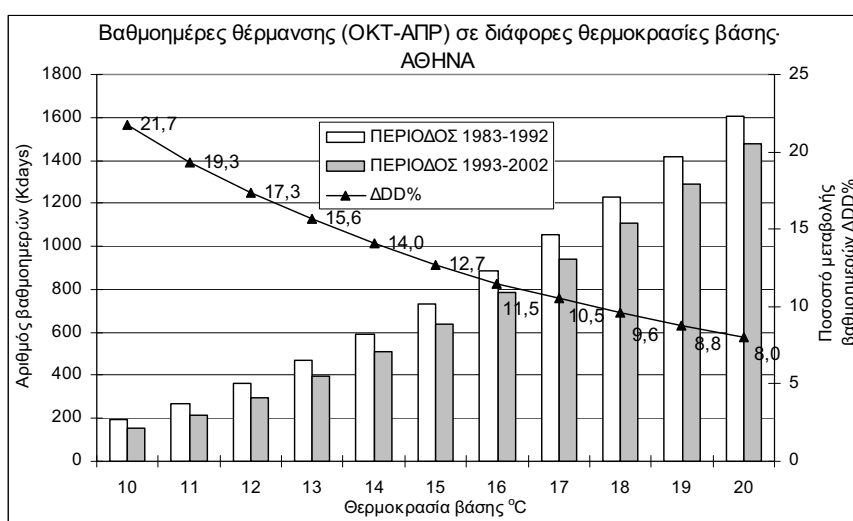
Εικόνα 4: Βαθμομέρες ψύξης (Ιούνιος-Σεπτέμβριος) της περιόδου 1983-2002 στη Θεσσαλονίκη. Θερμοκρασία βάσης: 24°C.

ψύξης μεγαλύτερες από την μέση τιμή της εικοσαετίας και για τις δύο πόλεις. Αυτό αποτελεί μία ένδειξη της αλλαγής του κλίματος, που μπορεί να αποδοθεί στην αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, με ηπιότερους χειμώνες και θερμότερα καλοκαίρια [8].

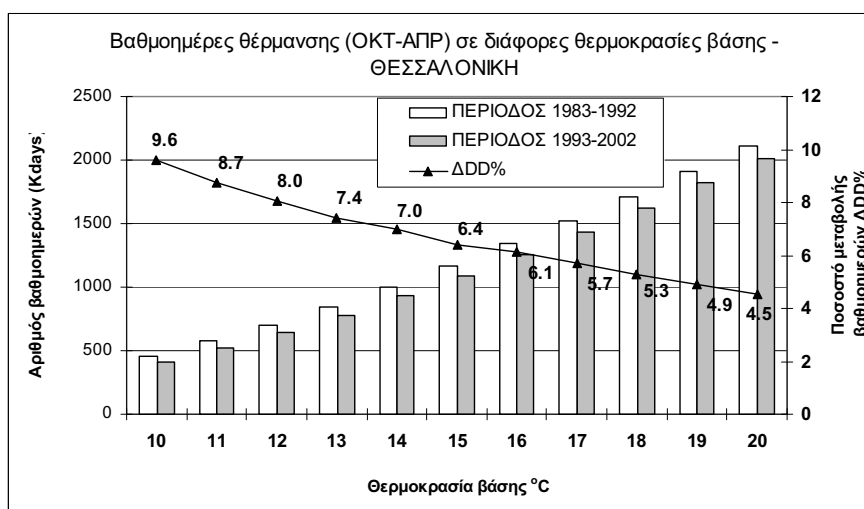
Επίσης παρατηρείται μία ομοιομορφία στην αύξηση ή τη μείωση των βαθμοημερών για το ίδιο έτος και για τις δύο πόλεις. Δηλαδή η μεταβολή των κλιματικών συνθηκών είναι ομοιόμορφη και για τις δύο πόλεις.

Η σύγκριση των βαθμοημερών θέρμανσης, σε διάφορες θερμοκρασίες βάσης, ανάμεσα στις δεκαετίες 1983-1992 και 1993-2002 παρουσιάζεται στα διαγράμματα των εικόνων 5 και 6, ενώ η σύγκριση των βαθμοημερών ψύξης στα διαγράμματα των εικόνων 7 και 8, για την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη αντίστοιχα.

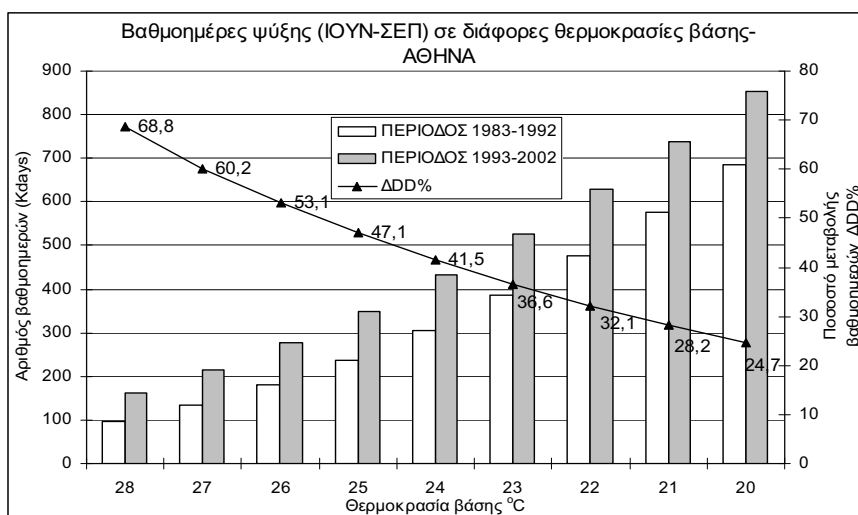
Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5 έως 8 είναι εμφανής η μείωση των βαθμοημερών κατά την περίοδο θέρμανσης και η αύξηση των βαθμοημερών κατά την περίοδο ψύξης, στη διάρκεια της δεκαετίας 1993-2002 σε σχέση με τη δεκαετία 1983-1992.



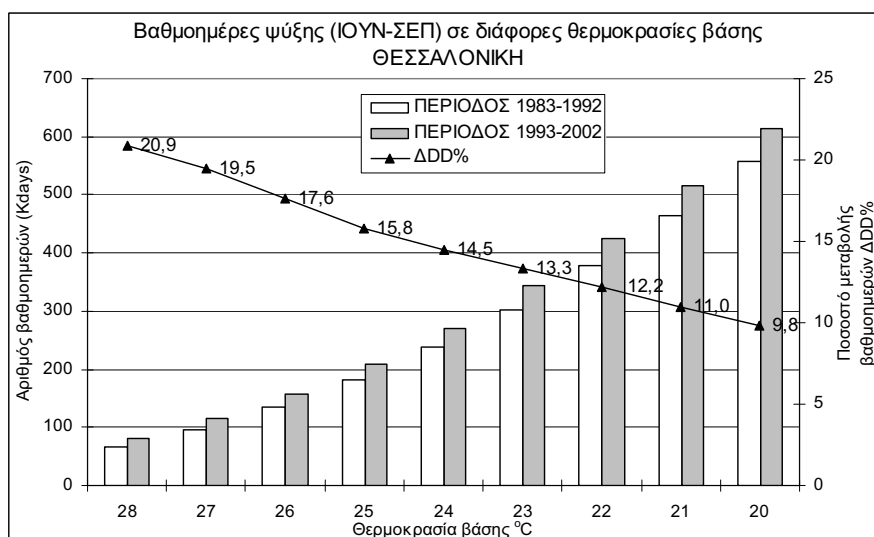
Εικόνα 5: Βαθμομέρες θέρμανσης (ΟΚΤ-ΑΠΡ) σε διάφορες θερμοκρασίες βάσης, για τις περιόδους 1983-1992, 1993-2002 και το ποσοστό μεταβολής τους, Αθήνα



Εικόνα 6: Βαθμομέρες θέρμανσης (ΟΚΤ-ΑΠΡ) σε διάφορες θερμοκρασίες βάσης, για τις περιόδους 1983-1992, 1993-2002 και το ποσοστό μεταβολής τους, Θεσσαλονίκη



Εικόνα 7: Βαθμοημέρες ψύξης (ΙΟΥΝ-ΣΕΠ) σε διάφορες θερμοκρασίες βάσης, για τις περιόδους 1983-1992, 1993-2002 και το ποσοστό μεταβολής τους, Αθήνα



Εικόνα 8: Βαθμοημέρες ψύξης (ΙΟΥΝ-ΣΕΠ) σε διάφορες θερμοκρασίες βάσης, για τις περιόδους 1983-1992, 1993-2002 και το ποσοστό μεταβολής τους, Θεσσαλονίκη

Η μέση τιμή των βαθμοημερών θέρμανσης στην Αθήνα κατά τη δεκαετία 1993-2002 μειώθηκε από 8% έως 22% , ανάλογα με τη θερμοκρασία βάσης, σε σχέση με τη δεκαετία 1983-1992. Η αντίστοιχη μείωση στη Θεσσαλονίκη κυμαίνεται από 4.5% έως 9.5%. Η μέση τιμή των βαθμοημερών ψύξης αυξήθηκε από 25% έως 69% για την Αθήνα και από 10% έως 21% για τη Θεσσαλονίκη, ανάλογα με τη θερμοκρασία βάσης.

Κατά την περίοδο θέρμανσης, η μεταβολή των τιμών των βαθμοημερών είναι σχεδόν διπλάσια στην Αθήνα σε σχέση με τη Θεσσαλονίκη ενώ κατά την περίοδο ψύξης σχεδόν τριπλάσια. Επομένως η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι εντονότερη στην Αθήνα σε σχέση με τη Θεσσαλονίκη. Αυτό πιθανόν να μπορεί να αποδοθεί στο φαινόμενο της αστικής νησίδας, το οποίο είναι εντονότερο στην Αθήνα σε σχέση με τη Θεσσαλονίκη.

Επίσης κατά τη θερινή περίοδο, παρατηρείται μεγαλύτερο ποσοστό μεταβολής βαθμοημερών σε σχέση με τη χειμερινή, δηλαδή οι θερμοκρασίες αυξήθηκαν περισσότερο στα καλοκαίρια από ότι στους χειμώνες. Συγκεκριμένα, κατά την περίοδο θέρμανσης, όσο αυξάνει η θερμοκρασία βάσης από τις χαμηλές (10°C) στις υψηλές (20°C) τιμές, υπάρχει μια

προοδευτική μείωση του ποσοστού μεταβολής των βαθμοημερών. Το αντίθετο συμβαίνει κατά την περίοδο ψύξης. Αυτό δείχνει ότι οι μεγαλύτερες αλλαγές παρατηρούνται στις ακραίες κλιματολογικές συνθήκες. Δηλαδή κατά την δεκαετία 1993-2002, για την περίοδο θέρμανσης τα μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης είναι για θερμοκρασίες βάσης 10°C και κάτω, επομένως οι χειμώνες είναι ηπιότεροι, ενώ για την περίοδο ψύξης τα μεγαλύτερα ποσοστά αύξησης είναι για θερμοκρασίες βάσης 28°C και άνω, επομένως τα καλοκαίρια είναι θερμότερα.

3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ

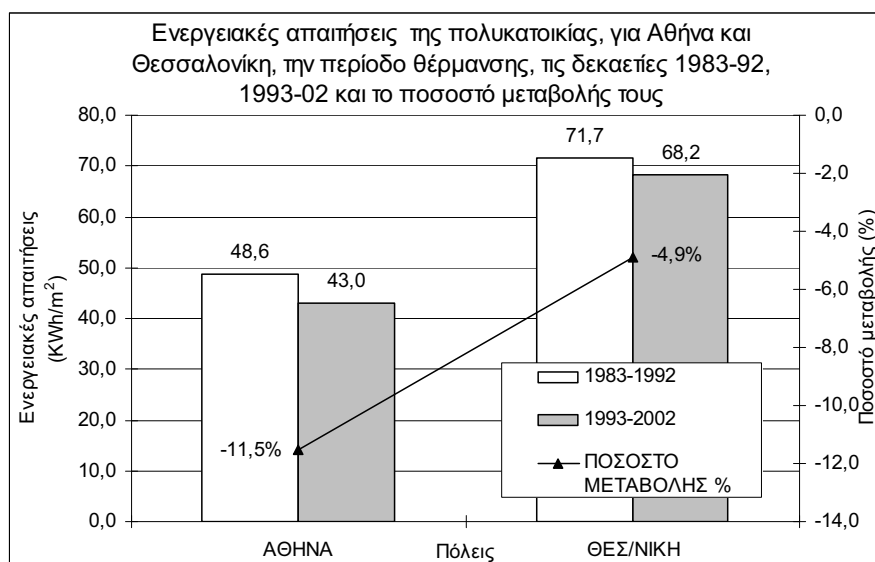
Προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας στην ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων, υπολογίστηκαν οι ενεργειακές απαιτήσεις ενός τυπικού κτιρίου-μοντέλου κατοικιών για θέρμανση και ψύξη. Η μέθοδος η οποία χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή των βαθμοημερών με μεταβλητή βάση ανά 4ωρο. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής, σε σχέση με την κλασσική μέθοδο βαθμοημερών μεταβλητής βάσης, είναι η υψηλότερη χρονική ανάλυση στους ενεργειακούς υπολογισμούς. Στην εφαρμογή της μεθόδου δίνεται η δυνατότητα της διακύμανσης της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτιρίου και του ρυθμού ανανέωσης του εξωτερικού αέρα ανά 4ωρο. Επίσης δίνεται η δυνατότητα ορισμού των εσωτερικών πηγών θερμότητας καθώς και του υπολογισμού των θερμικών κερδών από ηλιακή ακτινοβολία με μεγαλύτερη ακρίβεια (μέση τιμή ανά 4ωρο και όχι μέση τιμή 24ώρου). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να υπολογισθεί η θερμοκρασία ισορροπίας του κτιρίου και οι ενεργειακές του απαιτήσεις σε 6 ημερήσια χρονικά διαστήματα και επομένως με μεγαλύτερη ακρίβεια. Βαθμοημέρες θέρμανσης και ψύξης ανά 4ωρο καθώς και δεδομένα για τις εσωτερικές πηγές θερμότητας, την ηλιακή ακτινοβολία, την ηλιοφάνεια κ.λ.π. δίδονται στην [9].

Το κτίριο είναι μία τριώροφη πολυκατοικία, σε συνεχές σύστημα δόμησης, με επίπεδη οροφή, pilotis και δύο διαμερίσματα των 100 m² ανά όροφο. Κάθε διαμέρισμα έχει κάτοψη 8.8x12.5 m και ύψος 3 m. Τα ανοίγματα είναι κατανομημένα στη βόρεια και νότια πλευρά του κτιρίου, και αντιπροσωπεύουν περίπου το 30% της εξωτερικής επιφάνειας. Οι πλευρές του κτιρίου με ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό εφάπτονται σε κτίρια και δεν έχουν ανοίγματα.

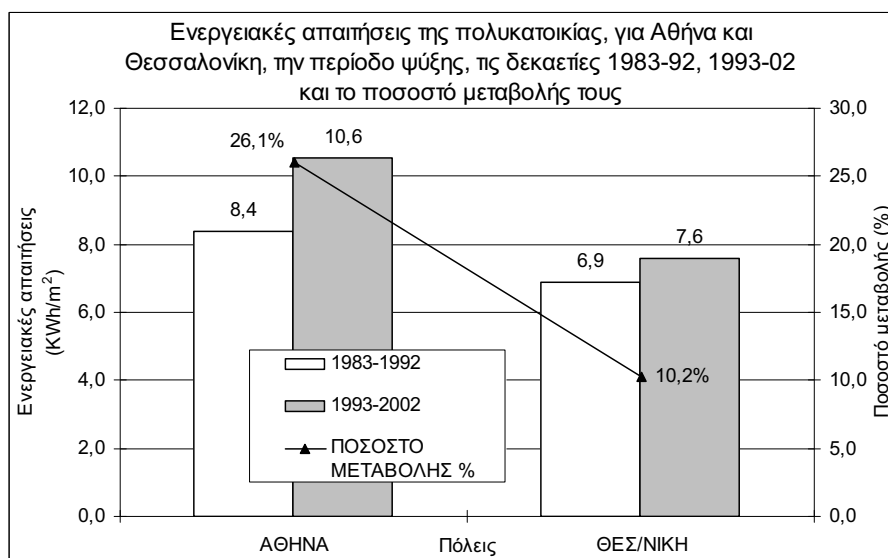
Η θερμομόνωση του κτιρίου είναι από τυποποιημένα θερμομονωτικά υλικά, που είναι διαθέσιμα στην ελληνική αγορά, και οι συντελεστές θερμοπερατότητας των επιμέρους δομικών στοιχείων είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο όριο που θέτει ο Ελληνικός Κανονισμός Θερμομόνωσης. Ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας του κτιρίου K_m είναι 0,787 W/m²K και είναι κοινός και για τις 2 θερμικές ζώνες που ανήκουν η Αθήνα και η Θεσσαλονίκη.

Η εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου θεωρήθηκε σταθερή για τις ώρες από 08:00 έως 24:00 και ίση με 20°C για τη χειμερινή περίοδο και 26°C για τη θερινή. Για τις υπόλοιπες ώρες θεωρήθηκε ότι η θερμοκρασία είναι μικρότερη κατά 3K και μεγαλύτερη κατά 4K, αντίστοιχα για τη χειμερινή και θερινή περίοδο. Ο ρυθμός αερισμού θεωρήθηκε ίσος με 0.8 εναλλαγές του όγκου του κτιρίου ανά ώρα, για τις ώρες από 08:00 έως 24:00, και για τις υπόλοιπες ώρες 0.5 εναλλαγές/ώρα και 10 εναλλαγές/ώρα (λόγω ανοίγματος παραθύρων), αντίστοιχα για τη χειμερινή και θερινή περίοδο. Τα θερμικά κέρδη από ανθρώπους, φώτα και συσκευές καθώς και τα ηλιακά κέρδη υπολογίστηκαν ανά 4ωρο. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος θέρμανσης (λέβητας θερμού νερού) θεωρήθηκε ίσος με 0.85 και του συστήματος ψύξης (κλιματιστικές συσκευές) ίσος με 2.5.

Οι ενεργειακοί υπολογισμοί έγιναν για όλους τους μήνες της χειμερινής και θερινής περιόδου για τις δύο πόλεις και υπολογίστηκαν οι ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου για θέρμανση και ψύξη σε kWh/m² κατοικήσιμης επιφάνειας, με θερμοκρασιακά δεδομένα τόσο της δεκαετίας 1983-1992 όσο και της δεκαετίας 1993-2002. Στις εικόνες 9 και 10 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις δύο πόλεις και η σύγκριση των ενεργειακών απαιτήσεων.



Εικόνα 9: Ενεργειακές απαιτήσεις (KWh/m²) της πολυκατοικίας, κατά την περίοδο θέρμανσης, για Αθήνα και Θεσσαλονίκη, για τις δεκαετίες 1983-1992 και 1993-2002 και τα ποσοστά μεταβολής τους



Εικόνα 10: Ενεργειακές απαιτήσεις (KWh/m²) της πολυκατοικίας, κατά την περίοδο ψύξης, για Αθήνα και Θεσσαλονίκη, για τις δεκαετίες 1983-1992 και 1993-2002 και τα ποσοστά μεταβολής τους

Για την περίοδο θέρμανσης, κατά τη δεκαετία 1993-2002, παρατηρείται μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων και για τις δύο πόλεις, σε σχέση με τη δεκαετία 1983-1992 (εικόνα 9). Το ποσοστό μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης είναι 11,5% για την Αθήνα, και 4,9% για τη Θεσσαλονίκη. Αντίθετα, για την περίοδο ψύξης κατά τη δεκαετία 1993-2002,

παρατηρείται αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων και για τις δύο πόλεις, σε σχέση με τη δεκαετία 1983-1992 (εικόνα 10). Στην Αθήνα το ποσοστό αύξησης είναι 26.1% και στη Θεσσαλονίκη 10.2%. Το ποσοστό μεταβολής των ενεργειακών απαιτήσεων του κτιρίου και για τις δύο πόλεις, είναι μεγαλύτερο την περίοδο ψύξης από την περίοδο θέρμανσης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την εξέλιξη των βαθμοημερών θέρμανσης και ψύξης από το έτος 1983 έως το έτος 2002, για τις δύο μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδας, την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη και από τη σύγκριση των τιμών τους ανάμεσα στις δεκαετίες 1983-1992 και 1993-2002, σε διάφορες θερμοκρασίες βάσης, είναι εμφανής η μεταβολή της θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος. Η μέση τιμή των βαθμοημερών θέρμανσης στην Αθήνα κατά τη δεκαετία 1993-2002 μειώθηκε από 8% έως 22% , ανάλογα με τη θερμοκρασία βάσης, σε σχέση με τη δεκαετία 1983-1992. Η αντίστοιχη μείωση στη Θεσσαλονίκη κυμαίνεται από 4.5% έως 9.5%. Επίσης η μέση τιμή των βαθμοημερών ψύξης αυξήθηκε από 25% έως 69% για την Αθήνα και από 10% έως 21% για τη Θεσσαλονίκη, ανάλογα με τη θερμοκρασία βάσης. Οι ενεργειακοί υπολογισμοί σε ένα τυπικό κτίριο κατοικιών έδειξαν ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας επιδρά και στην κατανάλωση ενέργειας των κτιρίων για θέρμανση και ψύξη. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι παρατηρείται μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση κατά 11.5% για την Αθήνα και 4.9% για τη Θεσσαλονίκη και αντίστοιχη αύξηση για ψύξη κατά 26.1% στην Αθήνα και 10.2% στη Θεσσαλονίκη, με τις διαφορές ανάμεσα στις δύο πόλεις να μπορούν να αποδοθούν στο φαινόμενο της αστικής νησίδας, το οποίο είναι εντονότερο στην Αθήνα σε σχέση με τη Θεσσαλονίκη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ASHRAE, "Fundamentals", American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA, 1997.
2. Kreider J.F. and Rabl A., "Heating and Cooling of Buildings. Design for efficiency", McGraw Hill Int. Editions, 1994.
3. Claridge D.E., M. Bida, M. Krarti , H.S. Jeon , E. Hamzavi, W. Zwack and I. Weiss, "A validation study of Variable-Base Degree-Day heating calculations", ASHRAE Transactions, 93(2), pp.57-89, 1987.
4. Claridge D.E., Krarti M., and Bida M. (1987), A Validation study of Variable-Base Degree-Day cooling calculations, ASHRAE Transactions, 93(2), pp.90-104.
5. Παπακώστας Κ.Τ., "Εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση κατοικιών, με τη μέθοδο βαθμοημερών μεταβλητής βάσης", πρακ. 6ου Εθνικού Συνεδρίου IHT για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, τόμος Α, Βόλος, 1999.
6. Παπακώστας Κ.Τ., Συμβολή στην εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας σε συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού στην Ελλάδα, με τη χρήση μεθόδων απλής και πολλαπλής μέτρησης, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχ. ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 2001.
7. National Observatory of Athens, Institute of Meteorology and Physics of the Atmospheric Environment, Climatological Bulletin, 1983-2002.
8. D. Founda, K.H. Papadopoulos, M. Petrakis, C. Giannakopoulos, P. Good, Analysis of mean, maximum, and minimum temperature in Athens from 1897 to 2001 with emphasis on the last decade: trends, warm events, and cold events. Global and Planetary Change 44 (2004), 27–38.
9. Μπιλαδέρης Δημήτριος, Υπολογισμός θερμοκρασιακών δεδομένων Αθήνας και Θεσσαλονίκης για ενεργειακές μελέτες. Χρονική περίοδος 1993-2002, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 2007.

ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΣΧΟΛΙΚΟ ΚΤΙΡΙΟ ΣΤΟ ΚΕΡΑΤΣΙΝΙ

Ελευθερία Αλεξανδρή, Ναντίνα Πανάγου, Εύη Τζανακάκη

Τμήμα Κτιρίων, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, 19009 Πικέρμι,
e-mail: alexandri@cres.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εφαρμογή μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας σε σχολικά κτίρια παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, λόγω της ιδιαίτερης χρήσης και τυπολογίας των σχολικών κτιρίων. Καθώς πρόκειται για κτίρια με συγκεκριμένο ωράριο λειτουργίας, τόσο σε εβδομαδιαία, όσο και σε εποχιακή βάση, και με συγκεκριμένες καταναλώσεις, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα σχολικά κτίρια αποτελεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς μπορεί να επιτευχθεί με οικονομικά εφικτές μεθόδους, οι οποίες είναι δυνατό να φέρουν άμεσα, μετρήσιμα αποτελέσματα εξοικονόμησης ενέργειας. Σε αυτό το πλαίσιο, πραγματοποιήθηκε ενεργειακή επιθεώρηση και ενεργειακή μελέτη του 4^{ου} Νηπιαγωγείου Κερατσινίου από το ΚΑΠΕ, εστιάζοντας κυρίως σε θέματα κελύφους και εξοικονόμησης ενέργειας για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό.

Στόχος της ενεργειακής μελέτης του 4^{ου} Νηπιαγωγείου Κερατσινίου, η οποία έγινε σε ανάθεση του ΟΣΚ, είναι η τυποποίηση των επεμβάσεων που μπορεί να γίνουν σε σχολικά κτίρια, ούτως ώστε να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση, ψύξη και ηλεκτρικών καταναλώσεων των σχολικών κτιρίων στο μισό από ό,τι είναι σήμερα, για τη Β' κλιματική ζώνη. Οι προτεινόμενες επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας στο κτίριο βασίστηκαν κυρίως στα αποτελέσματα της ενεργειακής επιθεώρησης κελύφους με τη βοήθεια της θερμογράφησης και των παραμετρικών προσομοιωτικών αναλύσεων. Με αυτό τον τρόπο, ανιχνεύτηκαν οι επεμβάσεις που είναι ικανές να επιφέρουν τη μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας, με οικονομικά συμφέρουσες μεθόδους, στα υπάρχοντα κτίρια νηπιαγωγείων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στον Ελλαδικό χώρο βρίσκονται 15.446 σχολικές μονάδες [1], 72% εκ των οποίων κατασκευασμένες πριν από τον Κανονισμό Θερμομόνωσης [2], οι οποίες ευθύνονται για καταναλώσεις ενέργειας για θέρμανση της τάξης κατά μέσο όρο των 92kWh/m² [3] για όλη τη χώρα, φτάνοντας και 150kWh/m² στη Γ' κλιματική ζώνη [4]. Για την περίοδο 2008-2012 προγραμματίζεται η κατασκευή 1.233 νέων σχολείων, 833 από τα οποία θα είναι νηπιαγωγεία [1]. Καθώς τα νηπιαγωγεία παρουσιάζουν συγκεκριμένες ιδιαιτερότητες σε σχέση με τα υπόλοιπα σχολικά κτίρια (ανάπτυξη σε ισόγειο χώρο, ανάγκη για εσωτερικούς χώρους συγκέντρωσης, γραφεία με εποπτεία εσωτερικά και εξωτερικά, εξαιρετικές συνθήκες θερμικής άνεσης, δημιουργία παιδικής χαράς στον προαύλιο χώρο κοκ), είναι σημαντικό να εκτιμηθεί η εξοικονόμηση ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί από συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας απλά στη χρήση και οικονομικώς προσιτά, που μπορούν να εφαρμοστούν επιτυχώς και αποτελεσματικά στην πλειοψηφία των υπαρχόντων σχολικών κτιρίων που στεγάζουν νηπιαγωγεία.

Με αφορμή την ενεργειακή επιθεώρηση που εκπονήθηκε στο 4^ο Νηπιαγωγείο Κερατσινίου (Β' κλιματική ζώνη) εντοπίστηκαν σημεία του κελύφους και γενικότερες παράμετροι της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης, ώστε με κατάλληλες, μη εξεζητημένες, επεμβάσεις μπορεί επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 50%.

2. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ - ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Το κτίριο που στεγάζει το 4^ο Νηπιαγωγείο Κερατσινίου κατασκευάστηκε το 1989 από τον Οργανισμό Σχολικών Κτιρίων. Αναπτύσσεται σε έναν όροφο (ισόγειο) με συνολικό εμβαδόν 108,88m². Η κάτοψη είναι σχεδόν τετράγωνη (13,10×14,35 m²), με τη μεγαλύτερη πλευρά της παράλληλη στον άξονα Βορρά – Νότου, από τον οποίο δεν παρουσιάζει απόκλιση. Αποτελείται από δύο αίθουσες διδασκαλίας 53,10 m² και 52,73 m² έκαστη, ένα χώρο συγκέντρωσης 32,82 m², ένα χώρο γραφείων των νηπιαγωγών 15,11 m², καθώς και βοηθητικούς χώρους (WC, λεβητοστάσιο). Ο φέρον οργανισμός του κτιρίου είναι από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα και οι τοιχοποιίες πλήρωσης από διπλή οπτοπλινθοδομή, με θερμομόνωση στο ενδιάμεσο. Τα ανοίγματα του κτιρίου είναι από μεταλλικά πλαίσια, τα περισσότερα συρόμενα, με διπλούς υαλοπίνακες και οι πόρτες είναι μεταλλικές. Οι ποδιές των παραθύρων είναι από εμφανές σκυρόδεμα. Ανοιγόμενοι φεγγίτες υπάρχουν στο πάνω μέρος των ανοιγμάτων και των θυρών. Το δώμα του κτιρίου καλύπτεται με στρώσεις από κροκάλες και είναι θερμομονωμένο.

Το κτίριο είναι τοποθετημένο στην βόρεια πλευρά του οικοπέδου. Ο περιβάλλον χώρος του κτιρίου καταλαμβάνεται από μεσαία και υψηλή βλάστηση, δημιουργώντας ένα φράγμα προς το δρόμο. Η κεντρική αυλή του κτιρίου – χώρος εκτόνωσης, που βρίσκεται στη δύση, είναι φυτεμένη περιμετρικά με δένδρα και διαθέτει παιδική χαρά. Ο ιστός της πόλης του Κερατσινίου στη θέση του κτιρίου είναι αρκετά πυκνός, με υψηλά κτίρια, με αποτέλεσμα το μεγάλο μέρος του ισόγειου κτιρίου να σκιάζεται καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας από τον περιβάλλοντα δομημένο χώρο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ελλιπή φυσικό φωτισμό στις αίθουσες διδασκαλίας και στους υπόλοιπους χώρους του κτιρίου.

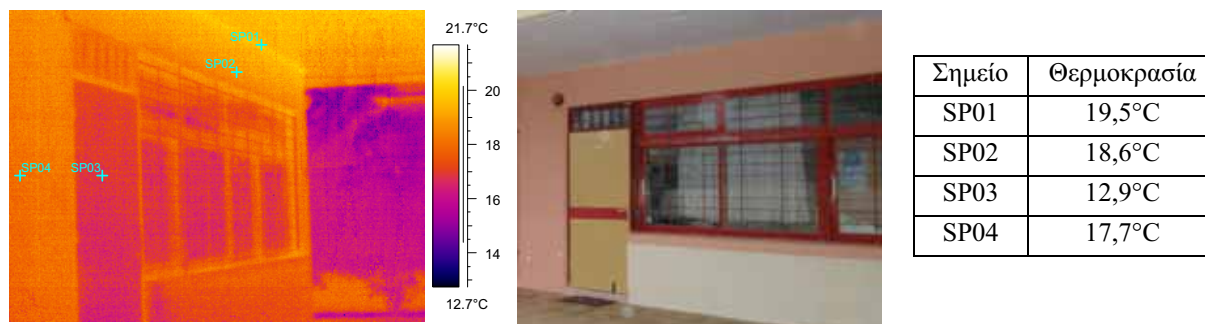
Όσον αφορά στο σύστημα θέρμανσης, την τελευταία σχολική χρονιά στο κτίριο έχει εγκατασταθεί καυστήρας φυσικού αερίου, ισχύος 75.000kcal/h. Τα προηγούμενα χρόνια η θέρμανση γινόταν με καυστήρα πετρελαίου και χρειαζόταν περίπου 1 tn πετρελαίου ανά έτος για τη θέρμανση των χώρων, ενώ το σχολείο δε διαθέτει σύστημα ψύξης. Το ζεστό νερό για θέρμανση διανέμεται από το λέβητα στα θερμαντικά σώματα με θερμομονωμένους αγωγούς, ενώ δε γίνεται χρήση ζεστού νερού χρήσης στο κτίριο. Στους νιπτήρες στο WC χρησιμοποιείται νερό με θερμοκρασία δικτύου.

Οι ηλεκτρικές καταναλώσεις αφορούν κυρίως στο φωτισμό (εγκατεστημένη ισχύς για τους λαμπτήρες φθορισμού 2kW, ενώ για τους λαμπτήρες πυρακτώσεως 360W), καθώς και στις ηλεκτρικές συσκευές, με τις οποίες είναι εφοδιασμένος ο σταθμός για την κάλυψη των αναγκών του (ραδιοκασετόφωνα, τηλεόραση με DVD-player, συσκευή τηλεομοιοτυπικής μετάδοσης, πολυμηχάνημα – φωτοτυπικό, μικρό ψυγείο). Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στο νηπιαγωγείο από τις ηλεκτρικές συσκευές που καταγράφηκαν πλην των λαμπτήρων εκτιμάται να είναι της τάξης των 1,7kW.

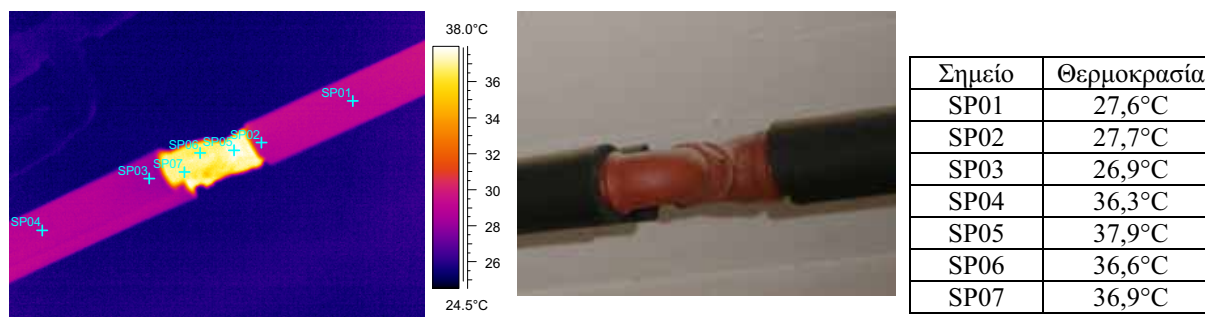
Από τη συλλογή στοιχείων από τιμολόγια ηλεκτρικών καταναλώσεων για την περίοδο 2002-2007 προέκυψε, ότι οι καταναλώσεις ανά 4μηνο είναι σχετικά σταθερές για την περίοδο 2002-2007, χωρίς κάποια τάση αύξησης ή μείωσης, με μέση κατανάλωση της τάξης των 1.130kWh την περίοδο Φεβρουαρίου – Μαΐου και 1.221kWh την περίοδο Οκτωβρίου – Ιανουαρίου, ενώ την περίοδο Ιουνίου – Σεπτεμβρίου, κατά την οποία είναι κλειστό για μεγάλη περίοδο (μέσα Ιουνίου έως τέλη Αυγούστου), η κατανάλωση πέφτει στις 529kWh. Ετησίως το νηπιαγωγείο καταναλώνει κατά μέσο όρο 2.880kWh/έτος τα τελευταία 6 χρόνια. Συνολικά εκτιμάται ότι καταναλώνει 11,69kWh ημερησίως για να καλύψει τις ηλεκτρικές του ανάγκες, με το φωτισμό να καλύπτει το 86% των ηλεκτρικών καταναλώσεων, ενώ οι συσκευές σε κατάσταση “stand by” να ευθύνονται για το 4% των ηλεκτρικών του καταναλώσεων.

Από τις θερμογραφίες που εκπονήθηκαν, συμπεραίνεται ότι τα φέροντα στοιχεία (δοκοί, υποστυλώματα) καθώς και οι ποδιές των παραθύρων από εμφανές σκυρόδεμα είναι αμόνωτα.

Καθώς είναι σχετικά μεγάλων διατομών, ευθύνονται για σημαντικές θερμικές απώλειες από το κτιριακό κέλυφος. Σε αρκετά σημεία συναρμογής είτε των υποστυλωμάτων με την τοιχοποιία είτε στις ακμές μεταξύ οριζόντων και κατακόρυφων στοιχείων, παρατηρούνται αυξημένες θερμογέφυρες. Οι τοιχοποιίες και το δώμα είναι θερμομονωμένα. Τα μεταλλικά κουφώματα και οι εξωτερικές πόρτες ευθύνονται για μεγάλες θερμοδιαφυγές από το κτιριακό κέλυφος (Εικόνα 1). Σε αρκετά σημεία τα πλαίσια των ανοιγμάτων δεν εφαρμόζουν καλά, με αποτέλεσμα την πρόκληση θερμογεφυρών. Απώλειες επίσης παρατηρήθηκαν και στους σωλήνες διανομής ζεστού νερού για θέρμανση, σε σημεία όπου δεν έχει θερμομονωθεί ή δεν είναι κατάλληλα θερμομονωμένη η σωλήνωση (Εικόνα 2).



Εικόνα 1: Θερμογράφημα δυτικής όψης κτιρίου, με θερμογέφυρες στο φέροντα οργανισμό του κτιρίου, στις μεταλλικές πόρτες, στα πλαίσια των ανοιγμάτων και στις ακμές ένωσης οριζόντων και κατακόρυφων στοιχείων



Εικόνα 2: Θερμογράφημα σωληνώσεων διανομής ζεστού νερού θέρμανσης, με ανεπαρκή, ανά περιοχές, θερμομόνωση

3. ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ

3.1. ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΚΕΛΥΦΟΣ

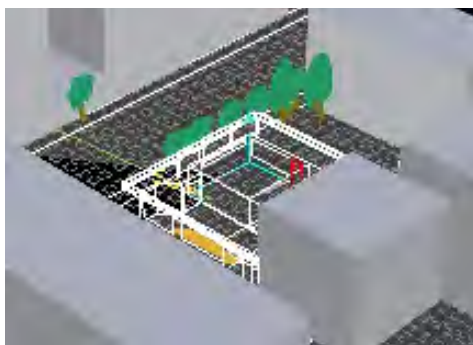
Στην ενεργειακή ανάλυση, που πραγματοποιήθηκε για την αναβάθμιση του κτιρίου του 4^{ου} Νηπιαγωγείου Κερατσινίου, μελετήθηκε η απόδοση των επεμβάσεων στο κέλυφος του κτιρίου κυρίως με μεθόδους θερμοπροστασίας, φυσικού φωτισμού καθώς και μεθόδους φυσικού αερισμού, σε σχέση πάντοτε με τις περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής και σε συνδυασμό με τη θέση του κτιρίου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό TRNSYS.

Για λόγους γενίκευσης των αποτελεσμάτων και στο μη μονωμένο κτιριακό απόθεμα, εκτός των άλλων, μελετήθηκε και σενάριο κατά το οποίο το κτίριο ήταν εντελώς αμόνωντο (σενάριο 0). Διερευνώντας αυτό το σενάριο, το ποσοστό ενέργειας που μπορεί να εξοικονομηθεί προσθέτοντας θερμομόνωση στο κτιριακό κέλυφος φθάνει στο 50% για θέρμανση και ψύξη του κτιρίου. Παράλληλα εξετάστηκαν 8 σενάρια, που αφορούν επεμβάσεις στο κτιριακό κέλυφος, κυρίως με μεθόδους θερμοπροστασίας, φυσικού φωτισμού καθώς και μεθόδους

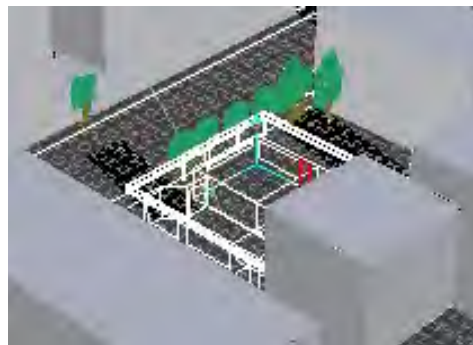
φυσικού αερισμού, εξασφαλίζοντας βέλτιστες εσωκλιματικές συνθήκες με ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση, σε σχέση πάντοτε με τις περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής και σε συνδυασμό με τη θέση του κτιρίου. Τα σενάρια, που εξετάστηκαν με το λογισμικό TRNSYS ήταν:

- Κτίριο ως έχει
- Σενάριο 0: Κτίριο χωρίς μόνωση
- Σενάριο 1: Θερμομόνωση θερμογεφυρών
- Σενάριο 2: Θερμομόνωση θερμογεφυρών και εξωτερικής τοιχοποιίας
- Σενάριο 3: Θερμομόνωση θερμογεφυρών και δώματος
- Σενάριο 4: Θερμομόνωση θερμογεφυρών, δώματος και εξωτερικής τοιχοποιίας
- Σενάριο 5: Θερμομόνωση θερμογεφυρών και αντικατάσταση κουφωμάτων
- Σενάριο 6: Θερμομόνωση θερμογεφυρών, δώματος και αντικατάσταση κουφωμάτων
- Σενάριο 7: Θερμομόνωση θερμογεφυρών, δώματος, εξωτερικής τοιχοποιίας και αντικατάσταση κουφωμάτων
- Σενάριο 8: Θερμομόνωση θερμογεφυρών, δώματος, εξωτερικής τοιχοποιίας, αντικατάσταση κουφωμάτων και νυχτερινός αερισμός

Κατά την ανάλυση της υπάρχουσας κατάστασης του κτιρίου ήταν σημαντικό να διερευνηθεί και η αποδοτικότητα της υπάρχουσας σκίασης του. Με τη χρήση του λογισμικού Ecotect και, λαμβάνοντας υπ' όψιν το υψηλό ποσοστό δόμησης της περιοχής, την υψηλή βλάστηση στο περιβάλλοντα χώρο του νηπιαγωγείου καθώς και τις προεξοχές του ίδιου του κτιρίου, διαπιστώνεται ότι το κτίριο ηλιοπροστατεύεται ικανοποιητικά τη θερινή περίοδο σε ποσοστό 70% (εικόνα 4). Κατά τη χειμερινή περίοδο το ποσοστό παραμένει εξίσου υψηλό, της τάξης του 60% (εικόνα 3), με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η εκμετάλλευση των ηλιακών κερδών από τα ανοίγματα του κτιρίου, όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες.



α

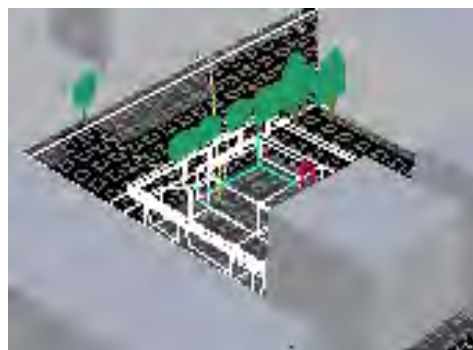


β

Εικόνα 3: Άμεση ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στο κτίριο το μήνα Δεκέμβριο (α) στις 09:00 το πρωί και (β) στις 12:00 το μεσημέρι



α



β

Εικόνα 4: Άμεση ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στο κτίριο το μήνα Ιούνιο (α) στις 08:00 το πρωί και (β) στις 12:00 το μεσημέρι

Σύμφωνα με την υπάρχουσα σκίαση, δεν απαιτείται περαιτέρω ηλιοπροστασία του κτιρίου τη θερινή περίοδο, καθώς οι σκιάσεις από τον περιβάλλοντα χώρο και τις προεξοχές του είναι επαρκείς. Αντιθέτως, τη χειμερινή περίοδο θα ήταν καλό να υπήρχε μεγαλύτερη διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας στους εσωτερικούς χώρους του Νηπιαγωγείου. Κάτι τέτοιο όμως δεν είναι εφικτό, καθώς τα στοιχεία που εμποδίζουν το χειμερινό ηλιασμό, είναι τα περιβάλλοντα κτίρια. Χρήση κατόπτρων για είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό του κτιρίου δε θεωρείται εφαρμόσιμη, καθώς θα προκαλούσε θάμβωση τόσο στους μαθητές του σχολείου όσο και στους οδηγούς οχημάτων στους παρακείμενους δρόμους.

Θερμομονώνοντας τις θερμογέφυρες του κτιρίου (εξωτερικά υποστυλώματα, δοκούς, πρέκια παραθύρων)(σενάριο 1) επιτυγχάνεται ένα μικρό ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας της τάξης του 0,14%. Το ποσοστό αυτό αυξάνεται στο 3,62% προσθέτοντας θερμομόνωση στην εξωτερική τοιχοποιία (σενάριο 2), ενώ θερμομονώνοντας το δώμα (σενάριο 3), το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας αυξάνει σε 4,96%.

Θερμομονώνοντας το κτιριακό κέλυφος – κατακόρυφα και οριζόντια στοιχεία – χωρίς αντικατάσταση των υαλοπινάκων και πλαισίων (σενάριο 4), η εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη φτάνει το 8,65%. Σε περιπτώσεις καλά θερμομονωμένου αδιαφανούς κελύφους, αλλά μη κατάλληλων διαφανών στοιχείων, μπορεί να προκληθούν φαινόμενα ως προς την θερμική άνεση μη υπολογίσιμα με τα υπάρχοντα προγράμματα H/Y. Καθώς η θερμοροή στους μονωμένους τοίχους είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη στα αμόνωτα πλαίσια των ανοιγμάτων, οι εσωτερικές επιφανειακές θερμοκρασίες θα έχουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους (επιφανειακές θερμοκρασίες τοίχων και επιφανειακές θερμοκρασίες πλαισίων), οι οποίες είναι ικανές για την πρόκληση μικρών εσωτερικών ρευμάτων και κυρίως για αίσθηση μη θερμικής άνεσης, με αποτέλεσμα τη χρήση άσκοπης επιπλέον ενέργειας για θέρμανση, όπως παρατηρείται συχνά σε τέτοιες περιπτώσεις. Με την εξομάλυνση τέτοιων διαφορών βελτιώνεται κατά πολύ το εσωκλίμα, το οποίο πλέον παρουσιάζει πιο ομοιόμορφες επιφανειακές θερμοκρασίες, με άμεση συνέπεια τη βελτίωση της θερμικής άνεσης.

Αντικαθιστώντας τα υπάρχοντα κουφώματα (σενάριο 5), τα οποία ευθύνονται για μεγάλα ποσοστά θερμοδιαφυγής από το κτιριακό κέλυφος, με θερμομονωτικά κουφώματα και διπλούς υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής, με διάκενο 13mm με αργό συντελεστή θερμικής διαπερατότητας $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, εξοικονομείται αρκετά σημαντικό ποσοστό ενέργειας για θέρμανση, της τάξης 26,57%.

Με τις προτεινόμενες επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας με θερμομόνωση των θερμογεφυρών, της εξωτερικής τοιχοποιίας καθώς και της αντικατάστασης των κουφωμάτων (σενάρια 1, 2, 5), επιτυγχάνεται ένα ποσοστό μείωσης της ενεργειακής ζήτησης σε θέρμανση έως 26,57%, ενώ όσον αφορά την ψύξη για τα ίδια σενάρια, η ενεργειακή ζήτηση αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί, καθώς η μεταφορά θερμότητας στο οριακό υπόστρωμα της γης γίνεται κατά την κατακόρυφη συνιστώσα, οι κατακόρυφες επιφάνειες, όπως οι τοίχοι και τα ανοίγματα, επιδρούν λιγότερο στη συνολική μεταφορά ενέργειας του κτιρίου, από ό,τι οι οροφές. Στα σενάρια όπου προστίθεται επιπλέον θερμομόνωση και στο δώμα (σενάρια 3, 4, 6, 7), αφ' ενός επιτυγχάνεται μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση, αφ' ετέρου εξοικονομείται ενέργεια και για την ψύξη.

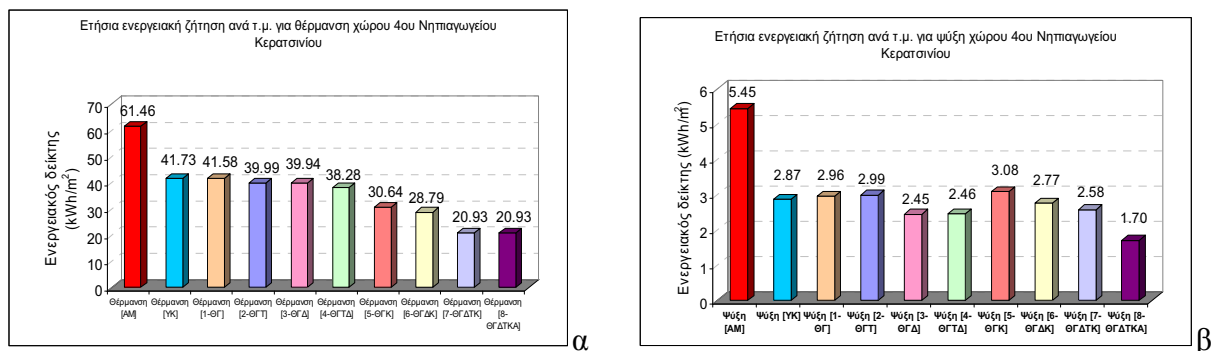
Το χαμηλότερο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας για ψύξη (3,48%) παρατηρείται στο σενάριο 6 (θερμομόνωση θερμογεφυρών, εξωτερικής τοιχοποιίας, δώματος και αντικατάσταση κουφωμάτων), λόγω του ότι δημιουργείται ένα πολύ καλά θερμομονωμένο κτίριο, όπου η θερμότητα από εσωτερικά και ηλιακά κέρδη εγκλωβίζεται στους εσωτερικούς χώρους κατά τους θερινούς μήνες.

Το υψηλότερο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας για θέρμανση παρατηρείται στο σενάριο 7 (θερμομόνωση θερμογεφυρών, δώματος, εξωτερικής τοιχοποιίας και αντικατάσταση κουφωμάτων), σε ποσοστό 47,29%.

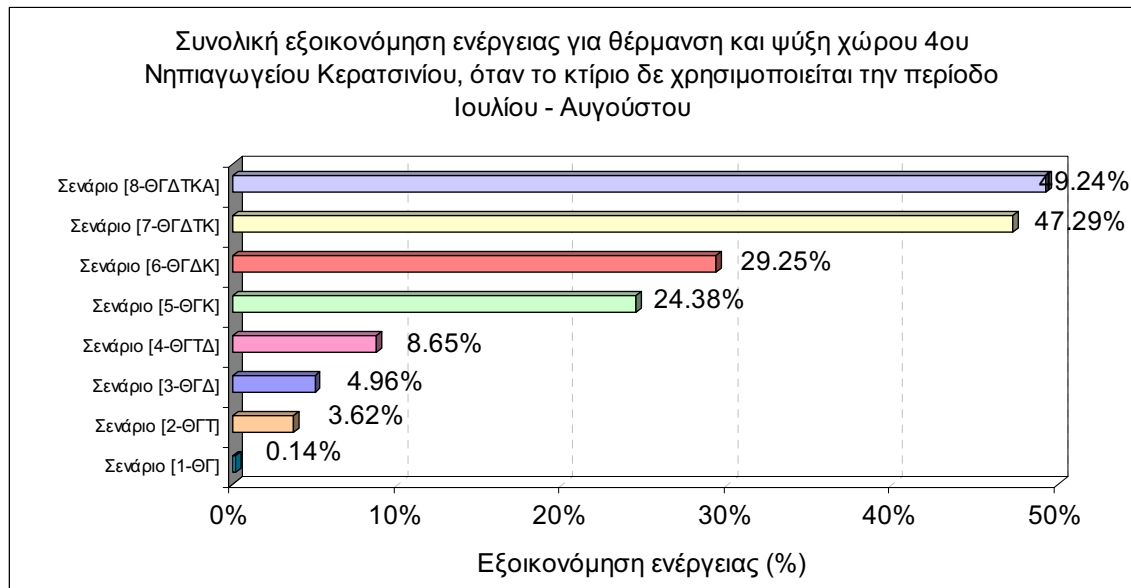
Με την εφαρμογή νυχτερινού αερισμού κατά τη θερινή περίοδο (σενάριο 8), βελτιώνεται σε μεγάλο βαθμό η ενεργειακή κατάσταση του κτιρίου, εξοικονομώντας μεγάλο ποσοστό ενέργειας για ψύξη, της τάξης του 40,77%.

Εκμεταλλευόμενοι τους επικρατούντες Νοτιοδυτικούς ανέμους στην περιοχή κατά την περίοδο Μαΐου – Ιουνίου, οπότε και εφαρμόζεται ο νυχτερινός αερισμός, επιτυγχάνεται χαμηλή θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου κατά τις πρωινές ώρες λειτουργίας του, με την ορθή χρήση των υπαρχόντων ανοιγμάτων. Επιπρόσθετα, η δένδροφύτευση στον περιβάλλοντα χώρο συντελεί στο δροσισμό του εισαγόμενου εξωτερικού αέρα μέσα στο κτίριο, λόγω σκίασης του περιβάλλοντος χώρου και του κτιρίου την ημέρα και εξατμισοδιαπνοή.

Η ζήτηση για θέρμανση και ψύξη καθώς και η εξοικονόμηση ενέργειας ανά σενάριο παρουσιάζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Εικόνα 5: Ετήσια ενεργειακή ζήτηση ανά τ.μ. σε (α) θέρμανση και (β) ψύξη για την υπάρχουσα κατάσταση και τα σενάρια ΕΞΕ



Εικόνα 6: Συνολική εξοικονόμηση ενέργειας για τα εξεταζόμενα σενάρια

3.2. ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Αν και είναι αρκετά χαμηλές οι ηλεκτρικές καταναλώσεις του νηπιαγωγείου, μπορούν να βελτιωθούν ακόμα περισσότερο με τις εξής επεμβάσεις:

- Αντικατάσταση των λαμπτήρων φθορισμού με λαμπτήρες φθορισμού υψηλής απόδοσης τύπου T5 και αντικατάσταση των λαμπτήρων πυρακτώσεως με λαμπτήρες χαμηλής κατανάλωσης και υψηλής φωτεινής απόδοσης (της τάξης των 25 lumen/Watt).
- Κλείσιμο των συσκευών όταν δε χρησιμοποιούνται.

Με αυτά τα μέτρα, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να μειωθεί σε 6,07kWh ημερησίως, με αντίστοιχη εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας της τάξης του 48%.

Η απόδοση του συστήματος θέρμανσης μπορεί επίσης να βελτιωθεί σε ικανοποιητικό βαθμό, εάν θερμομονωθούν τα αμόνωτα και ελαττωματικώς μονωμένα μέλη των σωλήνων διανομής του ζεστού νερού.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή των αρχών του ορθολογικού ενεργειακού σχεδιασμού, αλλά και η εκτενής διερεύνηση της απόδοσης του συνδυασμού των συστημάτων υαλοστασίων του κτιριακού κελύφους έχει ως στόχο τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου.

Η βελτίωση της θερμομόνωσης του κτιριακού κελύφους και η αποφυγή θερμογεφυρών επιφέρουν σημαντικά ενεργειακά οφέλη στο κτίριο συνολικά. Επί πλέον, τα βελτιωμένα συστήματα υαλοστασίων εξασφαλίζουν σημαντική μείωση της ενεργειακής ζήτησης για την περίοδο θέρμανσης καθώς και για την περίοδο ψύξης. Το όφελος κυμαίνεται ανάλογα με το είδος του υαλοπίνακα, τον προσανατολισμό και τη χρήση του χώρου. Τέλος, ο νυχτερινός αερισμός είναι ικανός να μειώσει κατά πολύ το φορτίο ψύξης μιας πολύ καλά θερμομονωμένης κατασκευής.

Είναι σημαντικό να αναφερθούν και τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν κυρίως από την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται κατά τη θέρμανση και ψύξη του χώρου. Για το βέλτιστο σενάριο (σενάριο 8) παρατηρείται μείωση του μονοξειδίου του άνθρακα κατά 47,95%, του διοξειδίου του θείου κατά 41,06% και του διοξειδίου του άνθρακα κατά 48,18%.

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας του κτιρίου για ηλεκτρισμό μπορεί να μειωθεί περαιτέρω κατά 48,00%, με αντικατάσταση των υπαρχόντων λαμπτήρων με λαμπτήρες χαμηλής κατανάλωσης και με ελαχιστοποίηση του φορτίου “stand-by”.

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται η μηνιαία ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση και ψύξη σε kWh/m² ετησίως α) για την υπάρχουσα κατάσταση και β) για το σενάριο με τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας (Σενάριο 8), κατά το οποίο θερμομονώνεται το κτιριακό κέλυφος, αντικαθίστανται οι υαλοπίνακες και εφαρμόζεται νυχτερινός αερισμός τη θερινή περίοδο. Για τη συγκεκριμένη επέμβαση το ποσοστό μείωσης της ενεργειακής ζήτησης για θέρμανση και ψύξη, είναι της τάξης του 49,24%.

Πίνακας 1: Ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση και ψύξη και εξοικονόμηση ενέργειας, για υπάρχουσα κατάσταση και βέλτιστο κτιριακό κέλυφος			
Μήνας	Ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση και ψύξη, υπάρχουσα κατάσταση (kWh/m ²)	Ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση και ψύξη, σενάριο 8 (kWh/m ²)	Ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη
Ιανουάριος	10,22	5,16	50,49%
Φεβρουάριος	8,66	4,39	50,69%
Μάρτιος	6,88	3,42	49,71%

Πίνακας 1: Ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση και ψύξη και εξοικονόμηση ενέργειας, για υπάρχουσα κατάσταση και βέλτιστο κτιριακό κέλυφος			
Μήνας	Ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση και ψύξη, υπάρχουσα κατάσταση (kWh/m ²)	Ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση και ψύξη, σενάριο 8 (kWh/m ²)	Ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη
Απρίλιος	2,47	1,26	51,01%
Μάιος	0,58	0,35	60,34%
Ιούνιος	1,54	0,91	59,09%
Ιούλιος	0,00	0,00	-
Αύγουστος	0,00	0,00	-
Σεπτέμβριος	1,02	0,67	65,69%
Οκτώβριος	1,19	0,62	52,10%
Νοέμβριος	4,02	1,93	48,01%
Δεκέμβριος	8,01	3,93	49,06%
Σύνολο	44,60	22,64	50,76%

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Οργανισμός Σχολικών Κτιρίων, 'Εξυπνο Σχολείο - Πενταετές Πρόγραμμα Δράσης', www.osk.gr
2. Εθνική Στατιστική Υπηρεσία, 'Απογραφή οικοδομών – κτιρίων', Αθήνα, 2001.
3. ΚΑΠΕ 'Οδηγίες για Θερμική – Οπτική Άνεση και Εξοικονόμηση Ενέργειας σε Δημόσια Σχολεία', Πικέρμι, 1996.
4. Κωσταρέλα, Π., και Δημούδη, Α., 'Ενεργειακή Συμπεριφορά των Σχολικών Κτιρίων με έμφαση στη Γ' Κλιματική Ζώνη', 8^ο Συνέδριο ΙΗΤ, σελ. 1-7, Θεσσαλονίκη, 2006.

ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΚΤΙΡΙΟ ΤΟΥ ΕΘΝΙΚΟΥ ΘΕΑΤΡΟΥ ΣΤΗ ΡΟΔΟ

*Μαρία Κίκηρα^[1], Ελευθερία Αλεξανδρή^[1], Λένα Λαμπροπούλου^[1], Ευστάθιος
Τσελεπής^[2], Άννα Παρασκευοπούλου^[3], Κυριάκος Μάγος^[3]*

[1] Τμήμα Κτιρίων, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, 19009 Πικέρμι,
e-mail: mkiki@cres.gr

[2] Τμήμα Τμήμα Φ/Β Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών
Ενέργειας, 19009 Πικέρμι, e-mail: stselep@cres.gr

[3] Διεύθυνση Προστασίας της Μεσαιωνικής Πόλης του Δήμου Ροδίων, Ρόδος,
e-mail: rho-med@otenet.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εφαρμογή μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας σε ιστορικά κτίρια παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους, όπως η αρχιτεκτονική τους μορφή, η τυπολογία και η παλαιότητα της κατασκευής τους, ο περιορισμός των δυνατοτήτων επεμβάσεων επί των όψεών τους, η ιδιαίτερη χρήση και λειτουργία τους. Εξετάζοντας ένα ιστορικό κτίριο είναι σημαντική η πλήρης καταγραφή της υπάρχουσας κατάστασης καθώς και η κατανόηση και η ανάδειξη των βιοκλιματικών στοιχείων του αρχικού σχεδιασμού του κτιρίου. Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκε η ενεργειακή μελέτη του ΚΑΠΕ για την αποκατάσταση και τον εκσυγχρονισμό του Εθνικού Θεάτρου Ρόδου (ΕΘΡ), εστιάζοντας κυρίως σε θέματα κελύφους και εξοικονόμησης ενέργειας για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό, καθώς και ενσωμάτωσης Φ/Β στην οροφή του κτιρίου.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το Εθνικό Θέατρο Ρόδου (ΕΘΡ) είναι κτίριο της δεκαετίας του 1930, χτισμένο κατά τη διάρκεια της Ιταλικής κατοχής, με σχέδια του αρχιτέκτονα Armando Bernabiti, το οποίο λειτουργούσε ως λυρικό θέατρο. Έχει ορθογωνική κάτοψη και μπορεί να θεωρηθεί ως κατασκευή «διπλού κελύφους», με τους βοηθητικούς χώρους να χρησιμοποιούνται ως χώροι ανάσχεσης μεταξύ της σκηνής και του περιβάλλοντος χώρου. Στον αρχικό σχεδιασμό του κτιρίου είχε προβλεφθεί νυχτερινός φυσικός αερισμός του χώρου της σκηνής και της πλατείας, ο οποίος, μετά από επεμβάσεις στο κτιριακό κέλυφος την περίοδο 1972-1977 εγκαταλείφθηκε. Η ανάλυση σκιασμού από τις προεξοχές του κτιρίου έδειξε ότι κατά το σχεδιασμό είχε δοθεί ιδιαίτερη μνεία ώστε τα ανοίγματα να σκιάζονται τη θερινή περίοδο και να επιτρέπεται η είσοδος του ήλιου στους εσωτερικούς χώρους του κτιρίου τη χειμερινή περίοδο.

Στόχος της ενεργειακής μελέτης του Εθνικού Θεάτρου της Ρόδου [1] είναι η επαναφορά των βιοκλιματικών στοιχείων του αρχικού σχεδιασμού του κτιρίου, με τη χρήση νέων υλικών και τεχνολογιών, με στόχο τη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό. Οι προτεινόμενες επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας στο κτίριο βασίστηκαν κυρίως στα αποτελέσματα της ενεργειακής επιθεώρησης κελύφους με τη βοήθεια της θερμογράφησης, και των παραμετρικών αναλύσεων με προσομοίωση. Η ανάλυση επικεντρώθηκε στα προτεινόμενα υλικά αδιαφανών και διαφανών στοιχείων κελύφους και στη λειτουργία του φυσικού αερισμού μέσω των παλαιών και νέων ανοιγμάτων στο κτίριο, λαμβάνοντας υπ' όψιν τη νέα του χρήση ως κτίριο θεάτρου και πολιτιστικών εκδηλώσεων.

Οι επεμβάσεις που προτείνονται είναι τέτοιες, ώστε να επιτυγχάνεται η διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς, η ανάδειξη της αισθητικής και αρχιτεκτονικής δυναμικής, με έμφαση στη λειτουργικότητα και την ενσωμάτωση των αρχών ενεργειακού σχεδιασμού, με απώτερο στόχο η συνολική μελέτη αποκατάστασης του κτιρίου του Εθνικού Θεάτρου Ρόδου να αποτελέσει πρότυπο μιας σύγχρονης και ουσιαστικής προσέγγισης για τη βέλτιστη αξιοποίηση των ιστορικών κτιρίων.

1.1. Η Ευρωπαϊκή πρωτοβουλία για την ενεργειακή αποδοτικότητα στα ιστορικά κτίρια και στις περιοχές με ιστορικό χαρακτήρα

Η Κοινοτική Οδηγία 2002/91/EC για την ενεργειακή αποδοτικότητα των κτιρίων, η οποία ενσωματώθηκε στην Ελληνική νομοθεσία των Μάιο του 2008 με τον Νόμο 3661/2008 και είναι υποχρεωτική για όλα τα νέα και υφιστάμενα (όταν υφίστανται πράξη πώλησης, μίσθωσης ή ριζικής ανακαίνισης) με εξαίρεση τα ιστορικά κτίρια, βάσει του Άρθρου 11 (Εξαιρέσεις), λόγω του ότι η συμμόρφωσή τους στις σύγχρονες απαιτήσεις πιθανόν να αλλοιώνει κατά τρόπο μη αποδεκτό τον χαρακτήρα ή την εμφάνισή τους. Η προσπάθεια ωστόσο, σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, για την αξιοποίηση και ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων πολιτιστικής κληρονομιάς είναι σημαντική, είτε μέσω ερευνητικών και τεχνολογικών προγραμμάτων είτε μέσω εθνικών και διακρατικών δράσεων. Το τριετές νέο Ευρωπαϊκό έργο SECHURBA [2] αφορά στη διερεύνηση και τον καθορισμό των δυνατοτήτων ενεργειακών επεμβάσεων σε κτίρια και πόλεις ιστορικού χαρακτήρα. Εξετάζεται η παράμετρος της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς, των τεχνικών και του δυναμικού μιας σειράς παρεμβάσεων, των νομοθετικών και πολεοδομικών διατάξεων και των οικονομικών ενισχύσεων, δίνοντας κατευθύνσεις και προοπτική για εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα σημαντικό τμήμα του κτιριακού αποθέματος, όπως τα ιστορικά κτίρια, σε Ευρωπαϊκή κλίμακα.

2. ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ

2.1. Υφιστάμενη Κατάσταση

Το κτίριο έχει φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 35 – 45cm, ενώ ως στοιχεία πλήρωσης έχουν χρησιμοποιηθεί πλήρεις οπτόπλινθοι, πάχους 27,5cm με εξωτερικό επίχρισμα συνολικού πάχους 4,5cm που μιμείται επικάλυψη πέτρας, τη λεγόμενη «φίντα πέτρα» (1 cm στην εξωτερική παρειά του επιχρίσματος). Εσωτερικά το επίχρισμα είναι από συμβατικό κονίαμα. Η μορφή των παραθύρων και των πλαισίων αποτελούν ένα βασικό κομμάτι από τον χαρακτήρα των όψεων του κτιρίου. Τα παράθυρα βρίσκονται σε εσοχές πλάτους 40-60-95cm (σε αρκετά μικρότερη εσοχή βρίσκονται τα παράθυρα των καμπύλων τμημάτων του κτιρίου), το οποίο αποτελεί ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της αρχιτεκτονικής των ιστορικών κτιρίων, και επιτυγχάνεται σκίαση τη θερινή περίοδο της τάξης του 60-100%. Οι υαλοπίνακες είναι μονοί, με ξύλινα πλαίσια, ενώ καμπύλα ανοίγματα καλύπτονται με αλάβαστρο με ξύλινα πλαίσια. Η μικρή αναλογία της επιφάνειας των ανοιγμάτων σε σχέση με τη συνολική εξωτερική επιφάνεια του κτιρίου είναι χαρακτηριστική του κτιρίου με ποσοστά από 7% στη δυτική, 14% στην ανατολική πλευρά, 16% στη βόρεια και 20% στη νότια όψη του κτιρίου. Οι κύριοι χώροι στο κτίριο του θεάτρου είναι μεγάλου ύψους και όγκου, με αυξημένες ανάγκες για θέρμανση. Χαρακτηριστικό του σχεδιασμού του κτιρίου είναι ότι ο κύριος χώρος του, η σκηνή, είναι προστατευμένη από το εξωτερικό περιβάλλον από ενδιάμεσους, βοηθητικούς και χρηστικούς χώρους που την περιβάλλουν (καμαρίνια, χώροι κυκλοφορίας, αναψυκτήριο, γραφεία, εκθεσιακούς χώρους κοκ), ενώ στην οροφή της είχαν προβλεφθεί θυρίδες αερισμού, καθώς και ανοιγόμενη υάλινη, δικλινής στέγη, η οποία εξασφάλιζε τόσο φυσικό φωτισμό, όσο και αερισμό.

Το κτίριο υπέστη σοβαρές επεμβάσεις κατά το διάστημα 1972-77, των οποίων κύριος στόχος

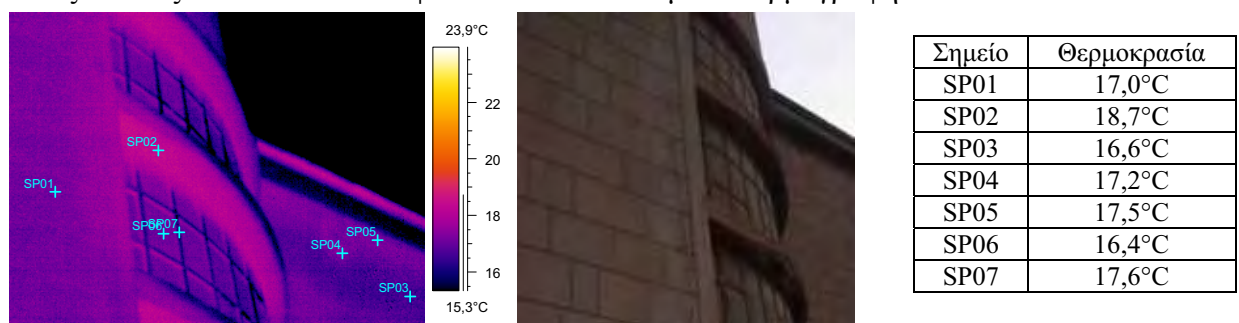
ήταν η εγκατάσταση κλιματισμού, η οποία έγινε εις βάρος των αρχιτεκτονικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών του κτιρίου, καθώς και συστημάτων φυσικού αερισμού που είχαν προβλεφθεί κατά τον αρχικό σχεδιασμό του κτιρίου. Οι φεγγίτες του κτιρίου καλύφθηκαν με οπτοπλινθοδομή, ενώ η υάλινη στέγη αντικαταστάθηκε από πλάκα ΩΣ με επικάλυψη αλουμινίου. Το μηχανοστάσιο και οι διελεύσεις των αγωγών κατέλαβαν υφιστάμενους χώρους του θεάτρου και σε πολλά σημεία χρειάστηκε να κατεδαφιστούν πλάκες, τοίχοι ή κλιμακοστάσια. Αυτές οι επεμβάσεις έχουν διαφοροποιήσει στοιχεία του φέροντα οργανισμού, αρχιτεκτονικά και ενεργειακά χαρακτηριστικά του κτιρίου.

2.2. Ενεργειακή Επιθεώρηση

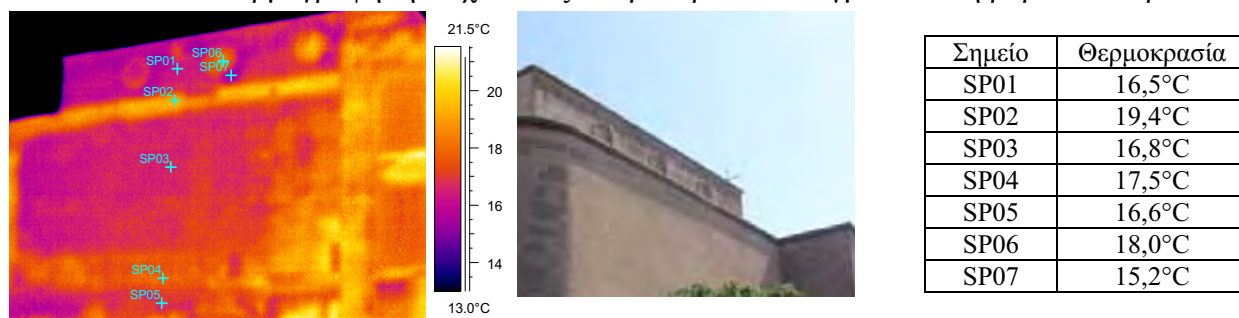
Από τη θερμογράφιση που διεξήχθη στο κέλυφος του κτιρίου, διαπιστώθηκαν τα εξής, όσον αφορά την κατάσταση του κελύφους:

- Τα δομικά υλικά του κελύφους του κτιρίου έχουν υποστεί φθορές από την αποκόλληση σοβά κι από την υγρασία που έχει διεισδύσει στο εσωτερικό τους, ιδιαίτερα στις ανώτερες στάθμες του κτιρίου.
- Σε πολλά σημεία της τοιχοποιίας εντοπίζονται συγκεντρώσεις υδροποιημένων υδρατμών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση θερμογεφυρών σε αυτά τα σημεία και τη φθορά του υλικού, λόγω χημικών διεργασιών.
- Ιδιαίτερα όσον αφορά τα φέροντα στοιχεία της κατασκευής, πρέπει άμεσα να προστατευθούν, ώστε να μη διαβρωθεί ο οπλισμός και καταστραφεί το κτίριο.
- Τα ανοίγματα (μονοί υαλοπίνακες και ξύλινα πλαίσια) ευθύνονται για μεγάλες ποσότητες θερμοδιαφυγής από το κτιριακό κέλυφος, παρόλη τη μικρή τους επιφάνεια. Τα ξύλινα πλαίσια παρουσιάζουν πολύ χαμηλότερες απώλειες θερμότητας από τους μονούς υαλοπίνακες. Αντικατάσταση των μονών υαλοπινάκων με διπλούς και παρόμοια πλαίσια θα αποφέρει σημαντικά ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας.
- Γενικά πρόκειται για κατασκευή πολύ καλής ποιότητας, όπου δεν παρατηρούνται θερμογέφυρες στις ακμές συναρμογής των επιφανειών, παρόλη την ηλικία της.

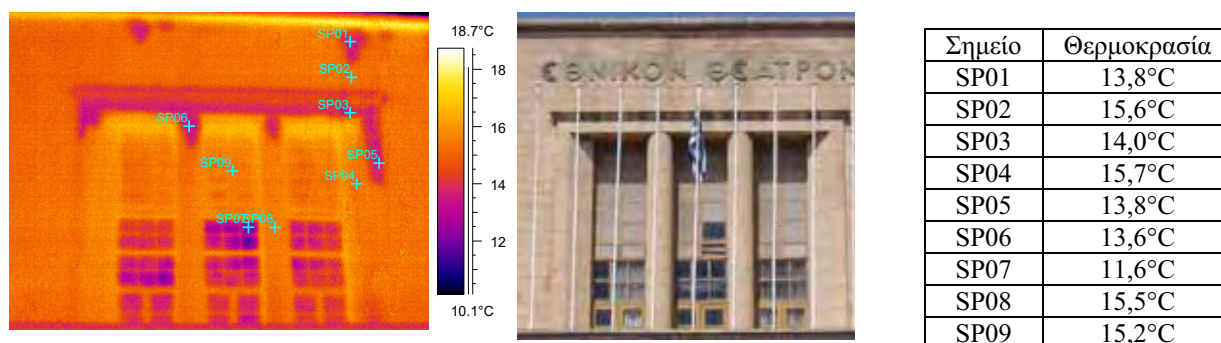
Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται αποτελέσματα θερμογραφήσεων.



Εικόνα 2: Θερμογράφιση τοιχοποιίας αλαβάστρινων ανοιγμάτων στη βόρεια πλευρά



Εικόνα 3: Θερμογράφιση ανώτατης στάθμης νότιας όψης



Εικόνα 4: Θερμογράφιση ανατολικών ανοιγμάτων από μόνο υαλοπίνακα, άνωθεν εισόδου

3. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

3.1. Θερμική Απόδοση Κελύφους

Για τις ανάγκες της ενεργειακής μελέτης το κτίριο χωρίστηκε συνολικά σε εικοσιέξι (26) θερμικές ζώνες, με μεγαλύτερο όγκο να καταλαμβάνει η ζώνη της πλατείας, της σκηνής και των χώρων εκτόνωσης, και δευτερευόντως οι χώροι γραφείων, τα καμαρίνια, το αναψυκτήριο κλπ. Το κτίριο προσομοιώθηκε για ετήσια λειτουργία και για λειτουργία η οποία διακόπτεται τον Ιούλιο και τον Αύγουστο. Η κατώτατη θερμοκρασία για ψύξη όλων των χώρων έχει θεωρηθεί στους 26°C, ενώ η ανώτατη θερμοκρασία για θέρμανση είναι 20°C για την πλειονότητα των χώρων.

Πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση με 7 σενάρια απόδοσης, εξετάζοντας το όφελος από την προσθήκη θερμομόνωσης εξωτερικά της τοιχοποιίας με 3cm (Σεν.1) και εσωτερικά της τοιχοποιίας (Σεν.2) και του δώματος 5cm, αντικατάσταση υαλοπινάκων με απλούς διπλούς¹ (Σεν.3) και βελτιωμένους διπλούς² (Σεν.4), συνδυασμός των παραπάνω -κρατώντας τη θερμομόνωση εξωτερικά της τοιχοποιίας και τους βελτιωμένους υαλοπίνακες- (Σεν.5), εφαρμογή νυχτερινού αερισμού με επαναφορά της λειτουργίας των φεγγιτών στην κατακόρυφη τοιχοποιία (Σεν.6) και τέλος, συνδυασμός των ανωτέρω, με επαναφορά της λειτουργίας της δικλινούς στέγης για φυσικό αερισμό (Σεν.7).

3.1.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Η ζήτηση σε θέρμανση του κτιρίου στην υφιστάμενη κατάσταση είναι 31,58kWh/m² ετησίως, ενώ για ψύξη 32,93kWh/m² ετησίως όταν βρίσκεται σε λειτουργία όλο το χρόνο και τις 11,52kWh/m² ετησίως όταν δε λειτουργεί την περίοδο Ιουλίου-Αυγούστου. Παρατηρείται ότι χάρη στον αρχικό σχεδιασμό «διπλού κελύφους», όπου προστατεύονται οι κύριοι χώροι, το κτίριο και στην παρούσα κατάσταση του δεν είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρο.

Με την προσθήκη θερμομόνωσης εσωτερικά της εξωτερικής τοιχοποιίας του κτιρίου και εξωτερικά στην οροφή του (Σεν.1) επιτυγχάνεται συνολική εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 39,41% για 12μηνη χρήση του κτιρίου, με τον ενεργειακό δείκτη να μειώνεται στις 21,55kWh/m² ετησίως για θέρμανση και 17,54kWh/m² ετησίως για ψύξη. Το όφελος είναι λιγότερο κατά 3% σε περίπτωση 10μηνης χρήσης. Λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας των εσωτερικών τοιχοποιιών του κτιρίου (κυρίως της τοιχοποιίας περιμετρικά της σκηνής), η τοποθέτηση της μόνωσης εσωτερικά ή εξωτερικά της εξωτερικής τοιχοποιίας δεν επηρεάζει τη θερμική αδράνεια του κτιρίου. Για τη διατήρηση των διαστάσεων των εσωτερικών χώρων, επιλέχθηκε η εφαρμογή της εξωτερικής μόνωσης, λαμβάνοντας υπ'όψιν ότι η εφαρμογή του τελικού επιχρίσματος είναι μια παρέμβαση που θα γίνει στο πλαίσιο της συντήρησης του κτιρίου και δεν αλλοιώνει την αισθητική του.

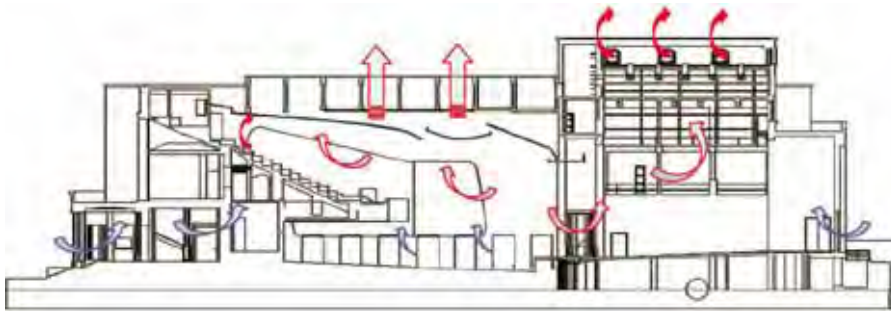
¹ Πάχος 6/6/6, Συντελεστής Θερμοπερατότητας: 3.23 Wm⁻²K⁻¹, Συντελεστής Ανακλαστικότητας Rin=14%, Solar factor g=0.72

² Πάχος 6/12/6, Συντελεστής Θερμοπερατότητας: 1.63 Wm⁻²K⁻¹, Συντελεστής Ανακλαστικότητας Rin=11%, Solar factor g=0.39

Καθώς το ποσοστό των ανοιγμάτων στις όψεις του κτιρίου είναι περιορισμένο, η αντικατάστασή των μονών υαλοπινάκων με διπλούς με θερμομονωτικά πλαίσια (Σεν.3) και με βελτιωμένους διπλούς με θερμομονωτικά πλαίσια (Σεν.4), αφήνοντας και στις δύο περιπτώσεις το υπόλοιπο κέλυφος αμόνωτο, επιφέρει περιορισμένο όφελος της τάξης του 2,95% και 4,29% εξοικονόμηση ενέργειας αντίστοιχα. Για 10μηνιαία χρήση το όφελος είναι μεγαλύτερο, της τάξης του 4,04% με 5,66% για το σενάριο 3 και 4 αντίστοιχα, λόγω του ότι εξαιρούνται οι θερμοί καλοκαιρινοί μήνες.

Το Σενάριο 5 παρουσιάζει τη βέλτιστη θερμική συμπεριφορά από πλευράς κελύφους, χωρίς να λαμβάνεται υπ'όψιν ο νυχτερινός αερισμός. Η εξοικονόμηση ενέργειας με το θερμομονωμένο εξωτερικά κέλυφος και τα βελτιωμένα πλαίσια και υαλοπίνακες φτάνει το 45,98%, με τη συνολική κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη να μειώνεται στις 34,84kWh/m² ετησίως για 12μηνιαία χρήση και 23,71kWh/m² ετησίως για 10μηνιαία χρήση, με αντίστοιχη εξοικονόμηση ενέργειας 44,99%.

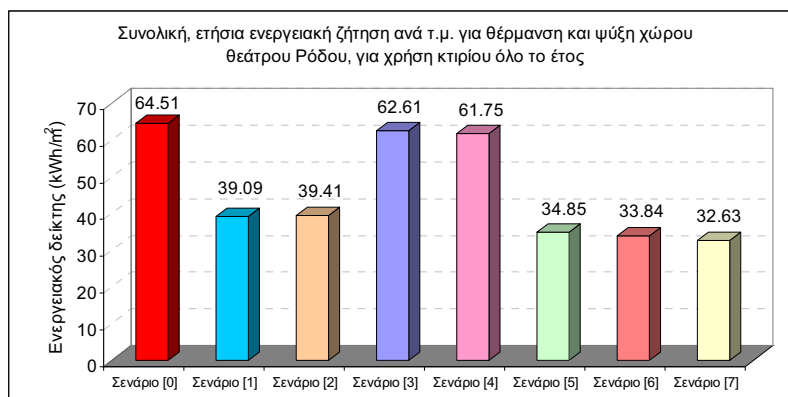
Στο Σενάριο 6, μειώνεται το φορτίο ψύξης λόγω νυχτερινού αερισμού (από 23:00 έως 6:00 τη θερινή περίοδο) και επαναλειτουργίας των φεγγιτών της κατακόρυφης τοιχοποιίας κατά 2,5% σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο. Τέλος, με την επαναφορά της λειτουργίας της δικλινούς στέγης στην οροφή (Σεν.7) για την υποβοήθηση του κατακόρυφου νυχτερινού αερισμού και την απαγωγή θερμού αέρα από τα υψηλότερα στρώματα του κτιρίου, παρουσιάζει τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας για ψύξη (βλ. παρακάτω διάγραμμα φυσικού αερισμού στο εσωτερικό του κτιρίου).



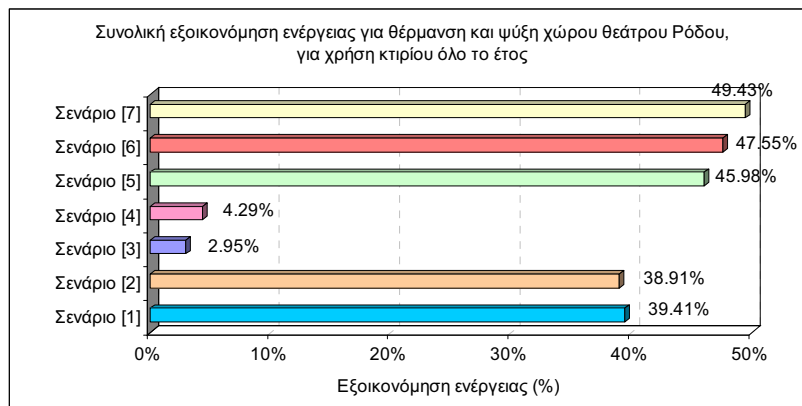
Εικόνα 5: Ροή του αέρα, ενδεικτικά μέσα σε κάποιους χώρους, από τα προβλεπόμενα ειδικά ανοίγματα στην περίμετρο και στην οροφή του κτιρίου.

Το φορτίο ψύξης μειώνεται στις 14,45kWh/m² ετησίως για 12μηνιαία χρήση και 4,47kWh/m² για 10μηνιαία χρήση, με το φορτίο θέρμανσης να είναι στις 18,17kWh/m² ετησίως. Η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται είναι της τάξης του 49,43% για 12μηνιαία χρήση και 47,46% για 10μηνιαία χρήση, με αντίστοιχες συνολικές ετήσιες ανάγκες για θέρμανση και ψύξη της τάξης των 32,63kWh/m² και 22,65kWh/m², αντίστοιχα.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα συνολικά αποτελέσματα από την παραμετρική ανάλυση.



Εικόνα 6: Ετήσιος ενεργειακός δείκτης θέρμανσης και ψύξης για λειτουργία όλο το χρόνο



Εικόνα 7: Ετήσια Ε.Ε. για θέρμανση και ψύξη για λειτουργία όλο το χρόνο

3.2. Φυσικός Φωτισμός

Παράλληλα με τη μελέτη θερμικής απόδοσης κελύφους, εξετάστηκαν οι συνθήκες φωτισμού σε επιλεγμένους κύριους χώρους του κτιρίου και διερευνήθηκε η καταλληλότητα των συστημάτων, ως προς την παροχή επαρκούς στάθμης φωτισμού στους εσωτερικούς χώρους και ως προς την κατανομή του φυσικού φωτισμού, για την αποφυγή προβλημάτων θάμβωσης.

Ως προς τα φωτομετρικά χαρακτηριστικά των επιφανειών, εξετάστηκαν επιφάνειες μέσης ανακλαστικότητας και ως προς τα φωτοδιαπερατά υλικά λήφθηκαν υπ' όψιν τα προτεινόμενα στη θερμική ανάλυση κελύφους υαλοστάσια, για συνδυασμένα οπτικά και θερμικά οφέλη, με Συντελεστή Φωτοδιαπερατότητας $T = 71\%$ και Συντελεστή Ανακλαστικότητας $R = 11\%$.

Λόγω της συμμετρικής κατανομής των ανοιγμάτων, η κατανομή του φωτισμού είναι ομοιόμορφη και δεν προκαλούνται φαινόμενα θάμβωσης στο χώρο. Ωστόσο, στις ζώνες γραφείου με μεγάλα υαλοστάσια (κυρίως νότια), θα απαιτηθεί η προστασία τους για την αντιμετώπιση θαμβώσεων στο επίπεδο εργασίας, με την τοποθέτηση εσωτερικών κατακόρυφων διατάξεων κατεύθυνσης του φωτισμού (κατακόρυφα στόρια) και τη χρήση χρωμάτων (για τους τελικούς χρωματισμούς της εσωτερικής τοιχοποιίας) με υψηλό βαθμό ανακλαστικότητας (λευκά, υπόλευκα).

Όσον αφορά στην εξοικονόμηση ενέργειας, μέσω της εκμετάλλευσης του φυσικού φωτισμού, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η εγκατάσταση αυτόματου συστήματος ηλεκτρονικού ελέγχου, για τη σύζευξη φυσικού / τεχνητού φωτισμού, με αισθητήρες φυσικού φωτισμού και κατάλληλη ομαδοποίηση των φωτιστικών σωμάτων, ώστε να είναι εφικτή είτε η αυξο/μείωση (dimming) της φωτεινής ροής, είτε η αφή/σβέση (on/off) ανά ομάδες φωτιστικών σωμάτων. Το σύστημα θα ενταχθεί στο κεντρικό σύστημα ελέγχου (BEMS) του κτιρίου.

4. ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΟ ΚΤΙΡΙΟ

4.1. Επιλογή επιφάνειας τοποθέτησης

Η ενσωμάτωση ή τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) γεννητριών θα πρέπει να εναρμονίζεται με την αισθητική του κτιρίου. Για το λόγο αυτό προτάθηκε η τοποθέτησή τους σε τμήμα της στέγης του κτιρίου, όπου δε θα είναι εμφανή από το κοινό και δεν θα επηρεάζουν την αρχιτεκτονική του κτιρίου. Ο προσανατολισμός των πλαισίων είναι νότιος με $3-5^\circ$ κατακόρυφη κλίση. Τοποθετούνται σε απόσταση από την ανωδομή – προεξοχή δώματος για την αποφυγή σκίασης και λόγω του ότι δεν αποτελούν δομικό στοιχείο του κτιρίου, τοποθετούνται σε απόσταση πάνω από 10cm από την σκεπή, με κενά ανάμεσα στις σειρές Φ/Β πλαισίων για τον αερισμό τους.

Επεμβαίνοντας σε υφιστάμενο κτίριο, είναι σημαντικό τα φωτοβολταϊκά να αγκιστρωθούν με κατάλληλη μέθοδο ώστε να μην πληγωθεί η μόνωση και η στεγάνωση του κτιρίου.

4.2. Περιγραφή συστήματος

Λαμβάνοντας υπόψη την ηλεκτρική κατανάλωση του κτιρίου, τη διαθέσιμη μη ορατή από το κοινό ομοιογενή επιφάνεια που δεν σκιάζεται και την οικονομική επένδυση στο σύστημα, εξετάστηκε σύστημα Φ/Β με ενεργή επιφάνεια 100 m² και συνολικό εμβαδόν κάλυψης περίπου 125 m². Η συνολική εγκατεστημένη ισχύ αιχμής των φωτοβολταϊκών είναι 13,6 kWp και η εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή ενέργειας ανέρχεται σε 18 MWh, με κόστος αγοράς και εγκατάστασης της τάξης των 100.000 Ευρώ.

Τα Φ/Β συστήματα που προτείνονται είναι σταθερής βάσης με Φ/Β πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) και υψηλής απόδοσης μονοφασικούς αντιστροφείς (Συντελεστής Ευρωπαϊκής απόδοσης > 93%), οι οποίοι θα τοποθετηθούν εξωτερικά ή εσωτερικά ανάλογα με την μελέτη εγκατάστασης. Τέλος, κρίνεται σημαντικό να προβλεφθεί σύστημα καταγραφής και παρακολούθησης της λειτουργίας του Φ/Β συστήματος σε υπολογιστή ή και οθόνη παρουσίασης της παραγωγής ηλεκτρισμού που θα βρίσκεται στο κτίριο του Θεάτρου και το οποίο θα είναι ορατό στο κοινό, με στόχο την πληροφόρηση και προώθηση της τεχνολογίας.

5. ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΗΣ ΣΤΟ ΕΘΡ

Το ΕΘΡ, όπως αναλύθηκε παραπάνω, συγκεντρώνει ως κτίριο τα αναγκαία στοιχεία για να χαρακτηριστεί «μνημείο» της νεότερης ιστορίας του νησιού. Δεν πρόκειται μόνο για την αδιαμφισβήτητη ιστορική του αξία, αλλά και για την ποιότητα (κυρίως λόγω της θέσης και του μεγέθους του) και του συμβολισμού του για τον γηγενή πληθυσμό. Το γεγονός ότι το κτίριο είναι και κηρυγμένο μνημείο προσδίδει περισσότερους περιορισμούς (ή δυνατότητες) στην αντιμετώπιση του.



Εικόνα 7: Ανατολική όψη (αριστερά) και νότια όψη (δεξιά) του κτιρίου

Το Εθνικό Θέατρο Ρόδου έχει υποστεί ελάχιστες αρχιτεκτονικές ή άλλες επεμβάσεις στις όψεις του. Είναι ευτύχημα ότι οι καταστροφικές επεμβάσεις κατά τη διάρκεια της στρατιωτικής δικτατορίας δεν προχώρησαν καθόλου στο εξωτερικό του. Ουσιαστικά η αρχική του μορφή παραμένει αναλλοίωτη μέχρι σήμερα, γεγονός που επιβεβαιώνεται αν συγκρίνουμε φωτογραφίες του κτιρίου της περιόδου 1938 -1943 και των επόμενων δεκαετιών μέχρι σήμερα.

Οι κατευθύνσεις που έθεσε η μελέτη αποκατάστασης του ΕΘΡ αναφέρονται τόσο στην:

- Αποκατάσταση και ανάδειξη της ιστορικής φυσιογνωμίας του μνημείου στο πλαίσιο της θεσμοθετημένης προστασίας του κτιρίου. Ανάδειξη του ιδιαίτερου ύφους και της αισθητικής του ως μνημείου αρχιτεκτονικής με την απομάκρυνση αυθαίρετων στοιχείων νεότερων επεμβάσεων που αλλοιώνουν τον αρχικό του χαρακτήρα, την αποκάλυψη και συντήρηση των αρχιτεκτονικών στοιχείων της πρώτης φάσης κατασκευής όπου σώζονται και γενικότερα την αποκατάσταση και αναβάθμιση των εσωτερικών χώρων του κτιρίου.
- Αναβάθμιση στα πλαίσια του υφιστάμενου κελύφους της κτιριακής υποδομής και του εξοπλισμού των χώρων του θεάτρου. Εκσυγχρονισμός των εγκαταστάσεών του και

βελτιστοποίηση της λειτουργικότητάς του αλλά και υιοθέτηση των αρχών της βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής που περιλαμβάνονταν στον αρχικό του σχεδιασμό με στόχο τον ενεργειακό του εξορθολογισμό και τη μείωση του κόστους λειτουργίας.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το βασικό σχεδιασμό και για το προτεινόμενο σενάριο 7. Συμπεραίνεται ότι η ενεργειακή αναβάθμιση του κτιριακού κελύφους του θεάτρου της Ρόδου, για τα σενάρια εξοικονόμησης ενέργειας που εξετάστηκαν, για τις λειτουργίες των χώρων που θεωρήθηκαν και για τις αντίστοιχες θερμοκρασίες θέρμανσης και ψύξης των χώρων, είναι ικανή να μειώσει τις ενεργειακές ανάγκες σε θέρμανση και ψύξη του χώρου κατά το ήμισυ του φορτίου που θα είχε, αν το κτίριο παρέμενε ως έχει σήμερα.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι όλες οι επεμβάσεις στο κτίριο γίνονται με στόχο τη διατήρηση της αρχιτεκτονικής μορφολογίας και τη βελτιστοποίηση της θερμικής απόδοσης του υφιστάμενου κελύφους και οι τελικές επεμβάσεις θα πρέπει να ισορροπούν μεταξύ των συνθηκών αερισμού για την ‘αναπνοή’ του κτιρίου και της κατάλληλης προσθήκης μόνωσης για την αποφυγή προβλημάτων εμφάνισης έντονης υγρασίας στα δομικά στοιχεία του κτιρίου. Επιπρόσθετα, η διατήρηση των διαδρόμων πλευρικά της πλατείας και των βοηθητικών χώρων είναι ένα σημαντικό στοιχείο, εφόσον λειτουργούν ως ζώνες ανάσχεσης για τον περιορισμό των θερμικών απωλειών από τον μεγάλο όγκο του χώρου της πλατείας. Η αυξημένη θερμική μάζα του κτιρίου – ενισχύοντάς την με το διπλό κέλυφος - είναι από τα βασικότερα στοιχεία της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου και διατηρείται καθολικά στις προτάσεις βελτίωσης.

Τέλος, πρόσθετα στοιχεία τα οποία επηρεάζουν την απόδοση του κτιρίου είναι η διαμόρφωση του περιβάλλοντος χώρου του κτιρίου (χρήση βλάστησης) με την οποία δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες μικροκλίματος καθώς και η μελέτη και κατάλληλη επιλογή των Η/Μ εγκαταστάσεων και συστημάτων και του συστήματος παρακολούθησης και χειρισμού αυτών (κεντρικό ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου BMS), με στόχο την επίτευξη της βέλτιστης δυνατής εξοικονόμησης και βελτιστοποίησης των συνθηκών εσωτερικού περιβάλλοντος και της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου συνολικά.

Περίοδος	Βασικός Σχεδιασμός* (kWh/m ²)	Σενάριο 7* (kWh/m ²)
Ιαν	9.71	5.42
Φεβ	7.64	4.64
Μαρ	5.55	3.64
Απρ	1.06	0.83
Μαΐ	0.63	0.17
Ιουν	4.65	1.40
Ιουλ	10.52	4.64
Αυγ	10.89	5.34
Σεπ	5.52	2.53
Οκτ	0.77	0.41
Νοε	1.47	0.54
Δεκ	6.10	3.07
Σύνολο	64.51	32.63
Εξοικονόμηση ενέργειας (%)	-	49.43%

Εικόνα 9: Ενεργειακός δείκτης κτιρίου ανά μήνα για θέρμανση και ψύξη για 12μηνη λειτουργία

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Κίκηρα Μ., Λαμπροπούλου Λ., Μαρκογιαννάκης Γ., Αλεξανδρή Ε., Τσελεπής Ε., ‘Ενεργειακή Μελέτη για την αποκατάσταση και τον εκσυγχρονισμό του Εθνικού Θεάτρου Ρόδου’, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε συνεργασία με το Δήμο Ροδίων, Ιούνιος 2008.
2. SECHURBA: Sustainable Energy Communities in Historic Urban Areas, με χρηματοδότηση από το πρόγραμμα Ευφυής Ενέργεια για την Ευρώπη, συντονιστής έργου Marches Energy Agency, UK, 01/09/2008-30/04/2011.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΝΟΣ ΟΡΕΙΒΑΤΙΚΟΥ ΚΑΤΑΦΥΓΙΟΥ

Γ. Βαλσαμάκης¹, Β. Καραμήτσιου και Δ. Αραβαντινός²

Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτιρίων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο
Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Θεσσαλονίκη,
τηλ.: 2310995794, φαξ: 2310995603,
ηλεκτρ. διεύθ.: ¹yiannis.83@hotmail.com, ²demetre@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία διερευνάται παραμετρικά η θερμική συμπεριφορά ενός παλαιού κτιρίου σε ένα εγκατελειμμένο χωριό στα Πιέρια όρη, στην αρχική λειτουργία του οποίου ως ορειβατικού καταφυγίου προστέθηκε σταδιακά και αυτή του εστιατορίου. Και καθώς τα τελευταία χρόνια έχει εκδηλωθεί μία τάση επανεποίκισης του οικισμού, η δεύτερη ιδιότητα του κτιρίου αποκτά ολοένα και περισσότερο κυρίαρχα χαρακτηριστικά και τείνει να επικρατήσει της πρώτης.

Στόχος της εργασίας είναι να αναζητήσει λύσεις βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου, λαμβάνοντας υπόψη τη διπλή του ιδιότητα, κυρίως όμως μέσα από το πρίσμα της διατήρησης και της ενίσχυσης των στοιχείων της παραδοσιακής αρχιτεκτονικής της περιοχής, δεδομένου ότι τα νεοανεγειρόμενα κτίρια στον οικισμό ελάχιστα από τα στοιχεία αυτά έχουν διατηρήσει τόσο ως προς τη μορφολογία τους, όσο και ως προς τα χρησιμοποιούμενα υλικά και την τεχνοτροπία στη δόμησή τους.

Για τον έλεγχο της ενεργειακής του ταυτότητας ήταν απαραίτητο να αποτυπωθεί κατά το δυνατόν πιστότερα η ιδιαιτερότητα που παρουσιάζει στη λειτουργία του το κτίσμα αφενός ως καταφύγιο με ακανόνιστα διακοπτόμενη χρήση στη διάρκεια του έτους και αφετέρου ως εστιατόριο με διαρκώς πυκνούμενη συνέχεια στη χρήση μέρους των χώρων του. Η παραμετρική μελέτη έγινε με τη βοήθεια προσομοιωτικού προγράμματος και μέσω αυτού εξετάστηκε μια σειρά πιθανών οικοδομικών επεμβάσεων με μια διαδικασία «βήμα προς βήμα», ώστε στη διατύπωση των προτάσεων να ελεγχθεί με βάση τις διαφορετικές χρήσεις του κτιρίου ενδεχόμενη ασυμβατότητα μεταξύ των προτεινόμενων λύσεων.

1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΚΤΙΡΙΟ

Το ορειβατικό καταφύγιο «Γιάννης Χασιώτης» βρίσκεται σε υψόμετρο 1100 m περίπου, στην Άνω Μηλιά Πιερίας, ένα ορεινό χωριό των Πιερίων, που είχε ερημωθεί, μετά την ολοκληρωτική του καταστροφή κατά τη διάρκεια της γερμανικής κατοχής (το 1943). Εδώ και μερικές δεκαετίες έχει εκδηλωθεί μια τάση επανεποίκισης του χωριού με την ανέγερση νέων κατοικιών, σχεδόν στο σύνολό τους παραθεριστικών, η μορφή των οποίων όμως δεν παρακολουθεί την τοπική παραδοσιακή αρχιτεκτονική.

Το κτίριο ανεγέρθηκε το 1963. Βρίσκεται στα όρια του οικισμού και στο υψηλότερο σημείο του και τη διαχείρισή του έχει ο Ελληνικός Ορειβατικός Σύλλογος (Ε.Ο.Σ.) Κατερίνης. Η αρχική λειτουργία του κτιρίου ήταν αυτή του ορειβατικού καταφυγίου και με την πάροδο του χρόνου προστέθηκε και αυτή του εστιατορίου. Και καθώς τα τελευταία χρόνια η επανεποίκιση του οικισμού γίνεται εντονότερη, η δεύτερη ιδιότητα του κτιρίου αποκτά ολοένα και περισσότερο κυρίαρχα χαρακτηριστικά και τείνει να επικρατήσει της πρώτης.

Λόγω της τοποθεσίας του χωριού, το οποίο περιβάλλεται από έντονα δασώδεις βουνοπλαγιές, το κτίσμα μπορεί να θεωρηθεί προστατευμένο κατά τις τρεις πλευρές του

(βόρεια, δυτική και νότια) και «εκτεθειμένο» μόνο κατά την νοτιοανατολική, που αποτελεί και την πρόσοψη του κτιρίου. Το κτίσμα δεν συνορεύει με άλλα κτίρια και ο περιβάλλων χώρος του έχει διαμορφωθεί έτσι, ώστε το τμήμα που βρίσκεται πίσω από το καταφύγιο να χρησιμοποιείται ως χώρος στάθμευσης και αυτό που βρίσκεται από μπροστά ως κήπος.

Το κλίμα της Άνω Μηλιάς είναι αντιπροσωπευτικό μιας ορεινής περιοχής της Κεντρικής Ελλάδας με ιδιαίτερα ψυχρούς χειμώνες και δροσερά καλοκαίρια, σχετικά υψηλά ποσοστά σχετικής υγρασίας, έντονες χιονοπτώσεις κατά τη χειμερινή περίοδο και βροχοπτώσεις για εκτεταμένο διάστημα του έτους (Οκτώβριο - Μάιο).

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

Στη σημερινή του μορφή το καταφύγιο αποτελεί ένα τριώροφο κτίσμα με τον τρίτο όροφο να αναπτύσσεται μόνον επάνω από ένα τμήμα του δευτέρου. Από τη εμπρόσθια όψη του είναι ορατοί και οι τρεις όροφοι (εικόνα 1). Αντίθετα, από την οπίσθια, ο δεύτερος όροφος εμφανίζεται ως ισόγειος λόγω της έντονης κλίσης του εδάφους. Ο τρίτος όροφος και τμήμα του δευτέρου, που αναπτύσσεται κάτω από αυτόν, αποτελούν μεταγενέστερη προσθήκη του 1970. Το υπόλοιπο του κτιρίου κατασκευάστηκε εξ αρχής το 1963 με εξαίρεση τον κλειστό εξώστη στην πρόσοψη του δευτέρου ορόφου που κατασκευάστηκε το 1999.



Εικόνα 1. Η εμπρόσθια πλευρά του καταφυγίου.

Η κατασκευή του καταφυγίου, αν και δεν είναι ενιαία, στο μεγαλύτερο μέρος της αποτελείται από φέρουσα τοιχοποιία, ακολουθώντας τα χαρακτηριστικά της παραδοσιακής αρχιτεκτονικής. Ο δομικός σκελετός του κτιρίου συμπληρώνεται από τις πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος των οροφών και ελάχιστες εξαιρέσεις κατακόρυφων φερόντων στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Οι φέρουσες τοιχοποιίες, ακολουθώντας τις παραδοσιακές τεχνικές δόμησης, είναι κατασκευασμένες από αργολιθοδομή με λίθους διαφόρων

μεγεθών. Οι εσωτερικές διαχωριστικές τοιχοποιίες, όπως και οι εξωτερικές στην πρόσοψη του πρώτου ορόφου και στο οπίσθιο τμήμα του δευτέρου, είναι κατασκευασμένες από οπτόπλινθους.

Ενδεικτικός της νεότερης κατασκευής του είναι ο κλειστός εξώστης στη νοτιοανατολική πλευρά του καταφυγίου, που χρησιμοποιείται ως χώρος εστιατορίου. Επικαλύπτεται με στέγη και περιβάλλεται με τζαμαρία από δίδυμο υαλοπίνακα, κατασκευή που παραπέμπει σε προσαρτημένο ηλιακό χώρο. Στο υπόλοιπο τμήμα της, η στέγαση του καταφυγίου αποτελείται από ξύλινο σκελετό, επάνω στο πέτσωμα του οποίου «πατούν» ρωμαϊκού τύπου κεραμίδια.

Τα εξωτερικά κουφώματα είναι στην πλειοψηφία τους μεταλλικά με διπλό υαλοπίνακα και εξωτερικά προστατευτικά στοιχεία –άλλοτε σταθερά και άλλοτε κινητά– και αποτελούν μεταγενέστερη αντικατάσταση των αρχικών κουφωμάτων με μονούς υαλοπίνακες, που έχουν διατηρηθεί πλέον μόνο στους δευτερεύοντες χώρους του καταφυγίου (αποδυτήρια, αποχωρητήρια, αποθήκες). Αντίθετα, τα εσωτερικά κουφώματα είναι όλα ξύλινα.

Η συνήθης λειτουργία του καταφυγίου περιορίζεται κυρίως τις τρεις τελευταίες ημέρες της εβδομάδας. Ακόμη και τότε, ωστόσο, η λειτουργία του ταυτίζεται με αυτήν ενός εστιατορίου, ενώ οι ξενώνες του χρησιμοποιούνται περιστασιακά και κυρίως κατά τους χειμερινούς μήνες.

3. Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Πρωταρχικός στόχος της εργασίας ήταν η διερεύνηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του καταφυγίου στην υπάρχουσα μορφή του με τη βοήθεια προσομοιωτικού προγράμματος.

Λόγω των έντονων διακυμάνσεων που παρατηρούνται στον τρόπο λειτουργίας του και αποτελούν ιδιαιτερότητα του κτιρίου, αναλύθηκε η περιγραφή της χρήσης του καταφυγίου απλουστευτικά σε δύο στάθμες λειτουργίας του, οι οποίες, τελικά, αποτυπώνουν τη διακύμανση του πλήθους των ανθρώπων και του βαθμού χρήσης ηλεκτρικών συσκευών και φωτιστικών σωμάτων εντός κάθε χώρου του κτιρίου σε ωριαία και εβδομαδιαία κλίμακα. Συγκεκριμένα, αναλύθηκαν ξεχωριστά:

- Η «**περιορισμένη λειτουργία**», η οποία αφορά στις ημέρες στις οποίες το καταφύγιο υπολειτουργεί, δεδομένου ότι το πλήθος των επισκεπτών του είναι πολύ μικρό και ως εκ τούτου η χρήση ηλεκτρικών συσκευών και φωτιστικών σωμάτων περιορισμένη, και
- η «**κανονική λειτουργία**», η οποία αφορά στις ημέρες πλήρους λειτουργίας του κτιρίου, οπότε ο αριθμός επισκεπτών αυξάνεται και τα κέρδη από την ανάπτυξη δραστηριότητας εντός του καταφυγίου είναι ενισχυμένα.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης το κτίριο κατανεμήθηκε σε 9 ζώνες, καθεμιά από τις οποίες αντιστοιχεί σε ένα ξεχωριστό χώρο ή σε ενότητα χώρων του καταφυγίου (εικόνα 2).

Αυτές διαμορφώθηκαν κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να αποτυπώνονται οι διαφορετικές συνθήκες εσωκλίματος στο εσωτερικό τους, ανάλογα:

- με τον τρόπο και το βαθμό χρήσης τους,
- την προέλευση των θερμικών κερδών τους και
- τη θέση τους στο κτίριο.

Πέρα από τις διαφυγές αέρα, για τις οποίες υιοθετήθηκαν ανά ζώνη τιμές σταθερές σε όλη τη διάρκεια του χρόνου, στην προσομοιωτική προσέγγιση λήφθηκαν υπόψη παράμετροι, μέσω των οποίων αποδόθηκε η διακύμανση στη λειτουργία του καταφυγίου. Αυτές είναι:

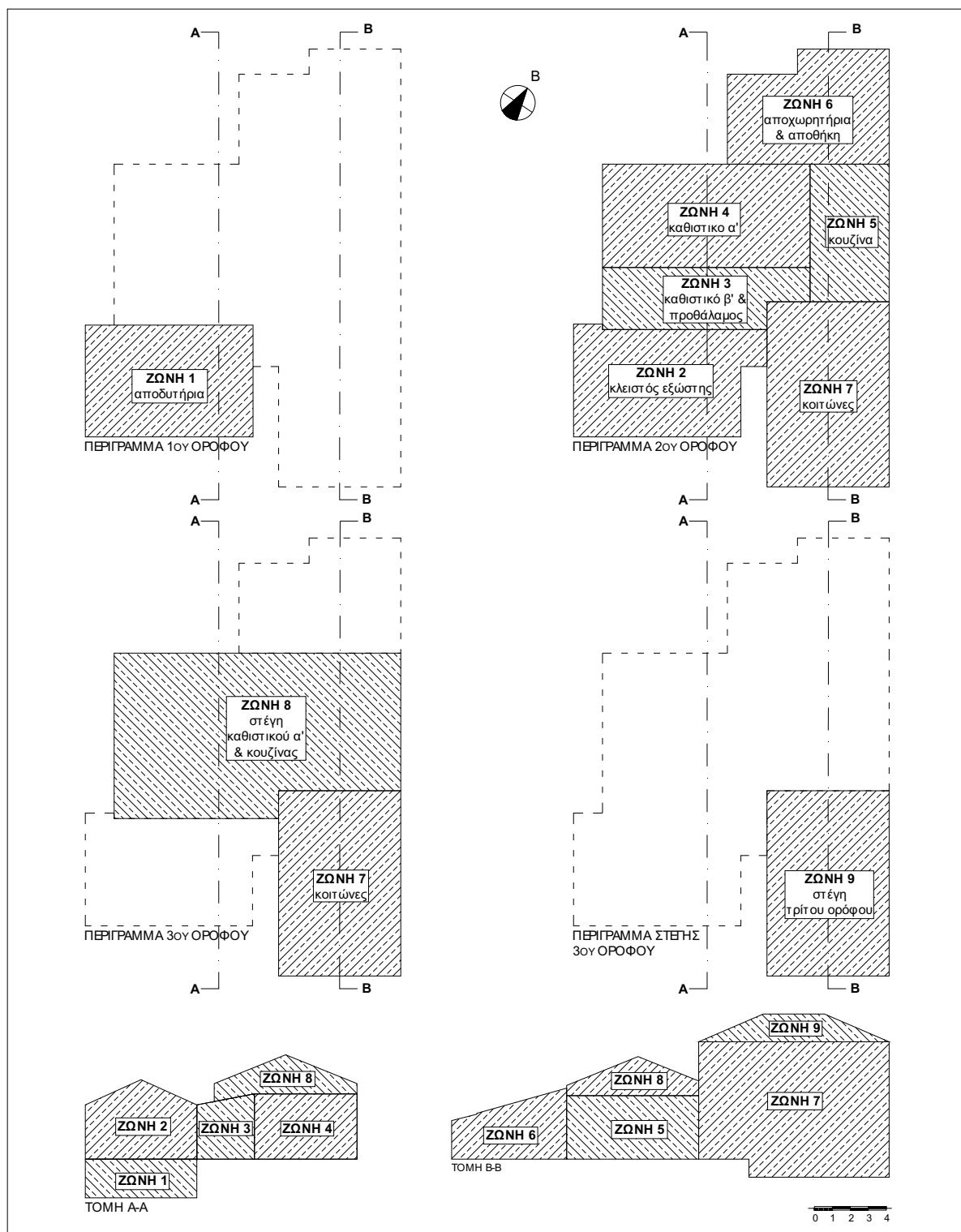
- Ο φυσικός αερισμός κάθε ζώνης, ο οποίος καθορίστηκε βάσει των επιδιωκόμενων συνθηκών εσωκλίματος και ποιότητας εσωτερικού αέρα κάθε ζώνης, ανάλογα με τον ιδιαίτερο τρόπο λειτουργίας τους (κουζίνα, αποχωρητήρια) ή την πυκνότητα χρήσης τους (εστιατόριο, καθιστικά α' & β').
- Τα εσωτερικά κέρδη κάθε ζώνης, τα οποία αναλύονται:
 - στα προερχόμενα από τις ηλεκτρικές συσκευές στο χώρο της κουζίνας,
 - στα αποδιδόμενα από τα φωτιστικά σώματα, στα οποία λήφθηκε υπόψη τόσο η ημερήσια, όσο και η εποχιακή διακύμανση της χρήσης τους και
 - στα εκλύόμενα από το ανθρώπινο σώμα, τα οποία, ως άμεση συνάρτηση του αριθμού των ατόμων που βρίσκονται σε ένα χώρο και του είδους της ανθρώπινης δραστηριότητας, σκιαγραφούν το βαθμό χρήσης κάθε ζώνης.

Καθώς η ανάλυση επιδιώκει να αποτυπώσει τη θερμική απόδοση του κτιρίου, όπως αυτή προκύπτει από τη λειτουργική του χρήση και τα κατασκευαστικά του χαρακτηριστικά, έγινε η παραδοχή ότι το κτίριο δεν διαθέτει σύστημα θέρμανσης.

Η ενεργειακή απόδοση του κτιρίου αξιολογήθηκε βάσει της θερμοκρασίας αέρα που αναπτύσσεται στο εσωτερικό κάθε ζώνης κατά τις δύο διακριτές λειτουργίες του καταφυγίου.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, διαπιστώθηκε ότι η περιγραφή της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου ουσιαστικά επιμερίζεται σε τέσσερα τμήματά του, τα οποία αναπτύσσουν διαφορετικές συνθήκες εσωκλίματος, που τελικά συνεισφέρουν στον καθορισμό των ενεργειακών χαρακτηριστικών του κτίσματος ως σύνολο. Έτσι:

- Ξεχωριστή θέση στο κτίριο κατέχει ο κλειστός εξώστης (ζώνη 2). Το αποτελούμενο αμιγώς από υαλοστάσιο περίβλημά του, το οποίο επιτρέπει το άμεσο ηλιακό κέρδος και τελικά την ανάπτυξη στο εσωτερικό του θερμοκρασιών υψηλότερων από αυτές των υπόλοιπων ζωνών (εικόνα 3, διάγραμμα ζώνης 2), προσδίδει στον εξώστη



Εικόνα 2. Περιγράμματα των κατόψεων των τριών ορόφων του κτιρίου και των στεγών που τους επικαλύπτουν, με τις ζώνες στις οποίες διαχωρίστηκε το κτίριο κατά την προσομοίωση. Δίνονται, ακόμη, δύο τομές στις οποίες παρουσιάζεται η καθ' ύψος εξάπλωση των ζωνών.

χαρακτηριστικά προσαρτημένου ηλιακού χώρου. Η απουσία, ωστόσο, νυχτερινής μόνωσης των παραθύρων, αλλά και στοιχειώδους σκιασμού τους, ιδίως κατά του καλοκαιρινούς μήνες, καθιστά των εξώστη ιδιαίτερα «ευάλωτο» στις εξωτερικά επικρατούσες κλιματικές συνθήκες. Ευδιάκριτη είναι και η διαφοροποίηση μεταξύ των δύο διακριτών λειτουργιών του καταφυγίου, μιας και η εσωτερική θερμοκρασία στην

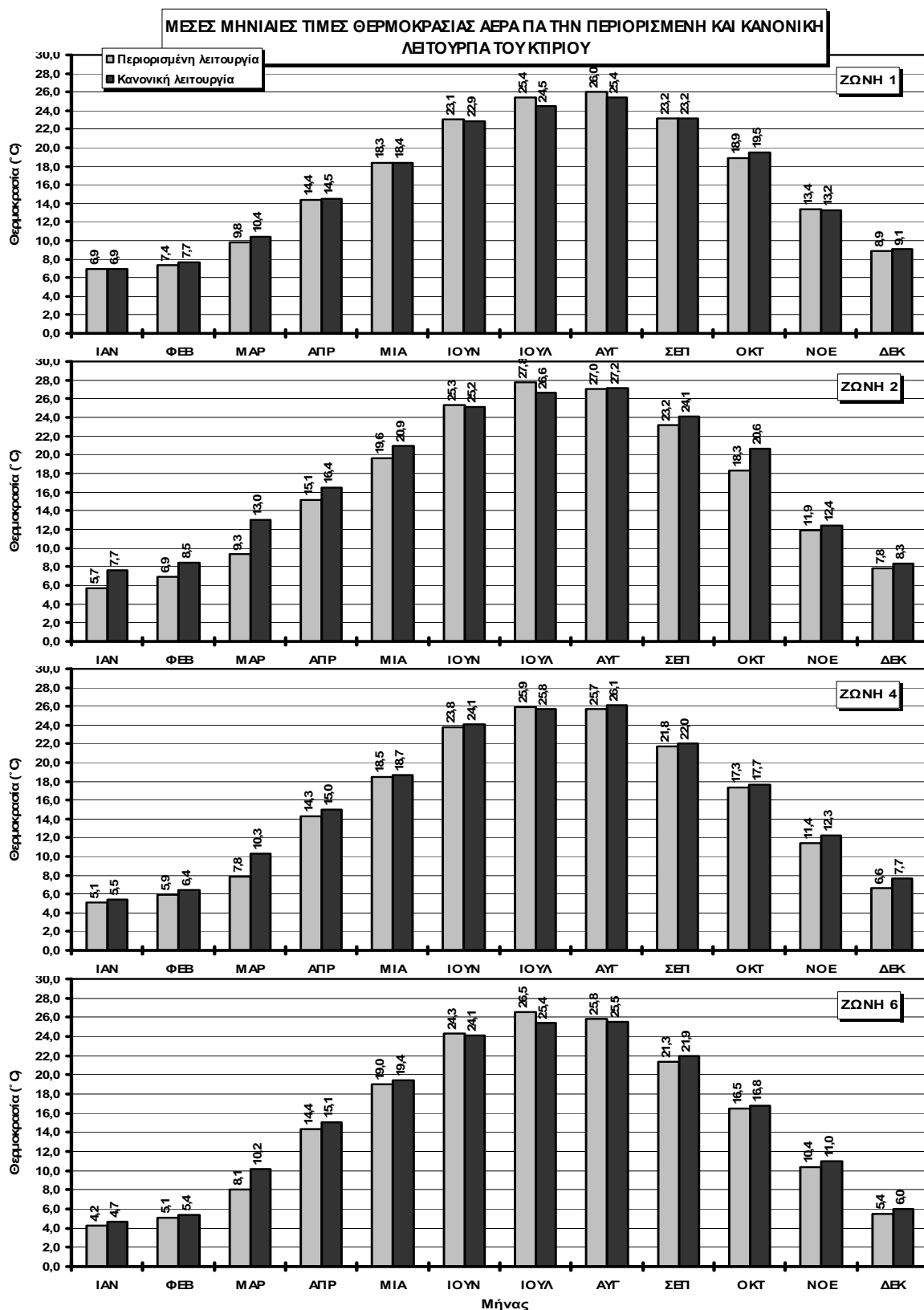
«κανονική λειτουργία» ακολουθεί ετησίως ευνοϊκότερη κατανομή σε σχέση με την «περιορισμένη» με χαμηλότερες μέσες θερμοκρασίες κατά τη θερινή περίοδο, ως αποτέλεσμα του επαυξημένου φυσικού αερισμού της ζώνης, και υψηλότερες το χειμώνα, οπότε και εντείνεται η λειτουργία της (εικόνα 3, διάγραμμα ζώνης 2).

- Ο πρώτος όροφος (ζώνη 1) αποτελεί επίσης ένα ξεχωριστό τμήμα του κτιρίου. Η περιοχή αυτή του κτιρίου βρίσκεται στη βορειοδυτική και νοτιοδυτική όψη της κάτω από την εδαφική στάθμη, ενώ από τις υπόλοιπες έρχεται σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα. Ακόμη, όμως, και από τη βορειοανατολική πλευρά της, η παρακείμενη ζώνη των κοιτώνων λειτουργεί ως χώρος προστασίας και σχεδόν εκμηδενίζει την έκθεσή του ορόφου στον άνεμο και στον έντονο ηλιασμό. Έτσι, στη διαμόρφωση των εσωκλιματικών συνθηκών του χώρου καθοριστικό ρόλο παίζει το έδαφος. Ως συνέπεια των παραπάνω, ο όροφος διατηρεί σχεδόν σταθερή εσωτερική θερμοκρασία σε επίπεδο 24-ώρου με τη διακύμανση της να γίνεται ευδιάκριτη μόνο σε ετήσιο επίπεδο (εικόνα 3, διάγραμμα ζώνης 1).
- Σε μια τρίτη κατηγορία χώρων ανήκουν τα αποχωρητήρια και η αποθήκη στο βορειοδυτικό τμήμα του κτιρίου (ζώνη 6), καθώς και οι δύο στέγες που επικαλύπτουν το κυρίως κτίσμα και τους κοιτώνες (ζώνες 8 & 9). Ως αποτέλεσμα της θέσης τους στο κτίριο, αλλά και της δευτερεύουσας χρήσης τους, οι ζώνες αυτές παραπέμπουν περισσότερο σε χώρους θερμικής ανάσχεσης. Μάλιστα, από το γράφημα των μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών, που παρατίθεται ενδεικτικά για τη ζώνη 6 (εικόνα 3 διάγραμμα ζώνης 6), είναι φανερό το ψυχρότερο εσωκλίμα των αποχωρητηρίων (ζώνη 6) κατά τη χειμερινή περίοδο λόγω της καθολικής σχεδόν έκθεσής τους στον ψυχρούς βόρειους ανέμους σε σχέση με το ευνοϊκότερες συνθήκες στο προστατευμένο καθιστικό α' (ζώνη 4).
- Τέλος, οι υπόλοιποι χώροι του καταφυγίου (ζώνες 3, 4, 5 & 7) μπορούν να ενταχθούν σε ένα τμήμα του κτιρίου με σχεδόν ενιαία θερμικά χαρακτηριστικά. Οι οποιεσδήποτε διαφοροποιήσεις μεταξύ τους οφείλονται περισσότερο στη στάθμη χρήσης τους, όπως αυτή εκτέθηκε προηγουμένως, και λιγότερο στο βαθμό έκθεσής τους στις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες. Για το τελευταίο ευθύνονται, κυρίως, οι παχιές λιθοδομές που συνιστούν το εξωτερικό όριο του τμήματος αυτού, που εξασφαλίζουν υπολογίσιμη θερμική αδράνεια στο κέλυφος. Κατά συνέπεια, το κύριο χαρακτηριστικό της περιοχής αυτής είναι η ισχυρή μόνωση από το εξωτερικό περιβάλλον, που επιτρέπει στους εξεταζόμενους χώρους να διατηρούν σχεδόν σταθερές εσωκλιματικές συνθήκες σε επίπεδο 24-ώρου και να επηρεάζονται από τις εξωτερικά επικρατούσες συνθήκες περισσότερο σε κλίμακα μήνα ή εποχής (εικόνα 3, διάγραμμα ζώνης 4).

4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Εξίσου σημαντικός στόχος της εργασίας ήταν και η αναζήτηση λύσεων βελτίωσης της ενεργειακής του απόδοσης, λαμβάνοντας υπόψη την ιδιαίτερη λειτουργία του υπό το πρίσμα όμως της διατήρησης και ενίσχυσης της παραδοσιακής αρχιτεκτονικής της περιοχής.

Έτσι, εξετάστηκε μια σειρά οικοδομικών επεμβάσεων με μια διαδικασία «βήμα προς βήμα», ώστε στη διατύπωση των προτάσεων να ελεγχθεί ενδεχόμενη ασυμβατότητα μεταξύ των προτεινόμενων λύσεων. Με βάση τα αποτελέσματα από τη μελέτη του ενεργειακού ισοζυγίου του υφιστάμενου κτιρίου, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο αυτό μεταβάλλεται μετά από κάθε νέα επέμβαση, καθορίστηκε η αλληλουχία των προτεινόμενων επεμβάσεων. Η αξιολόγηση κάθε πρότασης έγινε τόσο μεμονωμένα, σαν να επιλεγόταν ως μοναδική επέμβαση στο κτίριο, όσο και σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες, βάσει της απαιτούμενης ενέργειας για τη θέρμανση κάθε ζώνης, η οποία εκφραζόταν κάθε φορά ως ποσοστό επί τοις εκατό της απαιτούμενης ενέργειας για τη θέρμανσή της στο υφιστάμενο κτίριο.



Εικόνα 3. Συγκριτική διαγραμματική απεικόνιση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας αέρα στις ζώνες 1,2,4 & 6 του καταφυγίου για τις περιόδους κανονικής και περιορισμένης λειτουργίας του.

Οι λύσεις που εξετάστηκαν είναι οι εξής:

- Θερμομόνωση της στέγης του κλειστού εξώστη και τοποθέτηση υαλοστασίων υπό μορφή φεγγιτών.

- Θερμική προστασία των οροφών των ζωνών με χρήση παπλώματος υαλοβάμβακα πάχους 10 cm.
- Τοποθέτηση παπλώματος υαλοβάμβακα πάχους 5 cm από την εσωτερική πλευρά των τοιχοποιιών. Παράλληλη αποκάλυψη της λιθοδομής με αφαίρεση της επίστρωσης ασβεστοσιμεντοκονιάματος και συμπλήρωση των αρμών και εξωτερική επένδυση των λιγιστών εξωτερικών οπτοπλινθοδομών με λιθοδομή για μια πιστότερη προσέγγιση στην τοπική αρχιτεκτονική.
- Αντικατάσταση των μεταλλικών κουφωμάτων με ξύλινα –που συνάδουν με την παραδοσιακή αρχιτεκτονική– και τοποθέτηση διπλών υαλοπινάκων σε αυτά.
- Θερμομονωτική προστασία των δαπέδων του καταφυγίου.

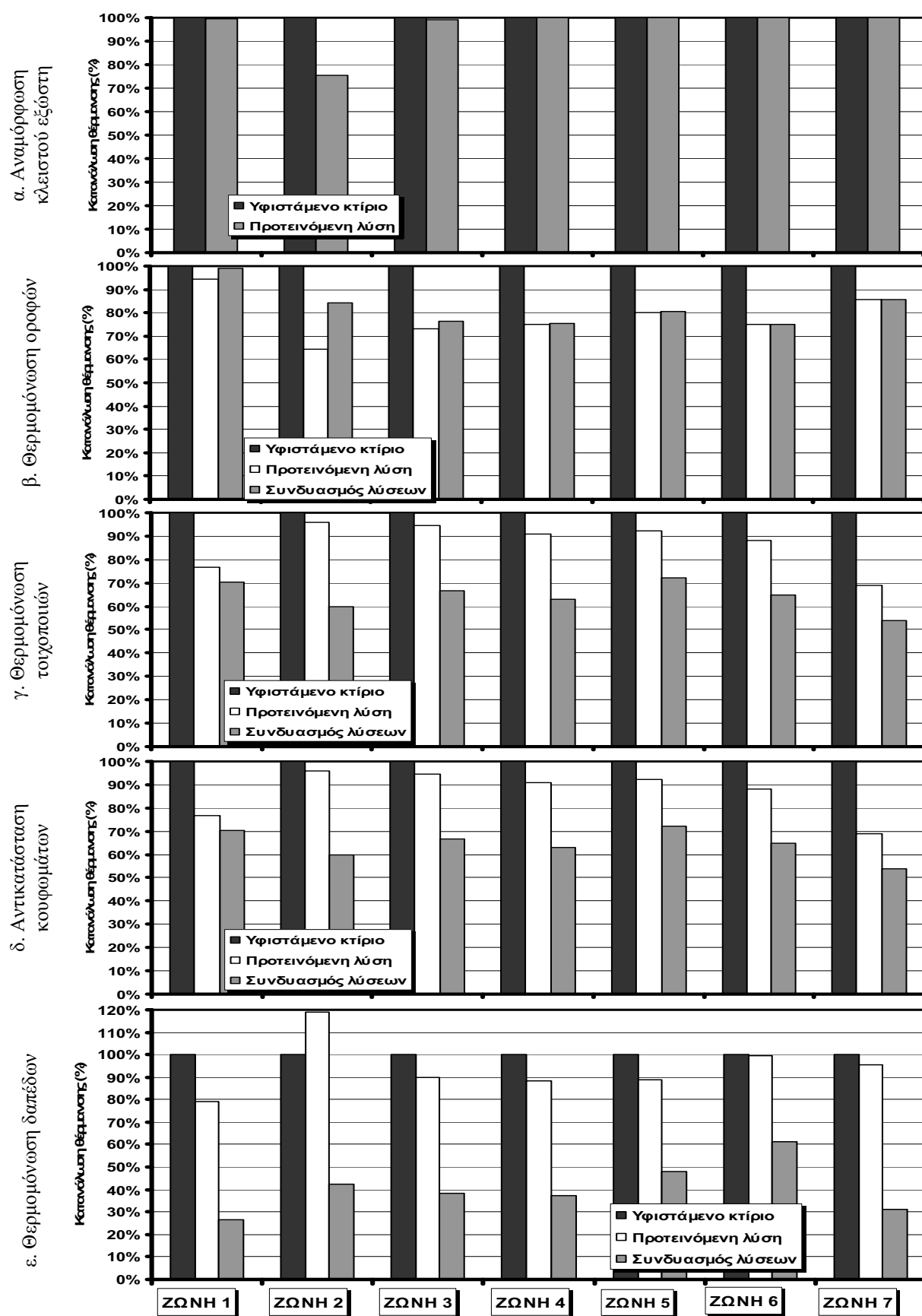
Από την ανάλυση διαπιστώθηκαν τα εξής:

- Η αναμόρφωση του κλειστού εξώστη θα ήταν προσοδοφόρα για το κτίσμα μόνο στην περίπτωση που αυτή θα εφαρμοζόταν μεμονωμένα (εικόνα 4, διάγραμμα α). Ο προσομοιωτικός έλεγχος έδειξε ότι η νέα κατασκευαστική διαμόρφωση του εξώστη, αν εξεταστεί σε συνδυασμό με τη θερμική προστασία του κελύφους του κυρίως κτιρίου, θα ευθύνεται περισσότερο για απώλειες από το εσωτερικό του κτιρίου παρά για κέρδη (εικόνα 4, διάγραμμα β), λόγω της παρουσίας των φεγγιτών. Για το λόγο αυτό μάλιστα η επέμβαση αυτή δεν υιοθετήθηκε στα επόμενα βήματα της ανάλυσης (εικόνα 4, διαγράμματα β έως ε).
- Καθεμία από τις υπόλοιπες επεμβάσεις που εξετάστηκαν κρίθηκαν κατά περίπτωση ως λιγότερο ή περισσότερο προσοδοφόρες για το κτίριο (εικόνα 4, διαγράμματα β., γ. & δ.). Μοναδική, ίσως, εξαίρεση υπήρξε η θερμική προστασία των δαπέδων (εικόνα 4, διάγραμμα ε). Η επέμβαση αυτή, η οποία επιλέχθηκε και ως έσχατη λύση, κρίθηκε ευνοϊκή για το κτίριο μόνο στην περίπτωση που ενσωματωνόταν σε αυτό σε συνδυασμό με τη θερμική θωράκιση του υπόλοιπου κελύφους. Αντίθετα, όταν αυτή επιλέχθηκε ως μεμονωμένη λύση τα αποτελέσματα ήταν λιγότερο θετικά και σε ορισμένες περιπτώσεις αρνητικά (ζώνη 2).
- Παρόλο που ελέγχθηκε και η τοποθέτηση μικρότερου πάχους θερμομόνωσης στις οροφές του καταφυγίου, η χρήση θερμομόνωσης 10 cm κρίθηκε επαρκέστερη για το κτίσμα, δεδομένων των υψηλών ενεργειακών απωλειών διαμέσου αυτών, όπως προέκυψε και από τη μελέτη του ενεργειακού ισοζυγίου.

Ως ενδεχόμενη λύση εξετάστηκε και η αντικατάσταση των συμβατικών κουφωμάτων με υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής. Τα οφέλη, ωστόσο, από τη χρήση τέτοιων υαλοπινάκων δεν ήταν αρκετά σημαντικότερα αυτών από τη χρήση των συμβατικών διπλών, ώστε η λύση να κριθεί ως συμφέρουσα, δεδομένων των εξόδων αγοράς και εξειδικευμένης εγκατάστασης του συγκεκριμένου τύπου υαλοπίνακα. Θα ήταν όμως σκόπιμη η αντικατάσταση των μεταλλικών κουφωμάτων με ξύλινα σε μια προσπάθεια προσέγγισης της παραδοσιακής αρχιτεκτονικής.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης που αποτυπώνονται στο διάγραμμα ε. της εικόνας 4, ο συνδυασμός λύσεων αποτελεί και την πλέον ενδεδειγμένη μορφή επεμβάσεων. Η κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανση των ζωνών μειώνεται τότε σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις σε ποσοστό υψηλότερο από 50%, με ακραία περίπτωση αυτήν του πρώτου ορόφου, στην οποία η μείωση κατανάλωσης αγγίζει το 75%. Μάλιστα, στο σύνολο του κτιρίου η κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανση του θα ανέρχεται πλέον μόλις στο 41% της αρχικής.

Τέλος, συμπληρωματική πρόταση για τη διαμόρφωση του ακάλυπτου χώρου σε συνδυασμό και με τις προτάσεις που απέβλεπαν στην ανάδειξη των χαρακτηριστικών στοιχείων της παραδοσιακής αρχιτεκτονικής επιτυγχάνουν, πέρα από τη βελτίωση της ενεργειακής του συμπεριφοράς, να εντάξουν το κτίριο περισσότερο αρμονικά στο φυσικό του περιβάλλον.



Εικόνα 4. Τα αποτελέσματα των ελέγχων για την ετησίως απαιτούμενη ενέργεια θέρμανσης του κτιρίου, στη μεμονωμένη εφαρμογή της επέμβασης και σε συνδυασμό με τις προηγούμενες, ως ποσοστό της ετησίως απαιτούμενης ενέργειας θέρμανσης του υφιστάμενου κτιρίου ανά ζώνη.

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΚΑΙΝΙΣΗΣ ΤΩΝ ΟΨΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΓΡΑΦΕΙΩΝ ΣΕ ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Χρυσόστομος Ι. Κοϊνάκης⁽¹⁾, Ιωάννης Κ. Σακελλάρης⁽²⁾

(1) Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, (2) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή εξετάζονται παράμετροι ανακαίνισης και βελτίωσης των όψεων συγκεκριμένων περιπτώσεων κτιρίων γραφείων σε αστικό περιβάλλον στην Ελλάδα. Εξετάζονται μεταξύ άλλων διάφοροι τύποι κουφωμάτων, συστήματα σκίασης, αδιαφανή δομικά στοιχεία και ο φυσικός και ο υβριδικός αερισμός. Γίνονται προσομοιώσεις, μετρήσεις και ανάλυση πληροφοριών με βάση ερωτηματολόγια. Οι ειδικές ετήσιες καταναλώσεις θέρμανσης και ψύξης στα εξεταζόμενα κτίρια, κυμαίνονται μεταξύ 95 και 120 kWh/m² περίπου για τα φορτία θέρμανσης και μεταξύ 30 και 48 kWh/m² τα ψυκτικά φορτία. Ο νυχτερινός αερισμός μείωσε τις ψυκτικές ανάγκες κατά 70% ως 135% περίπου ανάλογα με το βαθμό των επεμβάσεων. Τα οφέλη των στρατηγικών που εφαρμόστηκαν στην θερμική άνεση έγιναν αισθητά στους τελικούς χρήστες, ακόμα και σε περιορισμένες επεμβάσεις ανακαίνισης.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.

Το ενεργειακό Σχέδιο Δράσης της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (Μάρτιος 2007) για την περίοδο 2007-2009, υπό τον τίτλο «Ενεργειακή πολιτική για την Ευρώπη», θέτει ως κεντρικό στρατηγικό ενεργειακό στόχο και δέσμευση, την μείωση των εκπομπών των αερίων θερμοκηπίου κατά 20% μέχρι το 2020, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 [1], [3]. Για την επίτευξη αυτού του κεντρικού στόχου, προτείνεται η επίτευξη τριών σχετιζόμενων στόχων μέχρι το 2020: α) βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά 20%, β) αύξηση της συνολικής διείσδυσης των ΑΠΕ κατά 20% και γ) αύξηση της συμμετοχής των βιοκαυσίμων στις μεταφορές κατά 20%.

Σε ότι αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητα, ισχύει το Σχέδιο Δράσης που παρουσίασε η Ε.Ε. στο τέλος του 2006, και η οδηγία 2006/32/EK, όπου προβλέπεται 9% εξοικονόμηση ενέργειας στην τελική κατανάλωση μέχρι το 2016 και μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας μέχρι το 2020. Στα πλαίσια της εναρμόνισης της ελληνικής νομοθεσίας με τις κοινοτικές οδηγίες [1], [2], (συμπεριλαμβανόμενης και της 2002/91/EK για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων):

- Ψηφίστηκε ο Ν. 3661/2008 για την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και άλλες διατάξεις, που τίθενται εν ισχύ το 2009 και καθιερώνει το Πιστοποιητικό Ενεργειακής Απόδοσης, την Ενεργειακή Μελέτη για μεγάλα κτίρια καθώς και η υποχρεωτική επιθεώρηση λεβήτων και Η-Μ εγκαταστάσεων.
- Εκδόθηκε η κοινή υπουργική απόφαση (ΚΥΑ) Δ6/Β/14826/17.6.2008, για την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και την εξοικονόμηση ενέργειας στο δημόσιο και ευρύτερο δημόσιο τομέα που τίθεται εν ισχύ το 2009, ενώ συμπληρώθηκαν προγενέστερες ΚΥΑ.

Οι ενεργειακές καταναλώσεις σε συνήθη κτίρια γραφείων στην Βόρεια Ευρώπη [5], [7], [8], κυμαίνονται με βάση σχετικές μελέτες από 270 έως 350 kWh/m². Στην Μεγάλη Βρετανία η μέση ετήσια κατανάλωση σε δείγμα γραφείων χαμηλής κατανάλωσης (low energy) ανέρχεται

σε 131 kWh/m², έναντι 440 kWh/m² των κτιρίων γραφείων συνήθους κατασκευής. Σχετική καταγραφική έρευνα που έγινε σε κτίρια της Αθήνας την δεκαετία του 1990 διαπιστώθηκε μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας 187 kWh/m², 13% περίπου από την ενέργεια αυτή καταναλώνεται σε ψύξη [2], [7], [8].

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μελέτης της ενεργειακής συμπεριφοράς και των δυνατοτήτων εξοικονόμησης ενέργειας σε δύο κτίρια γραφείων στη Βόρεια Ελλάδα (στη Θεσσαλονίκη και στην Κοζάνη) στα πλαίσια ενός ευρύτερου προγράμματος ανακαίνισης και αφορά διοικητικές υπηρεσίες, κέντρα τηλεφωνικής εξυπηρέτησης και υγειονομικές υπηρεσίες [6]. Στην ενεργειακή μελέτη των κτιρίων που παρουσιάζονται:

- εφαρμόζονται οι γενικές κατευθύνσεις ενεργειακών καταγραφών εξοικονόμησης ενέργειας κτιρίων γραφείων με έμφαση την ενεργειακή ανακαίνιση των όψεων των κτιρίων
- λαμβάνεται υπόψη το κτιριολογικό πρόγραμμα και οι προδιαγραφές χρήσεων των συγκεκριμένων κτιρίων.

2. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΚΤΙΡΙΑ ΓΡΑΦΕΙΩΝ

Αρχικώς έγινε καταγραφή του συνόλου των βασικών κτιριακών δεδομένων με βάση την λειτουργία και την χρήση των χώρων, τα σχέδια (οικοδομικά Η-Μ), την καταγραφή με ερωτηματολόγια και λοιπά στοιχεία ενεργειακής επιθεώρησης των κτιρίων. Στη συνέχεια μελετήθηκαν σενάρια εξοικονόμησης με ενεργειακές προσομοιώσεις κτιρίων. Τα παραπάνω στοιχεία σε συνδυασμό με τις κατά περίπτωση ειδικές συνθήκες όπως π.χ. εξέλιξη των εργολαβιών ανακαίνισης χωρίς την αναστολή της λειτουργίας των μονάδων, οδήγησε σε συμπεράσματα με σημαντικότερα τα ακόλουθα:

- Μετά τα έργα εκσυγχρονισμού του εξοπλισμού, τα απαιτητά ψυκτικά φορτία και εμφανίζονται αυξημένα λόγω του αυξημένου ηλεκτρονικού εξοπλισμού, του αυξημένου αριθμού προσώπων και της μείωσης της θερμοπερατότητας του κελύφους του κτιρίου (κυρίως των κουφωμάτων).
- Πολλές λύσεις εξοικονόμησης δεν κατέστη δυνατόν να εφαρμοστούν για τεχνικοοικονομικούς λόγους. Για παράδειγμα συχνά η τοποθέτηση εξωτερικών μέσων σκιασμού ήταν ανέφικτη, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις δεν ήταν δυνατή η πλήρης θερμομόνωση του κελύφους η οποία προγραμματίστηκε σε μεταγενέστερη φάση.
- Η ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος (IEQ) υστερεί έναντι των απαιτούμενων προδιαγραφών και η αύξηση των αλλαγών αέρα οδηγεί σε αύξηση των μικρορρευμάτων αέρα στο επίπεδο εργασίας από τα στόμια αεραγωγών κλιματισμού και εξαερισμού [4], [6]. Πολύ συχνά διαπιστώθηκαν σοβαρές ενοχλήσεις και προβλήματα δυσανεξίας ή και υγείας εργαζομένων εξαιτίας των παραπάνω φαινομένων. Τα προβλήματα αυτά επιτείνονται λόγω της ενοποίησης των χώρων (ελεύθερες κτόψεις).
- Τα επίπεδα τεχνητού φωτισμού ήταν χαμηλά, συχνά κάτω από 300 lux/m² στη στάθμη εργασίας, ενώ στους χρήστες υπολογιστών εντοπίστηκαν προβλήματα θάμβωσης λόγω έντονου και άμεσου φυσικού φωτισμού

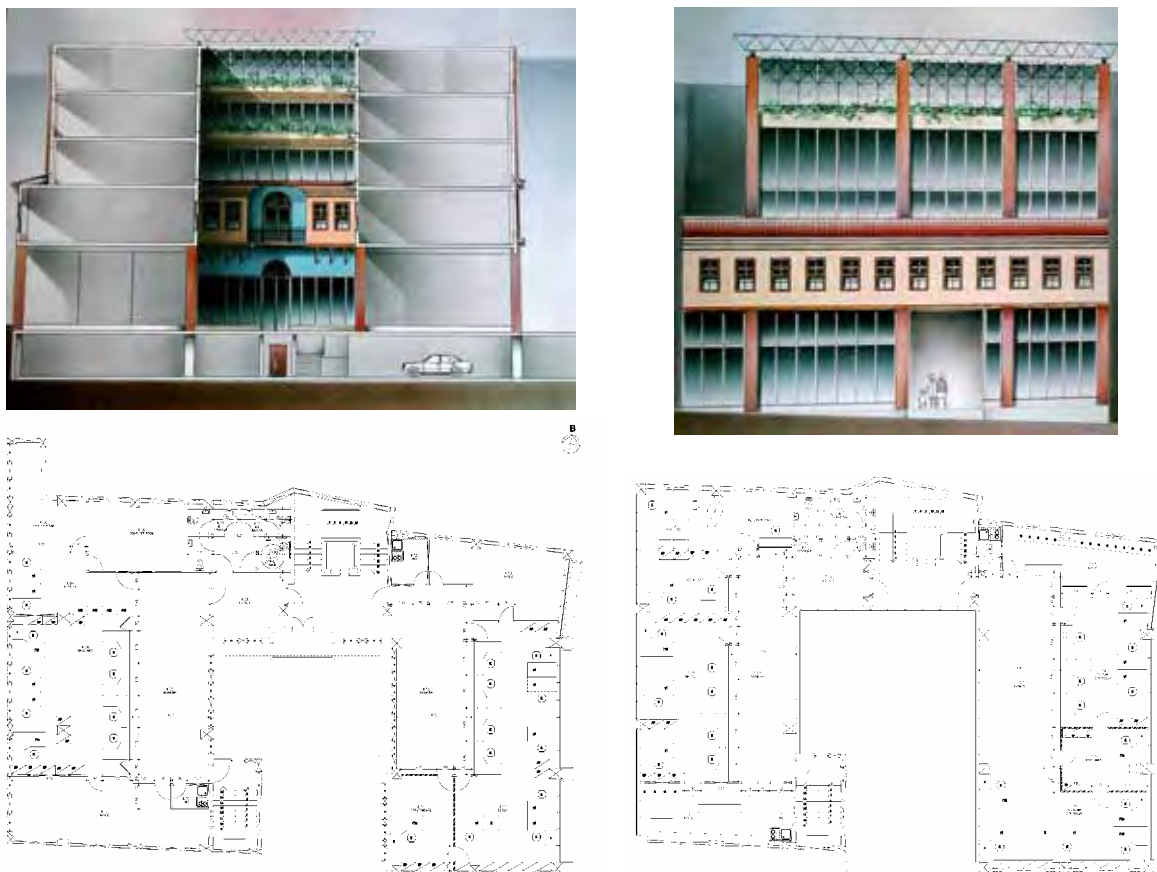
Τα συμπεράσματα που προαναφέρθηκαν, οδήγησαν στον σχεδιασμό προσαρμοσμένων στρατηγικών εξοικονόμησης ενέργειας. Αναφέρονται ενδεικτικά οι αντίστοιχες στα προαναφερθέντα συμπεράσματα στρατηγικές:

- Τα αυξημένα απαιτητά φορτία κλιματισμού αντιμετωπίστηκαν σε πρώτη φάση με μηχανικά και υβριδικά συστήματα εξαερισμού. Γίνεται εφαρμογή νυχτερινού δροσισμού με χρονικό προγραμματισμό και κατάλληλα τοποθετημένα ανοίγματα. Σε δεύτερη φάση παρέχεται κλιματισμός από πολυδιαιρούμενες μονάδες τύπου VRV με κεντρικό έλεγχο με H/Y και σε ορισμένες περιπτώσεις λογισμικό διαχείρισης (BMS).

- Ο μηχανικός και υβριδικός αερισμός που προαναφέρθηκε εξασφαλίζει επαρκή ποιότητα αέρα εσωτερικών χώρων και ό,που είναι δυνατόν συνδυάζεται και με μίξη εσωτερικού-εξωτερικού αέρα. Τα προβλήματα μικρορρευμάτων περιορίστηκαν με τη εφαρμογή κατάλληλων περσίδων στομιών και υπολογισμός. Επιπλέον εξασφαλίστηκε ομοιόμορφη κατανομή αέρα στους ενοποιημένους χώρους.
- Οι ενδεικνυόμενες λύσεις που δεν κατέστη δυνατόν να εφαρμοστούν για οικονομικούς ή τεχνικούς λόγους, είτε υποκαταστάθηκαν με τις πλησιέστερες εφικτές, είτε προγραμματίστηκαν για αργότερα. Για παράδειγμα πολλές εξωτερικές διατάξεις ηλιοπροστασίας υποκαταστάθηκαν από εσωτερικές περσίδες που έλυσαν και το πρόβλημα θάμβωσης των χρηστών Η/Υ. Αντίθετα αρκετές εργασίες θερμομόνωσης του κελύφους προγραμματίστηκαν σε μελλοντική εργολαβία.
- Τα χαμηλά επίπεδα φωτισμού αντιμετωπίστηκαν με τοποθέτηση φωτιστικών φθορισμού με ανακλαστήρες νέας τεχνολογίας χαμηλής κατανάλωσης και υψηλής απόδοσης εξασφαλίζοντας επίπεδα φωτισμού 500 lux/m² στους χώρους εργασίας. Τα προβλήματα θάμβωσης λύθηκαν με τις περσίδες που προαναφέρθηκαν. Σε μια περίπτωση έγινε εφαρμογή ραφιού φωτός (light-shelf) στην εσωτερική παρειά του κουφώματος.



Σχ. 1. Το κτίριο γραφείων της Θεσσαλονίκης. Διαμόρφωση όψεων και κατόψεων και κατασκευαστική λεπτομέρεια πάνελ όψεων (φάση ανακαίνισης).



Σχήμα 2. Το κτίριο γραφείων της Κοζάνης. Διαμόρφωση όψεων και κατόψεων

3. ΑΡΧΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Η αρχική (προ ανακαίνισης) κατάσταση των κτιρίων των σχημάτων 1 και 2, παρουσιάζεται στον πίνακα 1 με βάση την επιτόπου επιθεώρηση, τις μελέτες κατασκευής και τους ετήσιους λογαριασμούς καυσίμου, ηλεκτρικού. Οι συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος κατηγοριοποιήθηκαν με βάση επί τόπου μετρήσεις και ερωτηματολόγια σε επαρκείς, αποδεκτές και μη αποδεκτές.

Πίνακας 1. Αρχική κατάσταση μελετηθέντων κτιρίων		
Παράμετρος σχεδιασμού	Κτίριο Θεσσαλονίκης	Κτίριο Κοζάνης
Έτος κατασκευής	1967	2000
Θέση	Θεσσαλονίκη	Κοζάνη
Χρήση κτιρίου	Γραφεία – Ιατρεία – Εργαστήρια	Γραφεία
Τοποθεσία	Αστικό περιβάλλον μέσης πυκνότητας	Αστικό περιβάλλον υψηλής πυκνότητας
Εμβαδόν (θερμαινόμενο/μη θερμαινόμενο) σε m^2	7120/6210	4480 /3900
Αριθμός ορόφων	7+υπόγειο	5+υπόγειο
Θερμομόνωση κελύφους / οροφής.	- / ανεπαρκής μόνωση στην οροφή.	Ελληνικός κανονισμός θερμομόνωσης (ΦΕΚ-362/Δ/4-7-79 – Κλιματική περιοχή Γ)
Εξωτερικά κουφώματα	Μονοί υαλοπίνακες ξύλινα κουφώματα, χαμηλής στεγανότητας	Διπλοί υαλοπίνακες φωτοαπορροφητικοί, μέσης έως υψηλής στεγανότητας

Πίνακας 1 (συνέχεια)		
Παράμετρος σχεδιασμού	Κτίριο Θεσσαλονίκης	Κτίριο Κοζάνης
Σύστημα σκιασμού	Κατακόρυφες περσίδες σε ποσοστό 15% της ΒΔ πλευράς	Δεν υπάρχει
Περίοδος θέρμανσης (διάρκεια και μέσες ώρες λειτουργίας ανά ημέρα)	5,5 μήνες για 16 ώρες την ημέρα (κατά μέσον όρο)	7 μήνες για 9 ώρες τη ημέρα (κατά μέσον όρο)
Χειμερινές συνθήκες θερμικής άνεσης	Μη αποδεκτές	Αποδεκτές
Ετήσια ειδική κατανάλωση θέρμανσης	190 KWh/m ²	160 KWh/m ²
Σύστημα ψύξης	Υδρόψυκτο σύστημα κλιματισμού με αεραγωγούς σε μικρό μέρος του χώρου (υπό αντικατάσταση). Σποραδικές κλιματιστικές μονάδες διαιρούμενου τύπου	Απουσία συστήματος ψύξης
Περίοδος ψύξης	4,5 μήνες για 12 ώρες την ημέρα	-
Θερινές συνθήκες θερμικής άνεσης	Μη αποδεκτές	Οριακά αποδεκτές
Αερισμός	Μηχανικός εξαερισμός σε μικρό αριθμό ειδικών χώρων (μικροβιολογικά εργαστήρια WC κλπ)	Μηχανικός εξαερισμός μόνο στους χώρους υγιεινής.
Ζεστό νερό χρήσης	Μεμονωμένοι ταχυθερμοσίφωνες	Μεμονωμένοι ταχυθερμοσίφωνες
Ετήσια κατανάλωση ηλεκτρισμού	143 KWh/m ² (κατά μέσον όρο)	95 KWh/m ² (κατά μέσον όρο)
Φωτισμός (χώροι γραφείων, εργαστηρίων, ιατρείων)	Λαμπτήρες φωτισμού παλαιάς τεχνολογίας, λαμπτήρες πυρακτώσεως	Λαμπτήρες φωτισμού νέας τεχνολογίας, μέσης απόδοσης.
Χώροι κοινόχρηστοι	Λαμπτήρες φωτισμού παλαιάς τεχνολογίας, λαμπτήρες πυρακτώσεως	Λαμπτήρες φωτισμού νέας τεχνολογίας, μέσης απόδοσης λαμπτήρες πυρακτώσεως.
Χρήση ηλεκτρικού εξοπλισμού	Υψηλή (H/Y σε δίκτυο – computer room) – Τοπικά πολύ υψηλή (ιατρικά μηχανήματα κλπ.)	Υψηλή (H/Y σε δίκτυο – computer room)
Ανελκυστήρες	Παλαιοί ημιαντόμετοι	Νέοι αυτόματοι

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ

4.1 ΘΕΡΜΑΝΣΗ

Οι επιτόπου επιθεωρήσεις και οι προσομοιώσεις ανέδειξαν ως σημαντικότερο μέτρο την αντικατάσταση των εξωτερικών κουφωμάτων με νέα με διπλούς υαλοπίνακες, υψηλή στεγανότητα και ανοιγόμενα υπέρθυρα για αερισμό σε επιλεγμένες θέσεις. Επιλέχθηκαν δύο τύπου υαλοπινάκων με συντελεστή θερμικών απωλειών 2,7 και 1,8 W/m²K για τα κουφώματα του κτιρίου Θεσσαλονίκης και τα υαλοπετάσματα του κτιρίου Κοζάνης αντίστοιχα. Τα απαιτητά φορτία θέρμανσης μειώνονται περισσότερο με τοποθέτηση θερμοστατών στους επιμέρους χώρους (2,5% και 3,5% αντίστοιχα στα κτίρια Θεσσαλονίκης και Κοζάνης). Ο μηχανικός και υβριδικός αερισμός που επιλέχθηκε σε συνδυασμό με την υψηλή αεροστεγανότητα των κουφωμάτων μειώνει τον ανεξέλεγκτο αερισμό. Παρόλα αυτά δεν επιλέγεται λύση με χαμηλά ποσοστά αλλαγών αέρα (ach) η οποία είναι ευμενέστερη ενεργειακά, διότι δεν καλύπτει της προδιαγραφές ποιότητας εσωτερικού αέρα στις περιοχές υψηλής συγκέντρωσης κοινού. Εξασφαλίζουν παροχές αέρα άνω των 500m³/h με δυνατότητα ρύθμισης και αλλαγές αέρα έως 6 ach στις περιοχές αναμονής κοινού, με δυνατότητα μίξης θερμού και ψυχρού αέρα Η βέλτιστη λύση είναι η χρήση εναλλάκτη θερμότητας που δεν εφαρμόστηκε άμεσα για τεχνικούς λόγους, υπάρχει όμως δυνατότητα εφαρμογής. Συστήματα διαχείρισης του κτιρίου (BMS) εφαρμόστηκαν κυρίως στον κεντρικό

έλεγχο του κλιματισμού (συστήματα VRV) για τη θερινή περίοδο. Με βάση τις προσομοιώσεις προέκυψε ότι η χρήση των εσωτερικών συστημάτων σκιασμού τις νυχτερινές ώρες μπορεί να μειώσει τις απώλειες κατά 17% και 14% αντίστοιχα στα κτίρια Θεσσαλονίκης και Κοζάνης αντίστοιχα. Στην περίπτωση του κτιρίου της Κοζάνης η χρήση ειδικών υαλοπινάκων στα εκτεταμένα υαλοπετάσματα όψεως περιόρισε τις νυχτερινές απώλειες ενέργειας. Στην περίπτωση χρήσης κοινών διπλών υαλοπινάκων οι νυχτερινές απώλειες στο κτίριο αυτό θα μειώνονταν κατά 22% από τους υαλοπίνακες με τη χρήση εσωτερικών περσίδων. Η μείωση των απαιτητών φορτίων θέρμανσης δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν οι ήδη υπερδιαστασιολογημένοι λέβητες πετρελαίου ώστε να μπορούν να λειτουργούν με χαμηλότερη ισχύ και με υψηλότερη απόδοση. Στο κτίριο της Θεσσαλονίκης η μόνωση των αγωγών θέρμανσης οδηγεί σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης θέρμανσης, ενώ στο κτίριο της Κοζάνης που είναι νεώτερο τα μέτρα αυτά λήφθηκαν στη φάση κατασκευής. Διαπιστώθηκε με βάση προσομοιώσεις ότι μείωση της θερμοκρασίας στον θερμοστάτη κατά $0,5^{\circ}\text{C}$ εξασφαλίζει εξοικονόμηση ενέργειας κατά 4% περίπου.

4.2. ΨΥΞΗ

Η βασικότερη εξοικονόμηση απαιτητών φορτίων ψύξης εξασφαλίζεται κατά σειρά σημασίας α) με τα κινητά μέσα σκιασμού (περσίδες) β) με εφαρμογή υβριδικού νυχτερινού δροσισμού και γ) με επιλογή συστήματος κλιματισμού υψηλής απόδοσης. Στο κτίριο της Θεσσαλονίκης που είναι πιο εκτεθειμένο εξασφαλίζεται μείωση κατά 37%. Στην περίπτωση μάλιστα αυτή αντικαταστάθηκε το πεπαλαιωμένο και ελατωματικό υδρόψυκτο σύστημα κλιματισμού με νέο σύστημα VRV ελεγχόμενο με σύστημα BMS. Στο κτίριο της Κοζάνης εξασφαλίζεται μείωση των ψυκτικών φορτίων κατά 19% διότι τα υαλοπετάσματα διαθέτουν ήδη φωτοαπορροφητικούς υαλοπίνακες. Η χρήση μηχανικού εξαερισμού εξασφαλίζει μετατόπιση της περιοχής θερμικής άνεσης κατά 2 και $2,5^{\circ}\text{C}$ περίπου (για το κτίριο Θεσσαλονίκης και Κοζάνης αντίστοιχα), λόγω της αύξησης της ταχύτητας του εσωτερικού αέρα και της μείωσης της ενδογενούς υγρασίας.

4.3. ΦΩΤΙΣΜΟΣ

Η αντικατάσταση των λαμπτήρων πυρακτώσεων και των λαμπτήρων φθορισμού παλαιάς τεχνολογίας με λαμπτήρες φθορισμού νέας τεχνολογίας, εξασφαλίζει εξοικονόμηση ενέργειας 19%. Το ποσοστό αυτό θα ανέρχονταν σε 48% στην περίπτωση που οι λαμπτήρες που αντικαταστάθηκαν παρείχαν τις προβλεπόμενες στάθμες φωτισμού ($300\text{-}500\text{ lux/m}^2$) που επιτεύχθηκαν στη συνέχεια. Παράλληλα βελτιώθηκαν τα επίπεδα φυσικού φωτισμού και μειώθηκαν τα προβλήματα θάμβωσης ιδίως στην περιοχή των χρηστών υπολογιστών, με τη χρήση εσωτερικών περσίδων.

4.4. ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΘΕΡΜΙΚΑ ΚΕΡΔΗ

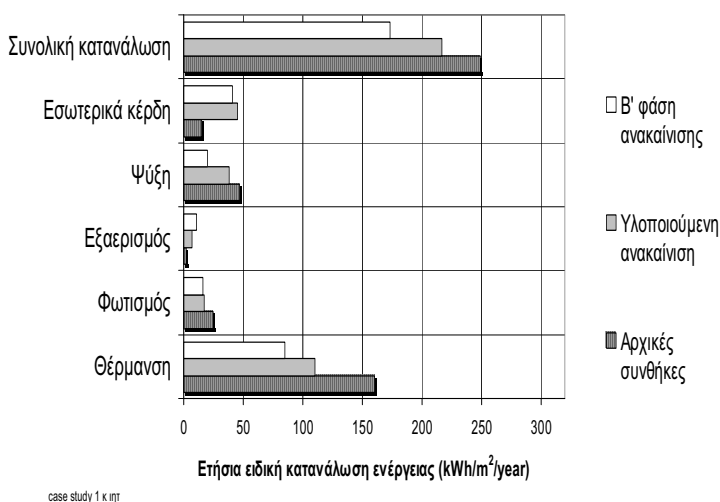
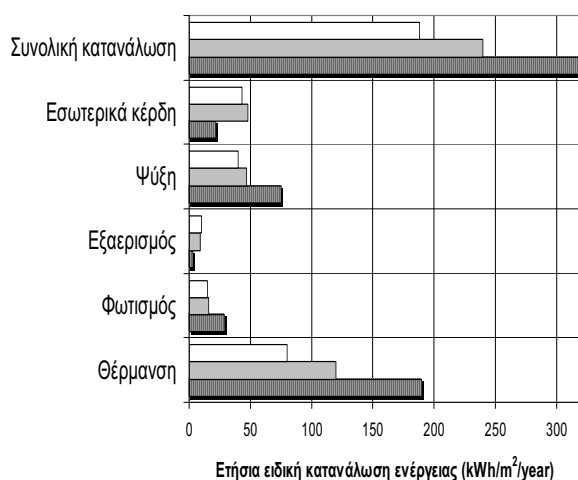
Και στις δύο περιπτώσεις κτιρίων είναι ανέφικτη η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του εξοπλισμού γραφείου, διότι κεντρικός στόχος των έργων είναι η εγκατάσταση ολοκληρωμένων πληροφοριακών συστημάτων και νέας μηχανογράφησης. Ο εξοπλισμός περιλαμβάνει προσωπικούς υπολογιστές, οθόνες CRT και TFT, εκτυπωτές, φωτοαντιγραφικά και rack συστημάτων δομημένης καλωδίωσης. Για το λόγο αυτό η κατανάλωση λόγω εξοπλισμού γραφείου αυξάνεται μέχρι 2,5 φορές περίπου. Το γεγονός αυτό βοηθά στην περαιτέρω μείωση των απαιτητών φορτίων θέρμανσης στην παράγραφο 4.1., ενώ εμποδίζει την μεγάλη μείωση των απαιτητών φορτίων ψύξης στην παράγραφο 4.2.

Σε περίπτωση ύπαρξης εξοπλισμού παλαιάς γενιάς η εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται κυμαίνεται σύμφωνα με τη βιβλιογραφία από 30% για τις οθόνες έως 80% για τους εκτυπωτές.

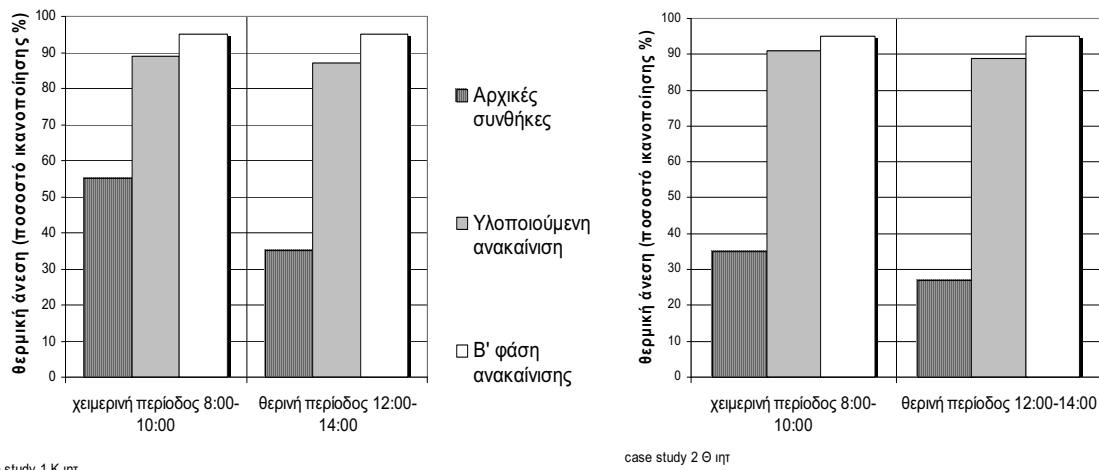
4.5. ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΑΝΑΚΑΙΝΙΣΗΣ

Οι προοπτικές μελλοντικής ανακαίνισης αποτελούν την τρίτη εξεταζόμενη φάση μετά αυτές των αρχικών συνθηκών και της προγραμματισμένης ανακαίνισης. Στην μελλοντική ανακαίνιση περιλαμβάνονται: ανελκυστήρες χαμηλής κατανάλωσης με αυτοματισμούς, εξοικονόμηση θερμού νερού χρήσης, ταχυθερμαντήρες νερού σε αντικατάσταση των παλαιών μπόιλερ, εξωτερικά στοιχεία σκιασμού, ανάκτηση θερμότητας στο σύστημα εξαερισμού, καθώς και πρόσθετα μέτρα θερμομόνωσης του κελύφους του κτιρίου. Τα προτεινόμενα μέτρα ανά κτίριο και φάση εφαρμογής συνοψίζονται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2. Μέτρα εξοικονόμησης ανά φάση εφαρμογής			
Φάση εφαρμογής	Προτεινόμενες δράσεις εξοικονόμησης	Κτίριο Θεσσαλονίκης	Κτίριο Κοζάνης
Υλοποιούμενη ανακαίνιση	Μόνωση δώματος	Βελτίωση	Όχι
	Διπλοί υαλοπίνακες	Ναι	Όχι
	Σύστημα θέρμανσης	Αντικατάσταση	Βελτίωση
	Σύστημα ψύξης	Αντικατάσταση παλαιών τοπικών μονάδων με κεντρικές μονάδες VRV	Εγκατάσταση συστήματος με κεντρικό ψύκτη και fan coils
	Μηχανικός/υβριδικός εξαερισμός	Εγκατάσταση (ποσοστό 90%)	Εγκατάσταση (ποσοστό 10%)
	Εσωτερικά σκίαστρα	Εγκατάσταση	Εγκατάσταση
	Ενεργειακά αποδοτικοί λαμπτήρες	Ναι	Ναι
	Βελτίωση φυσικού φωτισμού	Ναι	Ναι
	Ενεργειακά αποδοτικός εξοπλισμός γραφείου	Ναι	Ναι
Μελλοντική ανακαίνιση	Μόνωση τοιχοποιιών	Ναι	Όχι
	Μόνωση δώματος	Ανακατασκευή	Βελτίωση
	Εξωτερικά σκίαστρα	Ναι	Όχι
	Ανάκτηση θερμότητας στο σύστημα εξαερισμού	Ναι	Ναι
	Αυτοματισμοί ανελκυστήρων	Πλήρης αντικατάσταση	Όχι
	Ζεστό νερό χρήσης	Ναι	Ναι
	Μηχανικός/υβριδικός εξαερισμός	Εγκατάσταση (ποσοστό 10%)	Εγκατάσταση (ποσοστό 90%)



Σχήμα 3. Ειδική κατανάλωση ενέργειας στα εξεταζόμενα κτίρια ανάλογα με την εξεταζόμενη παράμετρο του ενεργειακού ισοζυγίου και με τη φάση του έργου. Αριστερά: κτίριο Θεσσαλονίκης, δεξιά: κτίριο Κοζάνης



Σχήμα 4. Θερμική άνεση για κάθε φάση του έργου, με βάση ερωτηματολόγια και προσομοιώσεις. Δεξιά: κτίριο Θεσσαλονίκης, αριστερά: κτίριο Κοζάνης

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με τις άμεσα και με τις μελλοντικά υλοποιούμενες δράσεις εξοικονόμησης ενέργειας, επιτυγχάνεται τόσο στο παλαιό όσο και στο νέο κτίριο γραφείων σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας παρά το ότι: α) αυξήθηκαν οι τιμές αλλαγών αέρα λόγω ειδικών απαιτήσεων με εγκατάσταση μηχανικού και υβριδικού εξαερισμού και β) αυξήθηκαν τα εσωτερικά θερμικά κέρδη λόγω εγκατάστασης πλήρους συστήματος μηχανοργάνωσης. Η εξοικονόμηση επιτυγχάνεται κατά σειρά σημασίας: με την τοποθέτηση διπλών υαλοπινάκων, με τη μόνωση δώματος και τοιχοποιιών, με μέτρα νυχτερινού δροσισμού και σκιασμού, με την εγκατάσταση συστημάτων ψύξης και θέρμανσης υψηλής απόδοσης και με την εφαρμογή τεχνητού φωτισμού υψηλής απόδοσης. Αναλυτικά στοιχεία παρέχονται στην παράγραφο 4.

Αξιολογώντας το σύνολο των παραπάνω δράσεων με βάση και τα διαγράμματα των σχημάτων 3 και 4, προκύπτει ότι υπάρχουν σημαντικές δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας και βελτίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων γραφείων στη Ελλάδα. Με την εφαρμογή κατάλληλων και ευέλικτων στρατηγικών ενεργειακής διαχείρισης είναι δυνατόν να ενταχθούν τα απαιτούμενα μέτρα στο υπάρχοντα σχεδιασμό. Προκύπτει επίσης σημαντική βελτίωση των συνθηκών εσωτερικού περιβάλλοντος στους χώρους εργασίας από τις παραπάνω δράσεις ανακαίνισης, ακόμα και αν δεν υλοποιηθούν όλες άμεσα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ετήσιες εκθέσεις ΚΑΠΕ 2006 & 2007, Πικέρμι Αττικής, Ελλάς.
2. Σχετική νομοθεσία: Ν. 3661/2008, οδηγίες: 2006/32/EK και 2002/91/EK, ΚΥΑ: Δ6/Β/14826/17.6.2008, Δ6/Β/13897/15.9.1999, Δ6/Β/17682/16.10.2001.
3. Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Πράσινο βιβλίο: Ευρωπαϊκή στρατηγική για αειφόρο, ανταγωνιστική και ασφαλή ενέργεια, COM 2006/0105, 8.3.2006. Προγενέστερα Πράσινα βιβλία: COM 2005/0265, 22.6.2005 και COM 2000/0769, 29.11.2000.
4. ASHRAE Standard 62, Ventilation for acceptable indoor air quality, American Society for Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 1999
5. K. Wittchen, E. Brandt, Development of a methodology for selecting office building upgrading based on a test survey in European buildings, Energy and Buildings 34 (2002) 163.
6. X. I. Κοϊνάκης, Πορεία έργου επέκτασης ΟΠΣ στη Βόρεια Ελλάδα, ΙΚΑ-ETAM, Αναφορές 1 έως 6, Θεσσαλονίκη 2000-2006.
7. P. Bluysen, E. de Oliveira Fernandes, L. Groes, G.H. Clausen, P.O. Fanger, O. Valbjorn, C.A. Bernhard, C.A. Roulet, European audit project to optimize indoor air quality and energy consumption in office buildings, Indoor Air Journal 6 (4) 1996, 221-238.
8. L.T. Wong, K.W. Mui, K.L. Shi, P.S. Hui, An energy impact assessment of indoor air quality acceptance for air-conditioned offices, Energy Conversion and Management, In Press, May 2008.

**ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
ΚΑΙ ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ
ΠΟΛΥΚΑΤΟΙΚΙΑ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ,
ΕΡΓΟ ΝΕΟΠΤΟΛΕΜΟΥ ΜΙΧΑΗΛΙΔΗ, 1959.**

A. Μιχαήλ¹, B. Ιερειδής²

¹ Πρόγραμμα Αρχιτεκτονικής, Πολυτεχνική Σχολή, Παν. Κύπρου, Καλλιπόλεως 75,
1678 Λευκωσία, e-mail: aimilios@ucy.ac.cy.

² Μεγάλου Αλέξανδρου 50, 1010 Λευκωσία, e-mail: archivass@cytanet.com.cy.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Από τη δεκαετία του 30', η αρχιτεκτονική παραγωγή στο νησί, παρακολουθεί δειλά τις εξελίξεις του διεθνούς σκηνικού. Ωστόσο, το θεωρητικό μανιφέστο του διεθνούς κινήματος και οι δυνατότητες του νέου υλικού, βρίσκουν εφαρμογή την δεκαετία του 50'. Μεταξύ των σημαντικότερων έργων της περιόδου βρίσκεται η πολυκατοικία Αλέξανδρου Δημήτριου στη λεωφόρο Στασίνου – Σαλαμίνας στη Λευκωσία, έργο του Νεοπτόλεμου Μιχαηλίδη (1957-59, διάταγμα διατήρησης 2004). Με την εκπληκτικής διαύγειας σύλληψη του και την γλυπτική του υπόσταση, το κτίριο αποτέλεσε ορόσημο της σύγχρονης αρχιτεκτονικής στην Κύπρο.

Πέρα από το έντονο συνθετικό και μορφολογικό του ενδιαφέρον, το έργο εμφανίζει μια πληθώρα περιβαλλοντικά ευαίσθητων αρχών, που αβίαστα αποδεικνύουν τη διάθεση του αρχιτέκτονα για δημιουργία μιας τοπικά προσανατολισμένης και κλιματικά ορθολογικής, σύγχρονης αρχιτεκτονικής. Ιδιαίτερη πρόνοια λαμβάνεται ως προς τη χρήση παθητικών συστημάτων βελτίωσης των κλιματικών δεδομένων. Στην πρόταση συντήρησης και αποκατάστασης, οι όροφοι των κατοικιών αποκαθίστανται ως χρήση, ανταποκρινόμενοι στις σύγχρονες ανάγκες και χωρίς να αλλοιώνεται ο αρχικός χαρακτήρας και το ακριβές περίγραμμα του κτιρίου. Οι όψεις, δέχονται ελάχιστες επεμβάσεις οι οποίες προκύπτουν ως απαίτηση εξασφάλισης θέας προς την εντός των τειχών πόλη. Η λογική παρέμβασης στο κτίριο και ιδιαίτερα η αναδιοργάνωση της κάτοψης, υπόκειται αυστηρά στις δεσμεύσεις του κατασκευαστικού κανάβου και πραγματοποιείται με τρόπο που δεν αντιβαίνει στην βιοκλιματική προσέγγιση του αρχικού σχεδιασμού. Μια σειρά από μέτρα που σχετίζονται με την εφαρμογή σύγχρονων υλικών και κατασκευαστικών μεθόδων, αποσκοπούν στην περαιτέρω βελτίωση της θερμικής λειτουργίας του κτιρίου. Οι εργασίες αποκατάστασης υπολογίζεται να ολοκληρωθούν εντός του 2009.

Η εισήγηση αυτή αφενός στοχεύει στην αποκωδικοποίηση και τεκμηρίωση των βιοκλιματικών αρχών των στρατηγικών ενεργειακού σχεδιασμού στο συγκεκριμένο έργο και αφετέρου στην παρουσίαση των προβληματισμών που αναπτύχθηκαν κατά την μελέτη αποκατάστασης του κτιρίου, τόσο όσο αφορά στο λειτουργικό ανασχεδιασμό, όσο και στη θερμική άνεση σε αυτό.

Λέξεις κλειδιά: κτίριο μοντέρνου κινήματος, αποκατάσταση, βιοκλιματικός σχεδιασμός.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

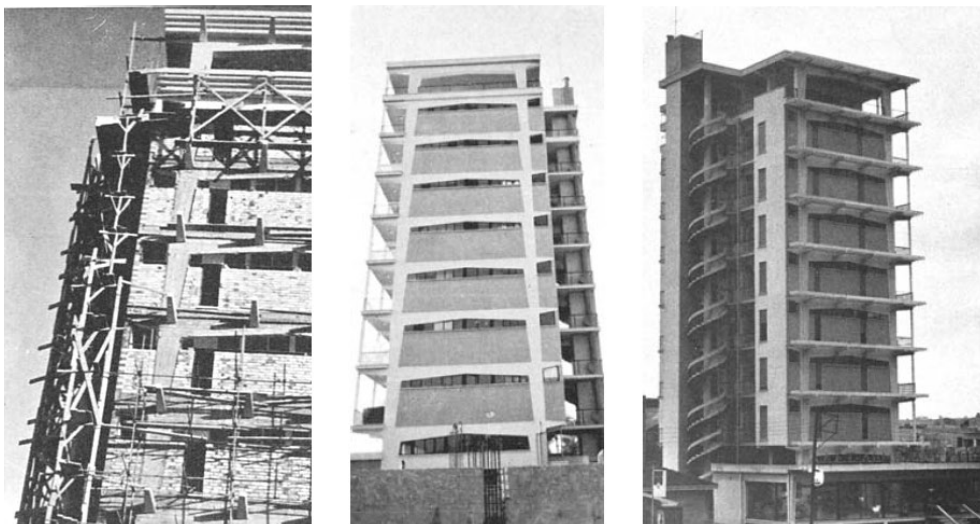
Η μεταπολεμική ιστορία της αρχιτεκτονικής στην Κύπρο χαρακτηρίζεται έντονα από ανατρεπτικής σημασίας πολιτικά γεγονότα που διατάραξαν την ομαλή εξελικτική της πορεία. Στη δεκαπενταετία μετά τον Β' Παγκόσμιο πόλεμο πραγματοποιούνται πολυσήμαντα και ενδια-

φέροντα αρχιτεκτονικά έργα εκπληκτικής διαύγειας και σύλληψης. Στην περίοδο των πρώτων χρόνων της Κυπριακής ανεξαρτησίας (1960-74) περικλείεται ο κύριος κορμός της σύγχρονης αρχιτεκτονικής. Η κατασκευαστική δραστηριότητα της εποχής δεν περιορίζεται μόνο σε έργα αρχιτεκτονικής, αλλά επεκτείνεται και σε σημαντικά έργα μηχανικής [1,2,3,4,5]. Με αναφορά το μοντέρνο και χωρίς ιδιαίτερους προβληματισμούς σε ζητήματα τοπικότητας και κλιματικών χαρακτηριστικών, δημόσια και ιδιωτικά κτίρια μετασχηματίζουν το κυπριακό τοπίο [2,3,5].

Τα περισσότερα από τα παραδείγματα της περιόδου διακρίνονται για το καθαρό, νεότερικό πνεύμα που φέρουν και εντυπωσιάζουν κυρίως λόγω της συνεπούς προσπάθειας τους για αισθητικό αποτέλεσμα υψηλού επιπέδου [6,7,8]. Στην περίοδο αυτή εμπερικλείονται τα σημαντικότερα έργα του Νεοπτόλεμου Μιχαηλίδη [1,6,8]. Η περίοδος που ακολουθεί τη τουρκική εισβολή του 1974 χαρακτηρίζεται από απότομη και άναρχη επέκταση των ελεύθερων πόλεων, αποτέλεσμα της ανάγκης στέγασης των προσφύγων.

Ο Νεοπτόλεμος Μιχαηλίδης, εφαρμόζοντας τις αρχές και δομικές μορφές του μοντερνισμού, επιχείρησε την πραγμάτωση μιας σύγχρονης αρχιτεκτονικής εμπειρίας, η οποία βασιζόταν και αντλούσε τις πηγές έμπνευσης της από τις ιδιαιτερότητες του τόπου και του κλίματος [1,9,10,11,12]. Μέσα από το υλοποιημένο έργο του επιτυγχάνεται η αρμονική συνύπαρξη ενός περιβαλλοντικά ευαίσθητου και κλιματικά ορθολογικού σχεδιασμού και παράλληλα η δημιουργία αρχιτεκτονικής υψηλού αισθητικού επιπέδου [1,10,11].

Οι βιοκλιματικές προθέσεις του αρχιτέκτονα εμφανίζονται σε μια περίοδο κατά την οποία ο όρος της βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής, όπως σήμερα τον εννοούμε, δεν είχε ακόμη διασαφηνιστεί. Ωστόσο, οι βιοκλιματικές αρχές στο σχεδιασμό του, καθορίζουν δραστικά το συνθετικό και μορφολογικό αποτέλεσμα του έργου του και συμβάλλουν στην δραστική βελτίωση των θερμικών συνθηκών διαβίωσης [1].



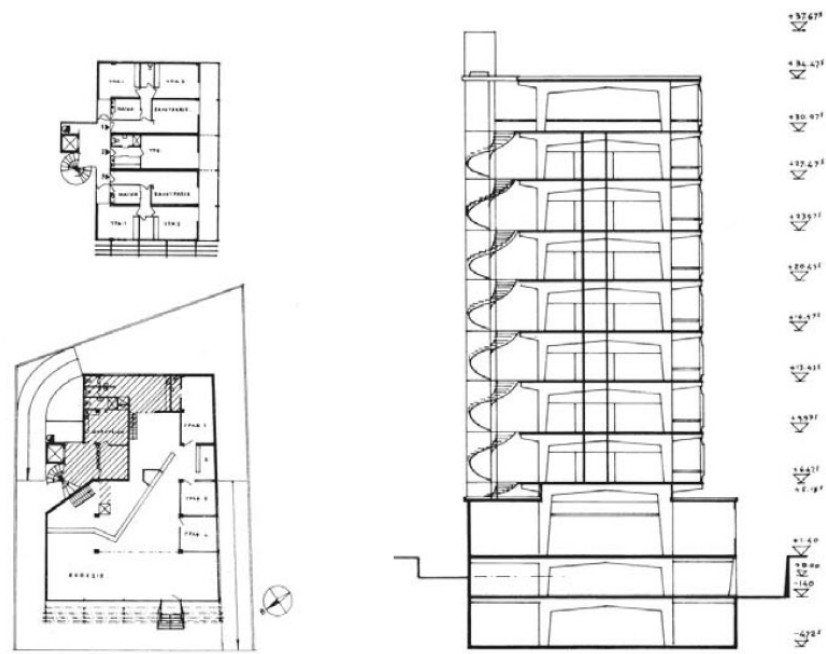
εικ. 1,2,3: Φωτογραφίες από την κατασκευή και μετά την ολοκλήρωση του κτιρίου, περιοδικό Αρχιτεκτονική το 1966 [6].

Μεταξύ των σημαντικότερων έργων του αρχιτέκτονα, βρίσκεται η πολυκατοικία Αλέξανδρου Δημητρίου, έργο δημοσιευμένο ήδη από το 1966 στην περιοδική έκδοση Αρχιτεκτονική [6]. Το κτίριο σχεδιάστηκε το 1957 και η ανέγερση του ολοκληρώθηκε το 1959 (εικ. 1,2,3). Το

2004 κηρύσσεται διατηρητέο μνημείο σύγχρονης αρχιτεκτονικής και το 2006 αρχίζει η μελέτη ριζικής αποκατάστασης, η οποία ολοκληρώνεται περί το τέλος του 2008.

2. ΑΡΧΙΚΟΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Η Πολυκατοικία Αλέξανδρου Δημητρίου βρίσκεται επί της λεωφόρου Στασίνου - Σαλαμίνας, έξω από τα τείχη της παλιάς Λευκωσίας, πολύ κοντά στην πύλη Αμμοχώστου. Η κύρια όψη συνορεύει με την λεωφόρο, είναι δυτική με απόκλιση 35 μοιρών προς το βορρά. Πρόκειται για μικτό κτίριο γραφειακών, εκθεσιακών χώρων και διαμερισμάτων. Με συνολικό ύψος 34,50 μέτρων, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προσπάθειες της περιόδου για σχεδιασμό υψηλού κτιρίου.



εικ. 4,5,6 : Πρωτότυπα σχέδια κτιρίου, κάτοψη τυπικού ορόφου και ισόγειου (αριστερά), τομή (δεξιά), πηγή: περιοδικό Αρχιτεκτονική, 1966 [6].

Η κύρια είσοδος της πολυκατοικίας βρίσκεται στη βόρεια πλευρά του κτιρίου, έτσι ώστε να μην διακόπτεται η συνέχεια του υαλοστασίου στον εκθεσιακό χώρο (εικ. 5). Η κατακόρυφη κίνηση προς τους ορόφους επιτυγχάνεται μέσω της κυκλικής κλίμακας ανόδου και ανελκυστήρα. Οι κινήσεις στους ορόφους είναι απλές και σαφείς αφού ένας διάδρομος διαπερνά την βόρεια πλευρά της κάτοψης, δημιουργώντας προσβάσεις σε όλους τους χώρους κατοικιών (εικ. 4). Οι επτά όροφοι διαμερισμάτων, οι οποίοι αποτελούνται από δύο διαμερίσματα των δύο υπνοδωματίων και ένα στούντιο, υψώνονται υπό μορφή πύργου στο κέντρο του ισόγειου. Ο όγδοος όροφος παρέμεινε μέχρι σήμερα καλυμμένη ταράτσα με απρόσκοπτη θέα προς όλες τις κατευθύνσεις. Στο ισόγειο, ελαφρώς υπερυψωμένο, βρίσκεται ο μεγάλος εκθεσιακός χώρος. Στο ημιυπόγειο υπάρχει ένα δεύτερο κατάστημα και χώρος στάθμευσης, ενώ το υπόγειο στεγάζει βοηθητικούς χώρους.

Λόγω της υψηλής δόμησης του οικοπέδου οι υπαίθριοι χώροι είναι περιορισμένοι ενώ η βλάστηση περιορίζεται στο πεζοδρόμιο. Ωστόσο, η τοποθέτηση του κτιρίου στο κέντρο του οικοπέδου και η μείωση της κάλυψης στους ορόφους σε σχέση με το ισόγειο, περιορίζει την αίσθηση του συμπαγούς κτιριακού όγκου. Στους ορόφους των κατοικιών υπάρχουν ικανο-

ποιητικού εμβαδού ημιυπαίθριοι χώροι, τοποθετημένοι στη νότια πλευρά. Μέσω των σημαντικών διαστάσεων ανοιγμάτων εξασφαλίζονται οπτικές φυγές.

Για την κατασκευή χρησιμοποιήθηκε σκελετός από μπετόν αρμέ με πλαίσια εμφανή στις δύο στενές όψεις (εικ. 1). Η λύση των πλαισίων, έξι συνολικά, επέτρεψε τις μετέπειτα αναπροσαρμογές αφού δεν υπήρχαν ενδιάμεσα υποστυλώματα, ενώ παράλληλα έδωσε τη δυνατότητα ύπαρξης ενιαίου χώρου στο ισόγειο και ημιυπόγειο. Το κτίριο αποτελεί μία αδιάψευστη μαρτυρία της απόλυτης συνάφειας μεταξύ αρχιτεκτονικής και μηχανικής με την μεταβαλλόμενη διατομή της δοκού να παρακολουθεί και να εκφράζει τη διάταξη των ροών. Η εξωτερική τοιχοποιία κατασκευάστηκε από διπλή οπτοπλινθοδομή και σοβά. Έχει τοποθετηθεί σε εσοχή από το φέροντα οργανισμό, προβάλλοντας μορφολογικά τη δομική υπόσταση του κτιρίου. Η κυκλική εξωτερική κλίμακα είναι προκατασκευασμένη, όπως και η κλίμακα εισόδου που οδηγεί στον υπερυψωμένο εκθεσιακό χώρο.

3. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ

Η θερμική άνεση εντός του κτιριακού κελύφους, πέρα από τα κλιματικά δεδομένα, επηρεάζεται από στρατηγικούς χειρισμούς θερμικού ελέγχου που αποτελούν στοιχεία παθητικού ηλιακού σχεδιασμού και βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής. Η ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απαιτήσεων σχετίζεται με μια πληθώρα μέτρων και χειρισμών που αναφέρονται στην χωροθέτηση, στην οργανωτική δομή και στις κατασκευαστικές επιλογές.

Στο κτίριο έχουν χρησιμοποιηθεί απλά παθητικά συστήματα με κύρια αυτά της εκμετάλλευσης του άμεσου ηλιακού κέρδους, της ηλιοπροστασίας και του φυσικού δροσισμού. Οι συνθετικές αρχιτεκτονικές επιλογές και στρατηγικοί χειρισμοί δημιουργίας ελεγχόμενου κλιματικά περιβάλλοντος, επιδρούν εντονότερα κατά τις περιόδους που εμφανίζονται ακραίες κλιματικές συνθήκες και καθορίζονται από την κυρίαρχη ανάγκη για εξασφάλιση θέρμανσης ή ψύξης. Στα παραπάνω πρέπει να προστεθεί η εκμετάλλευση του φυσικού φωτισμού. Ενεργειακή εξοικονόμηση μπορεί να εξασφαλιστεί μέσω του περιβάλλοντος χώρου με τη χρήση μέτρων βελτίωσης μικροκλιματικών δεδομένων. Στις επόμενες παραγράφους αναλύονται οι κυριότερες στρατηγικές βιοκλιματικού σχεδιασμού που εντοπίζονται.

Συστήματα και στρατηγικές θέρμανσης: Οι χώροι με αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις είναι τοποθετημένοι στο νότο, ενώ βοηθητικοί και άλλοι χώροι στο βορρά, οι οποίοι λειτουργούν ως χώροι ανάσχεσης θερμικών απωλειών. Η διάταξη των κατοικιών στους ορόφους επιτρέπει την ύπαρξη νότιων ανοιγμάτων σε όλους τους χώρους με συνολική επιφάνεια 19,8 τ.μ. ανά όροφο. Το εμβαδόν αυτό αντιστοιχεί σε 34,4 % ανοιγμάτων επί του νότιου τοίχου. Εσωτερικά διαχωριστικά υλοποιούνται με ξύλινα και υάλινα πάνελς, αντί συμπαγών τοίχων, εξασφαλίζοντας νότιο ηλιασμό στο βάθος των χώρων. Τα κουφώματα είναι μεταλλικά με απλούς υαλοπίνακες.

Συστήματα και στρατηγικές ψύξης: Σε όλα τα νότια και δυτικά ανοίγματα προβλέφθηκε προστασία από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία το καλοκαίρι. Η προστασία των ανοιγμάτων στον νότο εξασφαλίζεται μέσω προβόλων ικανών διαστάσεων. Στη δυτική όψη υπάρχουν σταθεροί ηλιοθραύστες από μωσαϊκό. Οι παραπάνω διατάξεις, πέρα από την επιθυμητή ηλιοπροστασία, συντελούν δραστικά στην αποφυγή θάμβωσης στο εσωτερικό του κτιρίου. Αειθαλή δέντρα στο όριο με το δρόμο προσφέρουν ηλιοπροστασία στο δυτικό υαλοστάσιο του εκθεσιακού χώρου. Επιπλέον, η πλειοψηφία των ανοιγμάτων στους ορόφους προστατεύεται από τον άμεσο ηλιασμό με τη χρήση εξωτερικών ξύλινων ρολών. Η λειτουργική οργάνωση των κατόψεων, η θέση και οι διαστάσεις των ανοιγμάτων και η χρήση ξύλινων πάνελς και

ανοιγόμενων υαλοπινάκων αντί συμπαγών τοίχων στο εσωτερικό των διαμερισμάτων, επιτρέπουν τη ροή του αέρα διαμέσου του κτιρίου. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τα ψυχομετρικά διαγράμματα, ο διαμπερής αερισμός του κτιριακού κελύφους αποτελεί το σημαντικότερο μέτρο δροσισμού.

Στρατηγική φυσικού φωτισμού: Η διείσδυση και η κατανομή του φυσικού φωτισμού μέσω της κατάλληλης διαμόρφωσης των κατόψεων, κρίνεται ως πολύ ικανοποιητική, επιπλέον εξασφαλίζει μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων σε τεχνητό φωτισμό και των ανεπιθύμητων, κατά τους θερινούς μήνες, θερμικών κερδών.

Συστήματα θέρμανσης και ψύξης: Ζεστό νερό χρήσης εξασφαλίζεται σε όλα τα διαμερίσματα μέσω ηλεκτρικού θερμοσίφωνα. Η αρχική μελέτη δεν προέβλεπε υποστήριξη από τεχνικά συστήματα ψύξης ή θέρμανσης. Κλιματιστικές μονάδες έχουν εκ των υστέρων τοποθετηθεί σε αρκετούς χώρους του κτιρίου.

4. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Το 2004, και με εμφανή τα σημάδια της εγκατάλειψης, το κτίριο κηρύσσεται διατηρητέο μνημείο σύγχρονης αρχιτεκτονικής. Το 2005 περιέρχεται στην ιδιοκτησία της Εταιρείας Γενικών Κατασκευών, η οποία και αναθέτει την μελέτη ριζικής αποκατάστασης και συντήρησης του κτιρίου στο αρχιτεκτονικό γραφείο IMA Αρχιτεκτονική. Αναγνωρίζοντας καταρχήν τη σημασία του έργου για τη σύγχρονη αρχιτεκτονική κληρονομιά αλλά και την τοπική κοινωνία, κατά συνέπεια τη σημασία της κατάλληλης αποκατάστασης, οι αρχιτέκτονες καταφεύγουν σε μια ουσιαστική ανάλυση του έργου σε λειτουργικό, μορφολογικό, κατασκευαστικό και βιοκλιματικό επίπεδο. Η ανάλυση αυτή και το αποτέλεσμα συζητήσεων με τους ιδιοκτήτες του ακινήτου και τις τοπικές πολεοδομικές αρχές τροφοδότησαν την μελέτη αποκατάστασης, η οποία και ολοκληρώνετε σε επίπεδο οριστικής προμελέτης το πρώτο εξάμηνο του 2007, και σε επίπεδο μελέτης εφαρμογής περί το τέλος του 2008.

Το Νέο Λειτουργικό Πρόγραμμα και οι Στρατηγικές Αποκατάστασης: Στην πρόταση συντήρησης και αποκατάστασης, οι όροφοι των κατοικιών αποκαθίστανται ως χρήση, ανταποκρινόμενοι στις σύγχρονες ανάγκες και χωρίς να αλλοιώνεται ο αρχικός χαρακτήρας και το ακριβές περίγραμμα του κτιρίου. Οι τρεις κατοικίες που βρίσκονται σε κάθε όροφο ενοποιούνται σε μία. (εικ. 7,11).

Στην καλυμμένη ταράτσα του 8^{ου} ορόφου προστίθεται μία ακόμα κατοικία, η οποία προβλεπόταν από τον αρχικό σχεδιασμό. Επιλέγεται ο περιορισμός του περιγράμματος πίσω από τα στοιχεία του φέροντος οργανισμού, λύση ενδεδειγμένη δεδομένης της εγκαθίδρυσης στη συλλογική μνήμη του 8^{ου} ορόφου ως κενού (εικ. 8, 12).



εικ. 7,8: Ψηφιακές απεικονίσεις από τη μελέτη αποκατάστασης

Το ισόγειο κατάστημα αποκαθίσταται στην αρχική του μορφή. Στο ημιυπόγειο προτείνεται η λειτουργία χώρου αναψυχής και αναμένεται να αποτελέσει χώρο εκτόνωσης των κατοίκων και επισκεπτών του κτιρίου αλλά και να τονώσει τον εμπορικό χαρακτήρα της περιοχής. Στον υπόγειο χώρο τοποθετούνται αποθηκευτικοί χώροι και προβλέπονται ικανές προσβάσεις με τρόπο που να μην επηρεάζεται ο αρχικός σχεδιασμός. Ο περιβάλλον χώρος αποκαθίσταται και προτείνεται η σαφής οργάνωσης των άτυπων μέχρι σήμερα διελεύσεων πεζών και οχημάτων. Εγκαθίστανται σύγχρονα συστήματα μηχανικής στάθμευσης οχημάτων.



εικ. 9: δυτική όψη _ πρόταση



εικ. 10: ανατολική όψη _ πρόταση

Οι όψεις του κτιρίου δέχονται ελάχιστες επεμβάσεις. Προτείνεται η αύξηση των ανοιγμάτων στη δυτική και ανατολική όψη, σύμφωνα με τον κάνναβο των υφισταμένων φεγγιτών και παραθύρων και με τρόπο ώστε τα νέα ανοίγματα να εντάσσονται και παράλληλα να διακρίνονται από τα υπάρχοντα (εικ. 9,10).

Βιοκλιματικός Σχεδιασμός: Η ανάλυση που προηγήθηκε καταδεικνύει την ιδιαίτερη πρόνοια του αρχιτέκτονα ως προς τη χρήση παθητικών συστημάτων βελτίωσης των θερμοκρασιακών δεδομένων και τη διάθεση του για δημιουργία μιας τοπικά προσανατολισμένης και κλιματικά ορθολογικής σύγχρονης αρχιτεκτονικής. Στη μελέτη αποκατάστασης η οργάνωση της κάτοψης, υπόκειται αυστηρά στις δεσμεύσεις του κατασκευαστικού καννάβου των πλαϊσίων και με τρόπο που δεν αντιβαίνει στη βιοκλιματική προσέγγιση του αρχικού σχεδιασμού. Κατ' επέκταση, και παρά την πλήρη αναδιοργάνωση των κατόψεων, οι χώροι με αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις παραμένουν στο νότο, ενώ βοηθητικοί και άλλοι χώροι στο βορρά, λειτουργώντας ως χώροι ανάσχεσης θερμικών απωλειών (εικ. 11, 12).

Η εξωτερική τοιχοποιία θερμομονώνεται εσωτερικά με τη χρήση πετροβάμβακα 80 χιλιοστών τοποθετημένου σε εσωτερικό κέλυφος από γυψοσανίδα. Η λύση αυτή, κρίθηκε ως η ενδεδειγμένη έναντι χρήσης θερμομονωτικών τούβλων και εξωτερικής θερμομόνωσης, αφού αφενός εξασφαλίζει την θερμομόνωση όλων των στοιχείων της κατασκευής περιλαμβανόμενων των στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, και αφετέρου δεν επηρεάζει την μορφολογική υπόσταση του κτιρίου.



εικ. 11,12,13: Πρόταση αναδιοργάνωσης ορόφων

Τα υπάρχοντα κουφώματα αντικαθίστανται με κουφώματα αλουμινίου θερμοδιακοπτόμενων διατομών και οι απλοί υαλοπίνακες με διπλούς ενεργειακούς χαμηλής εκπομπής (low-e). Η τεχνολογία αυτή εξασφαλίζει μείωση της μετάδοσης της υπέρυθρης ακτινοβολίας διαμέσου του υαλοπίνακα και κατά συνέπεια περιορισμό των θερμικών απωλειών και ηλιακών κερδών κατά τη χειμερινή και θερινή περίοδο αντίστοιχα. Επιπλέον, για την μείωση των θερμικών απωλειών από τις υάλινες επιφάνειες, επιλέγεται όπως τμήματα των υαλοστασίων παραμείνουν σταθερά, περιορίζοντας τις απώλειες αεροστεγανότητας. Ο διαμεπής αερισμός παρέχεται μέσω κατάλληλης επιλογής ανοιγόμενων τμημάτων υαλοστασίου, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται κατευθυνόμενη ροή του αέρα διαμέσου του κτιριακού όγκου και συνεπώς την ψύξη του κτιριακού κελύφους κατά τους θερινούς μήνες. Τα ξύλινα ρολά αντικαθίστανται με εξωτερικές θερμομονωτικές περσίδες αλουμινίου, οι οποίες, έναντι των ρολών, παρέχουν δυνατότητα ηλιοπροστασίας χωρίς τον αποκλεισμό της θέας και του φυσικού φωτισμού. Στο εσωτερικό όλων των ανοιγμάτων τοποθετούνται ρολά υφασμάτων πετασμάτων για αποφυγή της θάμβωσης.

Οι οπτικές φυγές έτυχαν ιδιαίτερης προσοχής κατά την μελέτη αποκατάστασης. Η εξασφάλιση θέας προς την πόλη της Λευκωσίας και ο άπλετος φυσικός φωτισμός παρέχει υψηλά επίπεδα οπτικής άνεσης. Άμεσα συνδεδεμένη με την οπτική άνεση είναι η ευχάριστη θέα που εξασφαλίζεται με τη δημιουργία ανθώνων σε κατάλληλα σημεία του κτιρίου. Σημαντική φύτευση τοποθετείται στην οροφή του ισόγειου εκθεσιακού χώρου, η οποία μέσω της κατάλληλης διαμόρφωσης προσφέρεται ως υπαίθριος χώρος του διαμερίσματος πρώτου ορόφου. Η βελτίωση των μικροκλιματικών δεδομένων μέσω της κατάλληλης βλάστησης, στο βαθμό που αυτό είναι εφικτό, ενισχύεται με τη δημιουργία άβαθους δεξαμενής νερού που στόχο έχει την εξασφάλιση ψύξης μέσω εξάτμισης (εικ. 13).

Συστήματα τεχνικής υποστήριξης θέρμανσης - ψύξης: Προβλέπεται εγκατάσταση ανεξάρτητου κεντρικού συστήματος κλιματισμού για όλους τους χώρους με τη χρήση αντλίας θερμότητας υψηλής απόδοσης (chiller / heatpump). Η ψύξη επιτυγχάνεται με τη χρήση θερματικών μονάδων νερού (Fan-Coil Units) και η θέρμανση με τη χρήση ανεξάρτητου επιδαπέδιου συστήματος νερού (hydronic underfloor heating). Η χρήση αντλίας θερμότητας εξασφαλίζει σημαντικά χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα κεντρικής θέρμανσης καθώς για τη απόδοση του ψυκτικού ή θερμικού έργου χρησιμοποιείται η θερμική ενέργεια του περιβάλλοντος. Επιπλέον για κάθε οικιστική μονάδα προτείνονται ηλιακοί συσσωρευτές για ζεστό νερό χρήσης. Η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πάνελς ή άλλων ηλιακών διατάξεων δεν εφαρμόστηκε λόγω της περιορισμένης επιφάνειας οροφής σε σχέση με τον θερμαινόμενο όγκο του κτιρίου.

5. ΚΑΤΑΛΗΚΤΙΚΑ

Ο ανασχεδιασμός του κτιρίου με σεβασμό στο μορφολογικό, κατασκευαστικό και βιοκλιματικό χαρακτήρα που αρχικού σχεδιασμού, αποτέλεσε κύρια μέριμνα των μελετητών. Η βιοκλιματικά ενδεδειγμένη αναδιοργάνωση της κάτοψης, η αξιοποίηση των παθητικών συστημάτων εξοικονόμησης ενέργειας και η θερμομονωτική προστασία του εξωτερικού περιβλήματος αναμένεται να εξασφαλίσουν υψηλό επίπεδο θερμικής άνεσης χωρίς οποιαδήποτε τεχνική υποστήριξη για τη μεγαλύτερη περίοδο του έτους. Επιπλέον, η τοποθέτηση των κατάλληλων, με ενεργειακά και τεχνοοικονομικά κριτήρια, συστημάτων τεχνικής υποστήριξης, θέρμανσης και ψύξης, θα εξασφαλίζει τα επιθυμητά επίπεδα θερμικής άνεσης κατά τις κλιματικά ακραίες περιόδους του χρόνου. Τα παραπάνω μέτρα ενισχύουν την βιοκλιματική προσέγγιση του αρχικού σχεδιασμού. Οι εργασίες αποκατάστασης του κτιρίου θα αρχίσουν άμεσα και υπολογίζεται να ολοκληρωθούν εντός του 2009, οπότε και το κτίριο θα παραδοθεί προς επανάχρηση και πλήρη λειτουργία.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στους συναδέλφους αρχιτέκτονες Σταυρούλα Χριστοφιλοπούλου, Μαρία Ξενοφώντος και David Castillo, τους ηλεκτρομηχανολόγους Γιάννη Μιτσίδη και Μιχάλη Νικολαΐδη και τους πολιτικούς μηχανικούς Κώστα Μελέτιου και Μαρία Σινάπη για την δημιουργική συνεργασία. Στην Εταιρεία Γενικών Κατασκευών και τον διευθυντή της Κυριάκο Αβρααμίδη για την συνεργασία και την εμπιστοσύνη που μας έδειξε.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μιχαήλ Α., Αρχιτέκτονας Νεοπτόλεμος Μιχαηλίδης, η βιοκλιματική διάσταση στο έργο του. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2003.
2. Αιμιλιανίδης Χ., Αντωνίου Κ., Παναγίδου Φ., Σύγχρονη Κυπριακή Αρχιτεκτονική. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1985.
3. Σιερεπεκλής Ζ., ομιλία, Διαδρομές στη μεταπολεμική αρχιτεκτονική, Λευκωσία, 1996.
4. Ατταλίδης, Μ., Παράγοντες που διαμόρφωσαν την Κυπριακή κοινωνία μετά την ανεξαρτησία. Κυπριακή Ζωή και Κοινωνία - Διαλέξεις Λαϊκού Πανεπιστημίου, Δήμος Λευκωσίας, 1993.
5. Σημαιοφορίδης Γ., Αίσωπος Γ., Τοπία Εκμοντερνισμού. Metropolis press, Αθήνα, 2002.
6. Αρχιτεκτονική 1966/55, περιοδικό, Αφιέρωμα στην Κυπριακή Αρχιτεκτονική. Εκδότης Αντώνης Κιτσίκης, Αθήνα, 1966.
7. Αρχιτέκτονες και Μηχανικοί, περιοδικό τεύχος 28, Σύνδεσμος Πολιτικών Μηχανικών και Αρχιτεκτόνων Κύπρου, Οκτώβριος 1993.
8. Αρχιτέκτων, περιοδικό τεύχος 23, Σύλλογος Αρχιτεκτόνων Κύπρου, Λευκωσία, 1993.
9. Economides M., «The relationship between modern and traditional in the work of the architect Neoptolemos Michaelides», London, June 1992.
10. Μιχαηλίδης Ν., Αρχιτεκτονική της γης. Κυπριακή λαϊκή τέχνη, Ίδρυμα Πιερρίδη, Λευκωσία 1993.
11. Μιχαήλ Α., Παπανικολάου Α., Νεοπτόλεμος Μιχαηλίδης, με λογισμό και όνειρο. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2002.
12. Amourgis, S., Critical Regionalism. College of Environmental Design, California State Polytechnic University, Pomona, California, 1991.

ΚΛΙΜΑ - ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΠΕ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΝΟΣ ΑΕΡΙΖΟΜΕΝΟΥ ΑΨΙΔΩΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΜΙΑΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΜΕΡΑΣ

¹Φείδαρος Δ.Κ., ¹Μπαξεβάνου Α.Α., ¹Μπαρτζάνας Θ., ^{1,2}Κίττας Κ.*

¹Κέντρο Έρευνας Τεχνολογίας & Ανάπτυξης Θεσσαλίας – Ινστιτούτο Τεχνολογίας & Διαχείρισης
Αγρο-οικοσυστημάτων, Τεχνολογικό Πάρκο Θεσσαλίας, 1η ΒΙ.ΠΕ. Βόλου, 38500 Βόλος,
dfeid@cereteth.gr, cbaxe@cereteth.gr, bartzanas@cereteth.gr

²Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής
και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος,
Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας, ckittas@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται προσομοίωση των φαινομένων μεταφοράς που αναπτύσσονται στο εσωτερικό αεριζόμενο τοξωτού θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια μιας ηλιακής ημέρας λαμβάνοντας υπόψη τις οπτικές ιδιότητες των φυτών μόνο στο φάσμα της PAR ακτινοβολίας. Προσομοιώνεται η ημέρα της φθινοπωρινής ισημερίας για περιοχή της κεντρικής Ελλάδος και εξετάζονται δύο περιπτώσεις. Στη μια η εξωτερική θερμοκρασία θεωρείται σταθερή ενώ στη δεύτερη περίπτωση μεταβαλλόμενη κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για την επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν τα φαινόμενα μεταφοράς που αναπτύσσονται εντός του θερμοκηπίου χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων. Τα φυτά εντός του θερμοκηπίου αντιμετωπίζονται ως πορώδες υλικό ενώ η μετάδοση της ακτινοβολίας περιγράφεται με το μοντέλο DO. Η ροή θεωρείται ασυμπίεστη, μη-μόνιμη και τυρβώδης. Προκύπτει ότι η θεώρηση της εξωτερικής θερμοκρασίας ως μεταβαλλόμενης είναι απαραίτητη για τη σωστή εκτίμηση του εσωτερικού θερμικού πεδίου δεδομένου ότι το τελευταίο κυριαρχείται από τη συναγωγή που επιβάλλει το εισερχόμενο ρεύμα αέρα ενώ η κατανομή της ακτινοβολίας στη φωτοσυνθετικά ενεργή κλάση δεν επηρεάζεται από αυτή.

Keywords: Μικροκλίμα θερμοκηπίου, προσομοίωση ακτινοβολίας, ηλιακή ακτινοβολία, CFD, θερμοαποθήκευση

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλιακή ενέργεια, καθαρή και ασφαλής, είναι ένα ελκυστικό υποκατάστατο των συμβατικών ορυκτών καυσίμων για παθητικές και ενεργητικές εφαρμογές θέρμανσης. Κατά τη διάρκεια της ημέρας πλεόνασμα της θερμότητας που προέρχεται από την ηλιακή ενέργεια είναι δυνατό να αποθηκευτεί για μικρά ή μεγαλύτερα διαστήματα και να ανακτηθεί κατά τις βραδινές ώρες προκειμένου να ικανοποιηθούν οι θερμικές ανάγκες κλειστών χώρων. Ένα θερμοκήπιο μπορεί να θεωρηθεί ως μια κλειστή κοιλότητα, η οποία παγιδεύει μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία και κατ' αυτόν τον τρόπο 'αποθηκεύει' θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος με αποτέλεσμα να δημιουργείται κατάλληλο μικροκλίμα για την αύξηση της παραγωγικότητας. Η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας καθορίζει σε σημαντικό βαθμό το ισοζύγιο ενέργειας και επηρεάζει, εκτός από τις φυσιολογικές δραστηριότητες των φυτών, την ανάπτυξη ζιζανίων και ασθενειών.

Λόγω των πρακτικών δυσκολιών στην ακριβή μέτρηση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, πολλές μελέτες έχουν γίνει σε αυτό το αντικείμενο με υπολογισμούς και προσομοιώσεις, χρησιμοποιώντας πλήθος αναλυτικές και αριθμητικές τεχνικές και προσεγγίσεις [1]. Δυναμικά μοντέλα θερμοκηπίων, όπως αυτά των εργασιών [2, 3] έχουν αναπτυχθεί προκειμένου να προσδιοριστεί η επίδραση της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας ως βοηθητική πηγή ενέργειας σε ένα θερμοκήπιο. Παράλληλα αρκετές εργασίες έχουν

πραγματοποιηθεί με σκοπό τον σχεδιασμό, τη μοντελοποίηση και τον έλεγχο της αποθήκευσης ενέργειας και την βελτιστοποίηση τους. Στην αναφορά [4] ένα δυναμικό μαθηματικό μοντέλο έχει αναπτυχθεί για την πρόλεξη θερμοκρασιών και επιπέδων υγρασίας σε ένα κυκλικού τύπου θερμοκήπιο, και στην [5] γίνεται διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση συστήματος αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας ως θερμότητα σε πετρώδη κλίνη για την κάλυψη μέρους των αναγκών του θερμοκηπίου.

Η μετάδοση θερμότητας στο κέλυφος και μέσα στην δομική κατασκευή είναι ένα δυναμικό φαινόμενο κυρίως λόγω της αποθήκευσης θερμότητας στα υλικά που την συνθέτουν και στα φυτά, η οποία μεταβάλλει σημαντικά το θερμικό, και λόγω των δυνάμεων θερμικής άνωσης, και το ροϊκό πεδίο. Συνεπώς είναι αναγκαίο να αντιμετωπιστεί το μη-μόνιμο φαινόμενο κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος, που στην προκειμένη περίπτωση, είναι η ηλιακή ημέρα. Αυτό το φαινόμενο αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας αριθμητικής μελέτης και αφορά θερμοκήπιο τοξωτού τύπου (τούνελ) που περιέχει μέσα καλλιέργεια τομάτας. Σε μια αντίστοιχη εργασία [6] είχε μελετηθεί η ίδια γεωμετρία με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων χωρίς να ληφθούν υπόψη οι θερμικές ιδιότητες των υλικών κάλυψης και οι οπτικές και θερμικές ιδιότητες των φυτών στο εσωτερικό και με σταθερή την εξωτερική θερμοκρασία.

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η ροή εντός του δωματίου θεωρείται 2Δ, μη-μόνιμη ασυμπίεστη και τυρβώδης. Στην παρούσα εργασία τα φαινόμενα μεταφοράς και η μετάδοση θερμότητας περιγράφονται από τις Navier-Stokes εξισώσεις[7]. Στην εξίσωση μεταφοράς της ορμής εμφανίζονται ως όροι πηγής ένα όρος f_b που οφείλεται στη θερμική άνωση και ένας όρος S_i που προέρχεται από την επιπλέον πτώση πίεσης που εισάγει η ύπαρξη πορώδους σώματος.

Τα φυτά μέσα στο θερμοκήπιο μοντελοποιούνται ως πορώδες μέσο, τα οποία εισάγουν επιπλέον πτώση πίεσης [14]. Η πτώση πίεσης αυτή συντίθεται από δύο όρους, έναν ιξώδη, όρος γνωστός ως νόμος του Darcy, και έναν αδρανειακό, όπως προκύπτει από την ακόλουθη σχέση. $S_i = -(\mu a^{-1} u_i + C_2 \rho u_i^2) (1)$ όπου, a είναι η περατότητα του πορώδους υλικού και C_2 ο συντελεστής της αδρανειακής αντίστασης. Στην εξίσωση της ενέργειας η δρώσα αγωγιμότητα του υλικού k_{eff} υπολογίζεται από τη σχέση $(k_{eff} = \gamma k_{f,eff} + (1 - \gamma) k_s) (2)$, όπου γ το ποσοστό του πορώδους ($\gamma=1$ σημαίνει ότι όλο το σώμα είναι ρευστό), και k_s η αγωγιμότητα του εμπλεκόμενου στερεού και $k_{f,eff}$ η δρώσα αγωγιμότητα του εμπλεκόμενου ρευστού υπολογιζόμενη ως $k_{f,eff} = k + k_t (3)$, όπου $k_t = C_p \mu_t Pr_t^{-1} (4)$ η αγωγιμότητα λόγω τύρβης.

Υπάρχει, δε, ένας επιπλέον όρος πηγής, S_h , που προέρχεται από την συνεισφορά της ακτινοβολίας. Εντός των στερεών τμημάτων του υπολογιστικού πεδίου επιλύεται η εκφυλισμένη μορφή της εξίσωσης, καθώς μεταπίπτει σε εξίσωση μετάδοσης θερμότητας λόγω

αγωγιμότητας. $k_s \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} + S_h = 0 (5)$. Η επίδραση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

στους εξωτερικούς τοίχους-παράθυρα και την οροφή, η εκπεμπόμενη από τα υλικά ακτινοβολία καθώς και η μετάδοση της ακτινοβολίας μέσα στο υπολογιστικό πεδίο προσομοιώνονται με το μοντέλο DO. Σε αυτό το μοντέλο η ακτινοβολία θεωρείται ότι μεταφέρεται διαμέσου του υλικού με την δική της ταχύτητα ταυτόχρονα προς όλες τις κατευθύνσεις. Το μοντέλο DO επιτρέπει την επίλυση της ακτινοβολίας σε ημι-διάφανους τοίχους. Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί σε μοντέλο στο οποίο οι οπτικές ιδιότητες των υλικών εξαρτώνται από το μήκος κύματος. Έτσι είναι κατάλληλη για να χρησιμοποιηθεί με υλικά στα οποία ο φασματικός συντελεστής απορρόφησης α_λ διαφοροποιείται με βηματικό συναρτήσει του μήκους κύματος.

Το μοντέλο ακτινοβολίας διακριτών κατευθύνσεων (Discrete ordinates – DO) επιλύει την εξίσωση μεταφοράς ακτινοβολίας (RTE) για πεπερασμένο αριθμό στερεών γωνιών, κάθε μια

από τις οποίες αντιστοιχεί σε μοναδιαίο διάνυσμα κατεύθυνσης \vec{s} , σταθερό και ορισμένο σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x,y,z). Έτσι μετατρέπεται την εξίσωση RTE σε εξίσωση μεταφοράς της έντασης ακτινοβολίας στις χωρικές συντεταγμένες (x,y,z). Το μοντέλο DO επιλύει τόσες εξισώσεις μεταφοράς όσες κατευθύνσεις \vec{s} ορίζονται [8]. Η RTE για τη φασματική ένταση ακτινοβολίας $I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})$ παίρνει την ακόλουθη μορφή.

$$\nabla \cdot (I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (\alpha_\lambda + \sigma_s) I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = \alpha_\lambda n^2 I_{b\lambda}(\vec{r}) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (6)$$

Στην εξίσωση αυτή συντελεστής διάθλασης, n, και ο συντελεστής σκέδασης, σ, θεωρούνται ανεξάρτητοι από το μήκος κύματος. Η συνάρτηση φάσης, Φ, θεωρείται ισοτροπική. Ο υπολογιστικός χώρος 4π υπολογιστικό σημείο διακριτοποιείται σε $N_\theta \times N_\phi$ στερεές γωνίες μεγέθους ω_i . Οι γωνίες θ και φ είναι αντίστοιχα η πολική και αζιμουθιακή γωνία και μετρώνται ως προς το γενικό καρτεσιανό σύστημα (x,y,z). Στη δική μας περίπτωση επιλέγεται μια διακριτοποίηση 3x3. Αν και σε αυτήν την εξίσωση ο συντελεστής διάθλασης λαμβάνεται σταθερός, κατά τον υπολογισμό των οριακών συνθηκών που επιβάλλονται στους ημιδιαφανείς τοίχους και της εκπομπής μέλανος σώματος η εξάρτησή του από το μήκος κύματος λαμβάνεται υπόψη. Η εξίσωση RTE ολοκληρώνεται κατά μήκος μιας κλάσης μήκους κύματος και η τελική τιμή της ακτινοβολίας λαμβάνεται από τη άθροιση όλων των κλάσεων. Η εξίσωση RTE σχετίζεται με την εξίσωση της ενέργειας μέσω ενός ογκομετρικού όρου πηγής ο οποίος δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση [9]:

$$S_h = -\frac{\partial q_{r_i}}{\partial x_i} = \alpha_\lambda \left(4\pi I_{b\lambda}(\vec{r}) - \int_{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}) d\Omega \right) \quad (7)$$

Η ροή μέσα στο θερμοκήπιο είναι τυρβώδης και προσομοιώνεται με το (standard) k-ε μοντέλο υψηλού αριθμού Re [7]. Το φαινόμενο της θερμικής άνωσης αντιμετωπίζεται με την προσέγγιση Boussinesq. Η χρήση του μοντέλου προσφέρει ταχύτερη σύγκλιση λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή της πυκνότητας λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας μόνο κατά τον υπολογισμό του όρου πηγής f_b της εξίσωσης μεταφοράς ορμής ενώ οπουδήποτε αλλού θεωρεί την πυκνότητα σταθερή. Συγκεκριμένα προσεγγίζει την πυκνότητα από τη σχέση $\rho = \rho_0(1 - \beta \Delta T)$ (8), όπου β ο συντελεστής θερμικής διαστολής και T η θερμοκρασία με αποτέλεσμα ο όρος πηγής να υπολογίζεται από τη σχέση $f_b = (\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0 \beta (T - T_0)g$ (9).

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται ο εμπορικός κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (FLUENT) [10,11] για να πραγματοποιηθεί μια 2Δ, μη-μόνιμη προσομοίωση της κατανομής της μεταβαλλόμενης ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια μιας ημέρας σε ένα αεριζόμενο αψιδωτό θερμοκήπιο. Οι μη-γραμμικές μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τα φαινόμενα μεταφοράς επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων σε ένα 2Δ πλέγμα που αποτελείται από 20.000 κελιά, ενώ για τη σύζευξη των ταχυτήτων με την πίεση χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος SIMPLEC [12]. Η μεταβολή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα ενσωματώθηκαν στο κώδικα ως οριακές συνθήκες με τη χρήση εξωτερικών ρουτίνων (user defined functions – UDFs) σε γλώσσα C. Η διακριτοποίηση των όρων συναγωγής στις εξισώσεις μεταφοράς γίνεται με το σχήμα SOU [13] ενώ για τους όρους διάχυσης χρησιμοποιείται στο σχήμα κεντρικών διαφορών. Το κριτήριο σύγκλισης τέθηκε στο 10^{-7} για τη συνέχεια, την ορμή και τις εξισώσεις μεταφοράς της τύρβης ενώ για την ενέργεια και την εξίσωση μεταφοράς της ακτινοβολίας τέθηκε 10^{-8} . Σε ότι αφορά την ακτινοβολία χωρίζουμε το φάσμα σε τρεις ζώνες, για μήκη κύματος που αντιστοιχούν στην υπεριώδη ακτινοβολία (UV) $\lambda_1=0.01 - 0.4 \mu\text{m}$, την φωτοσυνθετικά ενεργή (PAR) $\lambda_2=0.4-0.76 \mu\text{m}$, και την υπέρυθη (NIR) $\lambda_3=0.76 -100 \mu\text{m}$. Ο

χρόνος διακριτοποιείται με πεπλεγμένο σχήμα 2^{ns} τάξης και χρονικό βήμα $dt=1 \text{ sec}$ για 43200 χρονικά βήματα που αντιστοιχούν στις 12 ώρες της ηλιακής ημέρας.

4. ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

4.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ – ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Το αντικείμενο της προσομοίωσης είναι ένα αεριζόμενο αψιδωτό θερμοκήπιο με ανοιχτά παράθυρα καθ' όλο το μήκος των πλευρών του, μέσα στο οποίο υπάρχει καλλιέργεια ντομάτας ύψους 1.5 m. Πρόκειται για ένα τυπικό, χαμηλού κόστους Μεσογειακό θερμοκήπιο με τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά: Ύψος πλαϊνών πλευρών 2.4 m, ύψος στέγης 4.1 m, πλάτος 8 m και συνολικό μήκος 20 m, εμβαδού 160 m^2 και όγκου περίπου 572 m^3 . Το θερμοκήπιο φέρει πλαϊνά ανοίγματα ύψους 90 cm, που ξεκινούν από 65 cm από το έδαφος.

Το αριστερό άνοιγμα θεωρείται είσοδος αέρα με σταθερή μέση ταχύτητα και δεδομένη θερμοκρασία του. Στο δεξί άνοιγμα η πίεση θεωρείται ατμοσφαιρική και το κάλυμμα θεωρείται ως τοίχος με πεπερασμένο πάχος. Αποτελείται από δύο ημι-διαφανείς τοίχους που ανάμεσά τους έχουν ένα στερεό διαφανές υλικό. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία ανακλάται ή διαπερνά τους ημιπερατούς τοίχους και απορροφάται και επανεκπέμπεται από το στερεό εσωτερικό το οποίο αποτελείται από 4 κελιά έτσι ώστε εντός του να επιλύονται οι εξισώσεις της ενέργειας και της ακτινοβολίας. Μια μικτή οριακή συνθήκη (συνδυασμός ακτινοβολίας και συναγωγής με συντελεστή συναγωγής $h=8.3 \text{ W/m}^2\text{K}$) εφαρμόζεται στον εξωτερικό ημι-διαφανή τοίχο, ενώ το στερεό και ο εσωτερικός ημι-διαφανής τοίχος είναι συζευγμένοι. Τα πλαϊνά θεωρούνται αδιαβατικοί αδιάφανοι τοίχοι ενώ το πάτωμα αδιαφανή ισόθερμη επιφάνεια, που ακτινοβολεί εξίσου προς όλες τις κατευθύνσεις.

Η οριακή συνθήκη για την προσπίπτουσα ακτινοβολία πάνω στην οροφή του θερμοκηπίου κάθε χρονική στιγμή δίνεται μέσω εξωτερικών συναρτήσεων. Συγκεκριμένα η κάθετη ακτινοβολία στο κέντρο κάθε στοιχειώδους τμήματος του καλύμματος δίνεται μέσω της εξίσωσης $G_{b,nt}(\beta) = R_b G_{b,nt}(\beta=0)$ (10) [16] σε κάθε χρονική στιγμή. Το ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας θεωρείται σταθερό: $R_b = \cos(\theta)\cos(\theta_z)^{-1}$ (11).

Στις παραπάνω σχέσεις $G_{b,nt}$ είναι η άμεση ακτινοβολία κάθετη στην επιφάνεια, β η γωνία κλίσης της επιφάνειας και R_b ένας γεωμετρικός παράγοντας που ορίζεται από το κλάσμα της άμεσης ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια προς την άμεση ακτινοβολία προς οριζόντιο επιφάνεια ($\beta=0$). Οι γωνίες θ και θ_z είναι οι γωνίες πρόσπτωσης και ζενίθ αντίστοιχα έτσι όπως ορίζονται από τους Duffie & Beckman [16]. Η άμεση ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο υπολογίζεται από τη μέγιστη κάθετη άμεση ακτινοβολία σε κάθε χρονική στιγμή από τη σχέση, $G_{b,nt}(\beta=0) = G_{b,nt \max}(\beta=0) \sin(\pi t N^{-1})$ (12) όπου t , είναι ο χρόνος που έχει διανυθεί από την ανατολή του ήλιου και N η διάρκεια της ημέρας σε ώρες. Η μέγιστη τιμή της κάθετης σε οριζόντιο επίπεδο ακτινοβολία υπολογίζεται από την μέση ημερήσια τιμή της άμεσης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, H_b , μέσω της σχέσης $G_{b,nt \max} = H_b \pi (2N)^{-1}$ (13).

4.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα φυτά προσομοιώνονται ως πορώδη υλικά με ιξώδη αντίσταση $a^{-1}=27380 \text{ [1/m}^2\text{]}$ και αδρανειακή αντίσταση $C_2=1.534 \text{ [1/m]}$. Οι θερμικές τους ιδιότητες λαμβάνονται υπόψη μέσω της ενεργούς τιμής της αγωγιμότητας (k_{eff}) θεωρώντας ότι το ποσοστό πορώδους είναι $\gamma=0.4$. Ενώ οι οπτικές τους ιδιότητες λαμβάνονται υπόψη μόνο σε ότι αφορά την επίλυση της ακτινοβολίας στο εύρος της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας [15]. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης μέσα στην καλλιέργεια της τομάτας έχουν ληφθεί από μετρήσεις σε ένα εύρος χαμηλών ταχυτήτων [17]. Ο πίνακας 1 παρουσιάζει τις οπτικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών και ο πίνακας 2 τις θερμικές τους ιδιότητες. Οι οπτικές ιδιότητες του εσωτερικού αέρα

καθορίζονται από υψηλό περιεχόμενο σε υδρατμούς ενώ σε ότι αφορά τον εξωτερικό του υπολογιστικού τομέα αέρα θεωρείται $\varepsilon_{ext}=0.05$.

Πίνακας 1 Οπτικές ιδιότητες υλικών

Υλικό	Συντελεστής απορρόφησης, α	Συντελεστής σκέδασης, σ	Δείκτης διάθλασης, n	Συντελεστής Εκπομπής
Οροφή	0.37/0.09/0.05	0	1.72/1.79/1.7	0.7
Πλαϊνά	0.37/0.09/0.05	0	1.72/1.79/1.7	0.7
Έδαφος	0.9	-10	1.92	0.95
Καλλιέργεια	0.46	0	2.77	0.46
Αέρας	0.19	0	1	0.9

Πίνακας 2 Θερμικές ιδιότητες υλικών

Υλικό	Πυκνότητα, ρ [Kg/m ³]	Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, k [W/mK]	Ειδική Θερμότητα, C_p [J/KgK]
Οροφή	923	0.38	2300
Πλαϊνά	923	0.38	2300
Έδαφος	1300	1.00	800
Καλλιέργεια	700	0.173	2310
Αέρας	1.225	0.0242	1006.43

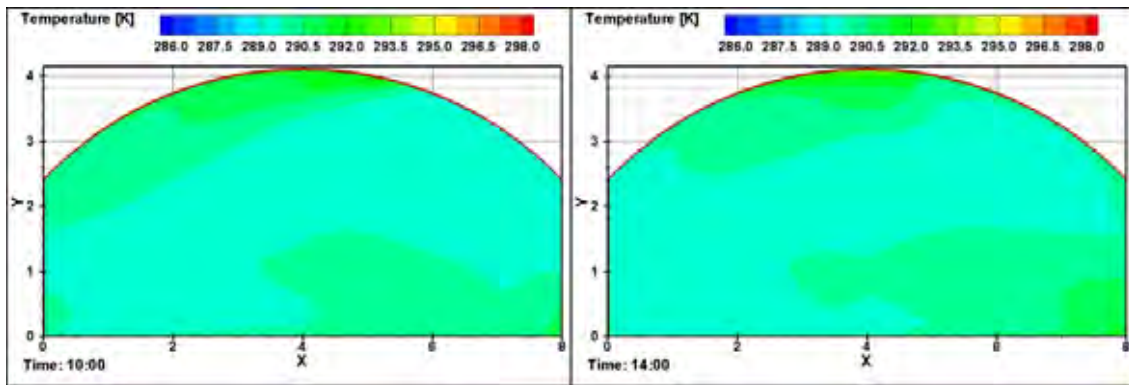
Ως υλικό κάλυψης του θερμοκηπίου έχει ληφθεί χαμηλής πυκνότητας φιλμ πολυαιθυλαίνιου (LDPE) πάχους 0.1mm. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη το πραγματικό πάχος στην προσομοίωση (στο πλέγμα το πάχος του καλύμματος λαμβάνεται 5 cm) οι θερμικές και οπτικές ιδιότητες ανάγονται στα 5cm.

4.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

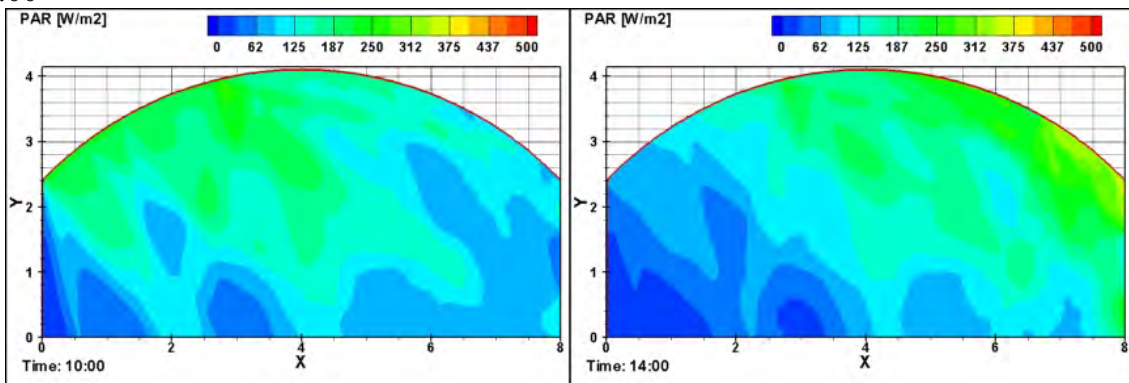
Η προσομοίωση αφορά την 21^η Σεπτεμβρίου (ισημερία) τυπικού έτους με $n=264$, σε τόπο με γεωγραφικό πλάτος 22.93° και μήκος 39.36° (κεντρική Ελλάδα). Σύμφωνα με κλιματολογικά στοιχεία η συνολική μέση μηνιαία ημερήσια ακτινοβολία δίνεται ως $\overline{H_{tot}}=5 \text{ kWh/m}^2$ Ενώ η αντίστοιχη τιμή της διάχυτης $\overline{H_d}=1.5 \text{ kWh/m}^2$. Ο εισερχόμενος αέρας θεωρείται ότι μπαίνει με ταχύτητα $u=1 \text{ m/s}$ με ομοιόμορφη καθ ύψος κατανομή και μεταβαλλόμενη θερμοκρασία. Αντίστοιχα μεταβαλλόμενη θεωρείται η εξωτερική θερμοκρασία. Συγκεκριμένα εξετάζονται δύο περιπτώσεις στην πρώτη η θερμοκρασία θεωρείται σταθερή και ίση με $T=290 \text{ K}$ ενώ στη δεύτερη μεταβαλλόμενη όπως φαίνεται στο γράφημα του Σχήματος 6.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

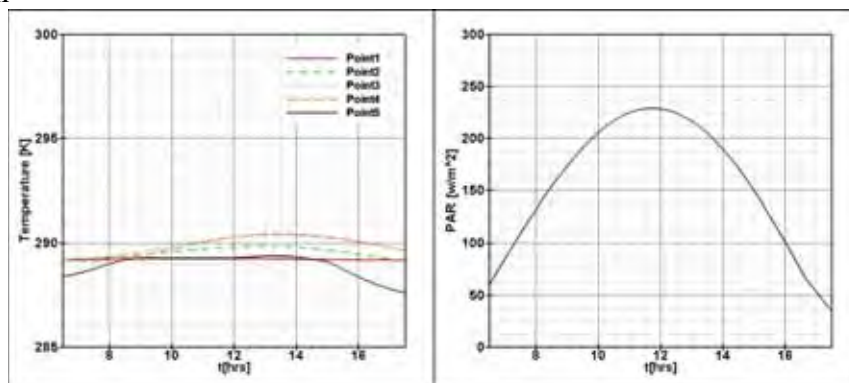
Πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη για διαφορετικές τιμές ταχύτητας του εισερχόμενου ρεύματος αέρα καθώς και για διαφορετικές θερμοκρασίες του εξωτερικού αέρα. Τα αποτελέσματα δίνονται με τη μορφή πεδίων ροής, θερμοκρασίας, και κατανομών αυτών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου καθώς και κατανομών ακτινοβολίας στο ορατό φάσμα. Στο σχήμα 1. δίνεται η κατανομή θερμοκρασίας που αντιστοιχεί στις ώρες 10 και 14 για την περίπτωση της σταθερής θερμοκρασίας ενώ στο σχήμα 2 δίνεται η κατανομή της PAR ακτινοβολίας για τις ίδιες ώρες. Στο σχήμα 3 δίνονται α) η μεταβολή της θερμοκρασίας σε 5 σημεία εντός του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της ημέρας και β) η μεταβολή της PAR ακτινοβολίας στα ίδια σημεία στο αυτό χρονικό διάστημα για την περίπτωση της σταθερής εξωτερικής θερμοκρασίας. Τα σημεία 1,2,3 και 4 αντιστοιχούν στα κέντρα των φυτών $x=1, 3, 5, 7 \text{ m}$ μετρούμενες από την αριστερά πλευρά του θερμοκηπίου και $y=0.8 \text{ m}$ μετρούμενες από το έδαφος του θερμοκηπίου, ενώ το σημείο 5 βρίσκεται μέσα στη μεγάλη ανακυκλοφορία που δεσπόζει κάτω από το κάλυμμα στο κέντρο του θερμοκηπίου ($x=4 \text{ m}$, $y=2.5 \text{ m}$).



Σχήμα 1. Κατανομή θερμοκρασίας για σταθερή εξωτερική θερμοκρασία α) στις 10:00 και β) 14:00



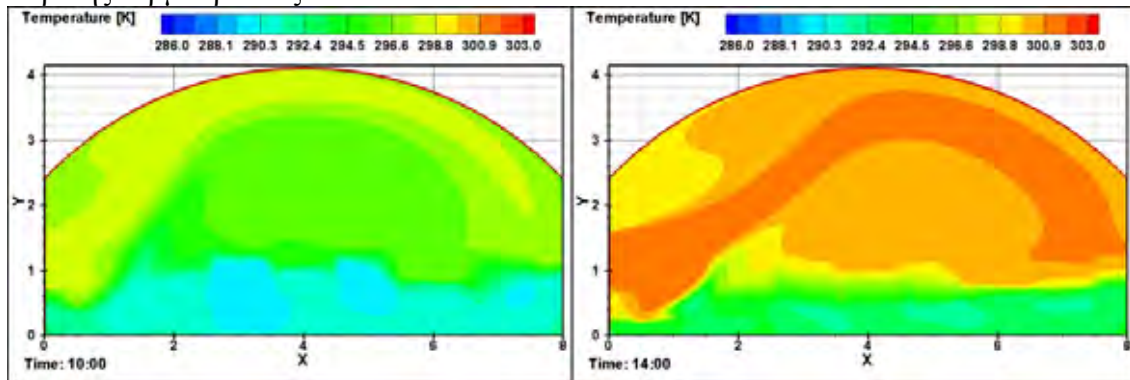
Σχήμα 2. Κατανομή PAR ακτινοβολίας για σταθερή εξωτερική θερμοκρασία α) στις 10.00 h και β) 14.00 h



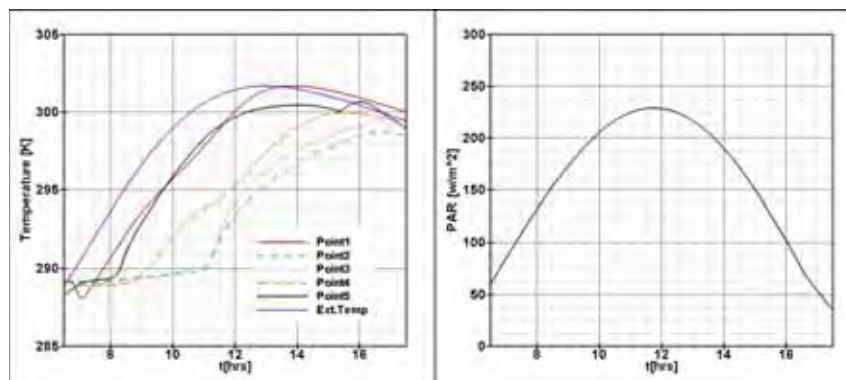
Σχήμα 3. Μεταβολή α) της θερμοκρασίας και β) της PAR ακτινοβολίας σε 5 σημεία εντός του θερμοκηπίου για σταθερή εξωτερική θερμοκρασία

Εφόσον η εξωτερική θερμοκρασία του αέρα θεωρείται σταθερή η μόνη αιτία για μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι η μεταβολή της εξωτερικής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοαποθήκευση. Δεδομένου ότι δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι οπτικές ιδιότητες των φυτών στο φάσμα της θερμικής ακτινοβολίας και ότι η μετάδοση της θερμότητας εντός του οικίσκου κυριαρχείται από τη συναγωγή του εισερχόμενου ρεύματος αέρα η τροποποίηση του εσωτερικού θερμοκρασιακού πεδίου δεν είναι έντονη, και περιορίζεται στην κεντρική περιοχή κοντά στο κάλυμμα και στην κάτω δεξιά γωνία του θερμοκηπίου όπου λόγω ανακυκλοφοριών οι ταχύτητες παραμένουν χαμηλές και η επίδρασης του εισερχόμενου ρεύματος είναι πιο αδύναμη. Το ίδιο προκύπτει και από τις καμπύλες ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας εντός του θερμοκηπίου που καλύπτουν ένα εύρος 4-5 °C. Η κατανομή της ακτινοβολίας είναι σχεδόν συμμετρική σε ότι αφορά το κεντρικό σημείο το θερμοκηπίου. Οι θέσεις των φυτών εντοπίζονται από τοπική μείωση της PAR ακτινοβολίας η οποία απορροφάται από τα φυτά.

Στο σχήμα 4 δίνεται η κατανομή θερμοκρασίας που αντιστοιχεί στις ώρες 10 και 14 για την περίπτωση της μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας ενώ η κατανομή της PAR ακτινοβολίας δε δίνεται αφού προκύπτει όμοια με της πρώτης περίπτωσης. Στο σχήμα 5 δίνονται α) η μεταβολή της θερμοκρασίας σε 5 σημεία εντός του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθώς και της εξωτερικής θερμοκρασίας και β) η μεταβολή της PAR ακτινοβολίας στα ίδια σημεία στο αυτό χρονικό διάστημα για την περίπτωση της μεταβαλλόμενης εξωτερικής θερμοκρασίας.



Σχήμα 4. Κατανομή θερμοκρασίας για μεταβαλλόμενη εξωτερική θερμοκρασία α) στις 10:00 και β) 14:00



Σχήμα 5. Μεταβολή α) της θερμοκρασίας και β) της PAR ακτινοβολίας σε 5 σημεία εντός του θερμοκηπίου και της εξωτερικής θερμοκρασίας για μεταβαλλόμενη εξωτερική θερμοκρασία

Και πάλι ο βασικός μηχανισμός μετάδοσης της θερμότητας είναι η συναγωγή που επιβάλλει το εισερχόμενο ρεύμα αέρος, μόνο που εδώ εφόσον έχει ληφθεί υπόψη η μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας είναι έντονη η χρονική διαφοροποίηση. Το σημείο 5 ακολουθεί σχεδόν ακριβώς την πορεία μεταβολής της εξωτερικής θερμοκρασίας ενισχυόμενης από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, όπως και το σημείο 1 που πρώτο δέχεται το εξωτερικό ρεύμα αέρος, ενώ τα εσωτερικά σημεία ακολουθούν με χρονική καθυστέρηση λόγω της θερμοαποθήκευσης. Η κατανομή της PAR ακτινοβολίας είναι όμοια με αυτή της πρώτης περίπτωσης, όπως αναμενόταν.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία γίνεται προσομοίωση των φαινομένων μεταφοράς που αναπτύσσονται στο εσωτερικό αεριζόμενου τοξωτού θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια μιας ηλιακής ημέρας λαμβάνοντας υπόψη τις οπτικές ιδιότητες των φυτών μόνο στο φάσμα της PAR ακτινοβολίας. Προσομοιώνεται η ημέρα της φθινοπωρινής ισημερίας για περιοχή της κεντρικής Ελλάδος και εξετάζονται δύο περιπτώσεις. Στη μια η εξωτερική θερμοκρασία θεωρείται σταθερή ενώ στη δεύτερη περίπτωση μεταβαλλόμενη κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι ο κύριος μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας είναι η συναγωγή λόγω του εισερχόμενου ρεύματος αέρα εκτός από τις περιοχές κοντά στο κάλυμμα

και στις δύο γωνίες όπου κυριαρχούν ανακυκλοφορίες που επιτρέπουν στην εισερχόμενη ακτινοβολία και στη θερμοαποθήκευση να επηρεάσουν την τοπική θερμοκρασία.

Σε ότι αφορά την προσπίπτουσα της ακτινοβολίας ιδιαίτερα εξετάζεται η PAR ακτινοβολία που ενδιαφέρει για την ανάπτυξη των φυτών. Η χρονική της μεταβολή είναι σχεδόν συμμετρική, ανεπηρέαστη από τη θερμοκρασία. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι όλες οι σειρές των φυτών δέχονται αξιόλογη ποσότητα PAR ακτινοβολίας για τουλάχιστο 8 ώρες την ημέρα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Critten, D.L., 'A review of the light transmission into greenhouse crops', *Acta Horti*. 328: 9–31, 1993.
2. Kindelan, M., 'Dynamic modelling of greenhouse environment', *Transactions of the ASAE*: 1232-1239, 1980.
3. Bot, G. P. A., 'Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model', Ph.D Dissertation, Agricultural University of Wageningen, Netherlands, pp 240, 1983
4. Arinze, E.A., Schoenau, G.J. and Besant, R.W., 'A dynamic thermal performance simulation model of an energy conserving greenhouse with thermal storage', *ASAE Paper No. 84-2702*, 1984.
5. Willits, D.H. and Peet, M.M., 'Factors affecting the performance of rockstorages as solar energy collection/ storage systems for greenhouses', *Transactions of ASAE*, 30(1): 221–232, 1987.
6. Fidaros, D., Baxevanou, C., Bartzanas, Th., Kittas, C., 'Thermal behaviour of a tunnel arc greenhouse during a solar day, International Symposium: High Technology for Greenhouse System Management (GreenSys2007), Naples, Italy, 4-6 October 2007.
7. Ferziger, J.H. and Peric, M., 'Computational Methods for Fluid Dynamics', Springer, London, 1996.
8. Chui, E.H. and Raithby, G.D., 'Computation of radiant heat transfer on a nonorthogonal mesh using the finite-volume method', *Numerical Heat Transfer. Part B, Fundamentals* 23, 269-288, 1993.
9. Kim, S.H. and Huh, K.Y., 'A new angular discretization scheme of the finite volume method for 3-D radiative heat transfer in absorbing, emitting and anisotropically scattering media', *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43, 1233-1242, 2000.
10. Fluent, FLUENT, v.5, Fluent Europe Ltd, Sheffield, UK, 1998.
11. Murthy, J.Y and Mathur, S.R., 'A Finite Volume Method for Radiative Heat Transfer Using Unstructured Meshes', *AIAA*: 98-0860, 1998.
12. Patankar, S.V., 'Numerical Heat Transfer and Fluid Flow', Hemisphere, Washington, D.C., 1980
13. Tamamidis, P. and Assanis, D.N. 'Evaluation of various high order accuracy schemes with and without flux limiters', *Int. J. Num. Meth. Fluids*. 16: 931-948, 1993.
14. Boulard, T. and Wang, S., 'Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel', *Computers and Electronics in Agriculture*, 34, 2002.
15. Pieters, J.G., Deltour, J.M., 'Performances of Greenhouses with the Presence of Condensation on Cladding Materials', *Journal of Agricultural Engineering Research* 68, 125-137, 1997.
16. Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 'Solar Engineering of thermal processes', 2nd Edition, Wiley, 1991.
17. Molina-Aiz, F.D., Valera, D.L., Alvarez, A.J. and Maduen, A., 'A wind tunnel study of airflow through horticultural crops: determination of the drag coefficient'. *Biosystems Engineering* 93, 447-457, 2006.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΣΤΙΚΑ ΦΑΡΑΓΓΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΟΥ ΚΑΙ ΝΕΟΔΗΜΤΟΥ ΟΙΚΙΣΜΟΥ ΜΕΣΩ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΘΕΡΙΝΗ ΠΕΡΙΟΔΟ

Ε.Ανδρέου¹ και Κ. Αξαρή²

Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτιρίων,
Πολυτεχνική Σχολή, Α.Π.Θ.,
54124 Θεσσαλονίκη, e-mail: ¹el_andr@otenet.gr, ²axarli@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μελέτη αφορά στην παρουσίαση αποτελεσμάτων εκτεταμένων πειραματικών μετρήσεων κατά τη θερινή περίοδο σε δρόμους δύο περιοχών, ενός παραδοσιακού οικισμού και μίας νεόδμητης περιοχής, με διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς τη γεωμετρία των δρόμων, την πυκνότητα δόμησης και τα υλικά των οριζόντιων και κατακόρυφων επιφανειών. Οι περιοχές που εξετάστηκαν είναι ο παραδοσιακός οικισμός του Τριπόταμου Τήνου και νεόδμητο τμήμα της Χώρας της Τήνου.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αναλυτική μελέτη θεμάτων όπως οι επιπτώσεις που έχουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οικισμών στις μικροκλιματικές συνθήκες των υπαίθριων χώρων, στις συνθήκες θερμικής άνεσης σε εξωτερικούς χώρους, αλλά και στο θερμικό ισοζύγιο των κτιρίων, απασχολεί τους ερευνητές τα τελευταία χρόνια και ταυτόχρονα υπολείπεται σε μέγεθος και βάθος της έρευνας για την ενεργειακή συμπεριφορά των μεμονωμένων κτιρίων. Παράλληλα, σε περιοχές με θερμά κλίματα, έχει ενταθεί το ενδιαφέρον των μελετητών σχετικά με την ενεργειακή συμπεριφορά κτιρίων και οικισμών της παραδοσιακής αρχιτεκτονικής.

2. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ

Οι δύο περιοχές, όπως φαίνεται και στην εικ. 1, παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές ως προς την πυκνότητα δόμησης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Επιπλέον, διαφορές παρουσιάζονται ως προς τη σχέση ύψος κτιρίων / πλάτος δρόμου. Ο οικισμός του Τριποτάμου απέχει από τη Χώρα Τήνου περίπου 4 χλμ και βρίσκεται σε υψόμετρο 200μ. Ο οικισμός είναι μικρός σε έκταση και η δομή του είναι έντονα συνεκτική. Τα κτίρια



Εικ. 1. Οι δύο περιοχές μελέτης

οριοθετούνται από δρόμους που διατρέχουν τον οικισμό παράλληλα και κάθετα στις ισοϋψείς με σχετικά ακανόνιστους σχηματισμούς. Το πλάτος των δρόμων είναι μικρό και μεταβαλλόμενο και οι περισσότεροι από αυτούς φέρουν βαθμίδες. Οι αναλογίες ύψους κτιρίων / πλάτος δρόμου κυμαίνονται μεταξύ 1.5 και 4.0. Χαρακτηριστικό της μορφολογίας του οικισμού αποτελεί το γεγονός ότι τμήματα πολλών δρόμων είναι στεγασμένα από τμήματα και δώματα κτιρίων. Η επικάλυψη των δημόσιων χώρων από ιδιωτικές αυλές και χώρους κατοικίας, αλλά και το μικρό

πλάτος των δρόμων, βοηθά στον αλληλοσκιασμό των κτιρίων και εξασφαλίζει δημόσιους χώρους δροσερούς και σκιασμένους. Η πλειοψηφία των κτιρίων του οικισμού έχει ευνοϊκό νοτιοανατολικό προσανατολισμό και λόγω της κλίσης του εδάφους εξασφαλίζεται επαρκής

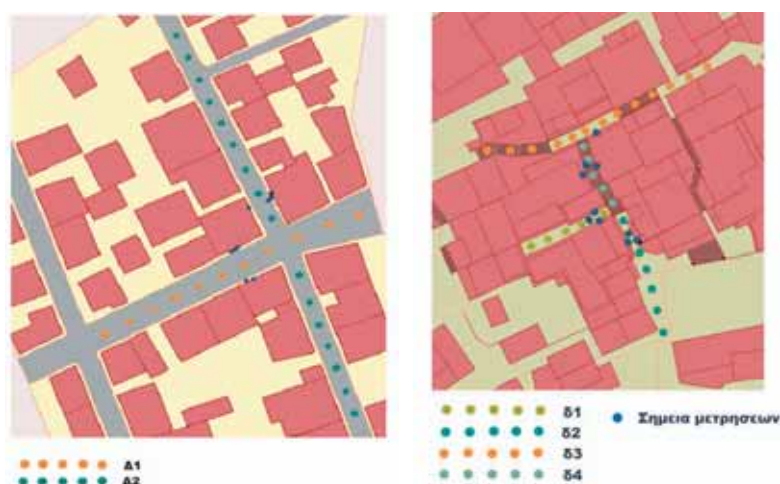
ηλιασμός των κτιρίων και προστασία από τους ψυχρούς και ισχυρούς βόρειους ανέμους. Οι τοίχοι είναι κατασκευασμένοι από πέτρα, υλικό με μεγάλη θερμοχωρητική ικανότητα, και έχουν πάχος περίπου 60 εκ. Τα επιχρίσματα, γίνονται από ασβέστη και άμμο. Οι δρόμοι και οι αναβαθμοί στο εσωτερικό του οικισμού είναι επιστρωμένοι με πέτρα.

Η δεύτερη περιοχή μελέτης αποτελεί τμήμα της Χώρας Τήνου και είναι καθαρά νεόδμητη περιοχή. Αποτελεί περιοχή γενικής κατοικίας με κτίρια που έχουν κτισθεί από τη δεκαετία του '60 μέχρι σήμερα. Τα κτίρια έχουν ύψος από 1 έως 3 ορόφους και το πλάτος των δρόμων κυμαίνεται μεταξύ 7-10μ. Τα κτίρια της υπό εξέταση περιοχής της Χώρας είναι κατασκευασμένα με τα συνήθη υλικά και τρόπους κατασκευής που κυριαρχούν στην ελληνική κατασκευαστική πρακτική των τελευταίων δεκαετιών. Οι δρόμοι είναι ασφαλτοστρωμένοι και τα πεζοδρόμια είναι επιστρωμένα με τσιμέντο.

Το κλίμα γενικά χαρακτηρίζεται μεσογειακό και εύκρατο. Ο χειμώνας είναι ήπιος και η μέση ελάχιστη θερμοκρασία τον Ιανουάριο είναι 8°C. Η μέση θερμοκρασία τον μήνα Ιούλιο είναι 25°C και η μέση μέγιστη θερμοκρασία είναι 29°C, ενώ η θαλάσσια αύρα δρα ευεργετικά κατά τη θερινή περίοδο. Βασικά χαρακτηριστικά του κλίματος αποτελούν η έντονη ηλιοφάνεια και οι σφοδρότατοι βόρειοι – βορειοανατολικοί άνεμοι καθ'όλη τη διάρκεια του έτους, η μέση ταχύτητα των οποίων το καλοκαίρι ξεπερνά τα 9 m/ sec .

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τη θερινή περίοδο από 21 Ιουλίου έως 9 Αυγούστου. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με ειδικά καταγραφικά όργανα και περιλάμβαναν μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα, θερμοκρασίας επιφανειών, υγρασίας και ταχύτητας ανέμου. Όλες οι μετρήσεις έγιναν ταυτόχρονα στις δύο περιοχές με σκοπό την εξαγωγή συγκρίσιμων αποτελεσμάτων. Ένας από τους λόγους που επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες δύο περιοχές είναι ότι οι κύριοι άξονες των δρόμων έχουν ίδιο προσανατολισμό, δηλαδή ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ- ΝΑ, με την ίδια απόκλιση από τον άξονα Β-Ν, γεγονός που συμβάλλει στο να παραχθούν περισσότερο συγκρίσιμα αποτελέσματα.



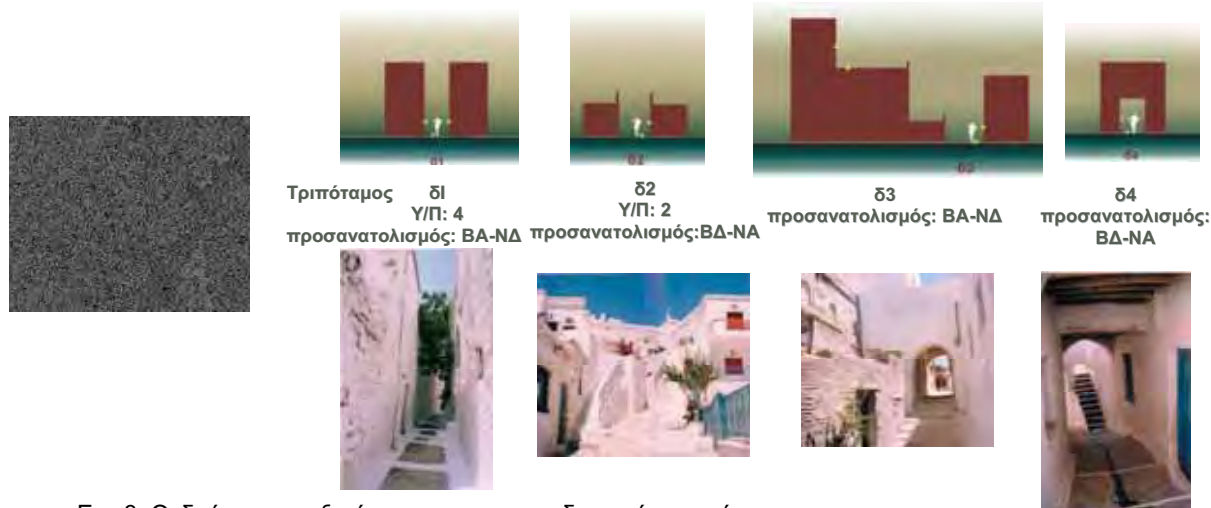
Εικ. 2. Οι δρόμοι που εξετάστηκαν στη νεόδμητη περιοχή (αριστερά) και στον παραδοσιακό οικισμό (δεξιά)

Στον παραδοσιακό οικισμό οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα σημεία που απεικονίζονται στις εικ. 2 και 3. Περιλαμβάνονται τρεις δρόμοι, δύο παράλληλοι μεταξύ τους (δ1, δ3) και ένας κάθετος (δ2). Τμήμα του δρόμου δ2 είναι στεγασμένο από τμήμα κτιρίου και λόγω των ιδιαίτερων θερμικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζει εξετάστηκε ως ξεχωριστή περιοχή μελέτης (δ4). Ο δρόμος δ1 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αναλογία Υ/Π 4, ακολουθεί ο δρόμος δ2 με αναλογία Υ/Π 2 και ο δρόμος δ3.

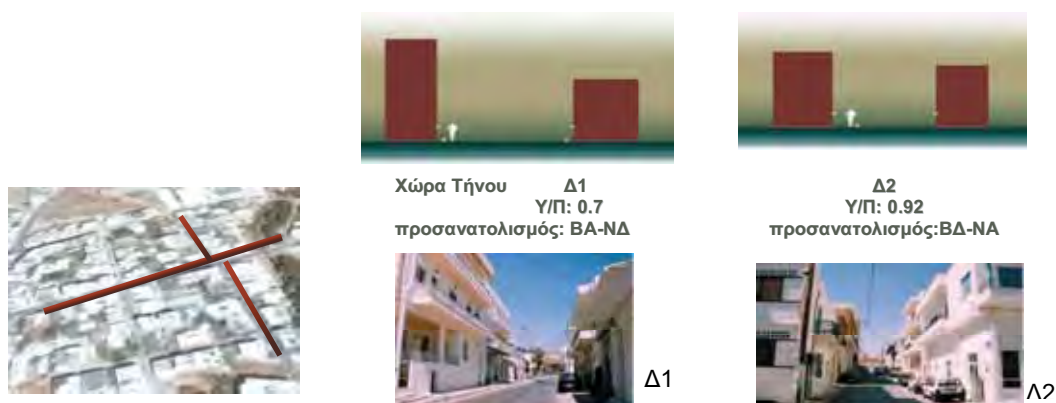
Στη Χώρα Τήνου οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα σημεία που απεικονίζονται στις εικ. 2 και 4. Περιλαμβάνονται δύο δρόμοι κάθετοι μεταξύ τους, Δ1 και Δ2. Ο Δ1 είναι δρόμος πλάτους 10.5 μ. κατά τον άξονα ΝΔ- ΒΑ ο οποίος αποτελεί μία από τις βασικές οδικές αρτηρίες. Ο Δ2 είναι κάθετος άξονας πλάτους 7.5 μ και μικρότερου κυκλοφοριακού

φόρτου. Ο προσανατολισμός του παρουσιάζει απόκλιση από τον άξονα βορρά- νότου κατά 25° . Οι αναλογίες Υ/Π στους δύο δρόμους που εξετάστηκαν στη χώρα Τήνου είναι σαφώς μικρότερες (0.7 και 0.92) από τις αντίστοιχες στον παραδοσιακό οικισμό. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε κάθε δρόμο στην επιστροφή του δαπέδου του δρόμου καθώς και στις απέναντι κατακόρυφες επιφάνειες που τον ορίζουν σε ύψος 1.5 μ.

Ακόμα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις θερμοκρασίας- υγρασίας σε σημεία εκτός των δύο οικισμών και σε ύψος πάνω από το ύψος των κτιρίων ώστε να καταγραφούν οι τιμές περιβάλλοντος, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν ως τιμές αναφοράς. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση του προσανατολισμού και της γεωμετρίας των δρόμων στην θερμοκρασία αέρα και επιφανειών.



Εικ. 3. Οι δρόμοι που εξετάστηκαν στον παραδοσιακό οικισμό



Εικ.4 Οι δρόμοι που εξετάστηκαν στη Χώρα Τήνου

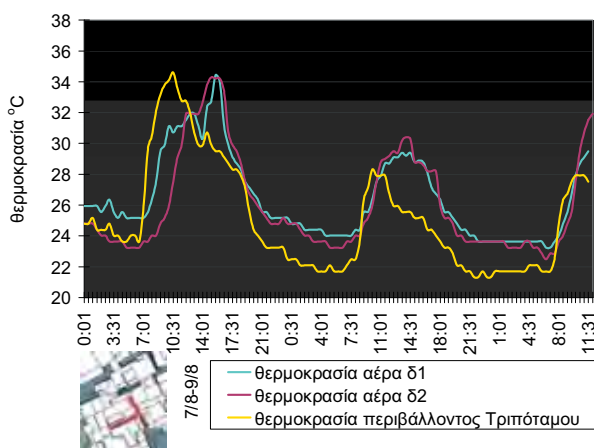
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

4.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ ΔΡΟΜΩΝ

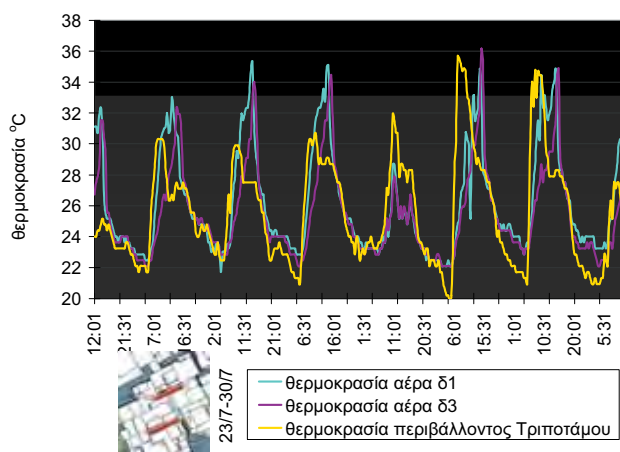
4.1.1 ΔΡΟΜΟΙ ΚΑΘΕΤΟΙ ΚΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΟΙ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ

Εξετάζοντας τις θερμοκρασίες αέρα στους δύο κάθετους μεταξύ τους δρόμους δ1 και δ2 του παραδοσιακού οικισμού, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές (Σχ.5) εκτός από ελαφρώς υψηλότερες θερμοκρασίες που παρουσίασε ο δ1 κατά τη διάρκεια μίας ημέρας κατά τις πρωινές ώρες, γεγονός το οποίο οφείλεται πιθανώς στις χαμηλότερες ταχύτητες αέρα που παρουσιάζονται στο δρόμο δ1, σύμφωνα και με τις μετρήσεις ταχύτητας αέρα. Στους παράλληλους δρόμους δ1 και δ3, παρατηρήθηκαν τα εξής: Ο δ3 παρουσιάζει χαμηλότερες θερμοκρασίες από τον δ1 για κάποιες ώρες της ημέρας ενώ τις υπόλοιπες ώρες οι θερμοκρασίες ταυτίζονται ή είναι χαμηλότερες κατά $0.5- 1.0^\circ \text{C}$ (Σχ.6). Σύμφωνα με τις μετρήσεις ταχύτητας αέρα, παρουσιάζονται υψηλότερες ταχύτητες στον δ3 από,τι στον δ1. Οι παρατηρήσεις αυτές οδηγούν στο συμπέρασμα ότι, παρά το γεγονός ότι ο σκιασμός στο

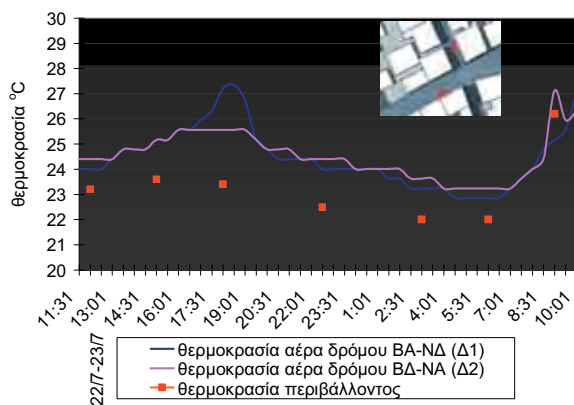
δρόμο δ1 είναι μεγαλύτερος λόγω μεγαλύτερης αναλογίας Υ/Π, η κίνηση του ανέμου στον δ3 επιδρά ευεργετικά στην απομάκρυνση της θερμότητας με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται χαμηλότερες θερμοκρασίες. Σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, οι δρόμοι παρουσιάζουν χαμηλότερες θερμοκρασίες τις πρωινές ώρες (φαινόμενο όασης). Ακόμα, τις περισσότερες ημέρες παρατηρήθηκαν υψηλότερες θερμοκρασίες στο εσωτερικό των δρόμων κατά τη διάρκεια της νύχτας από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά 0.5-2°C (φαινόμενο θερμικής νησίδας).



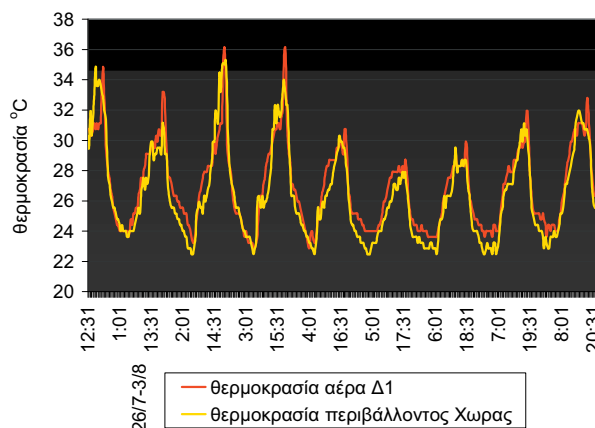
Σχ. 5



Σχ. 6



Σχ. 7

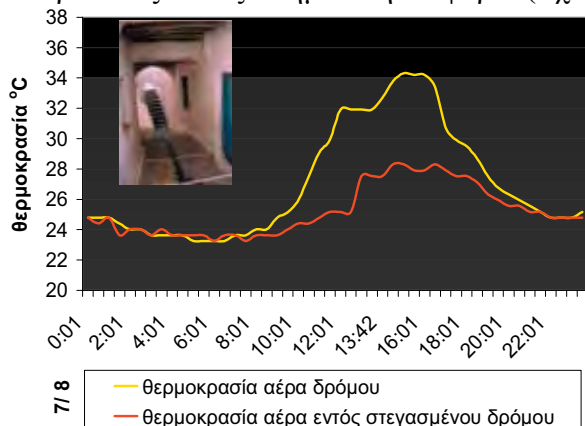


Σχ. 8

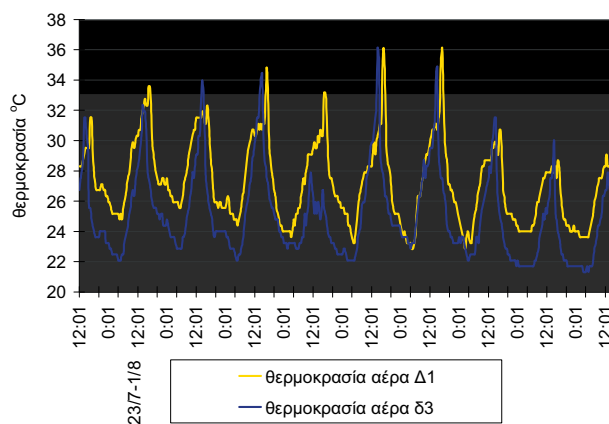
Οι θερμοκρασίες αέρα στους κάθετους δρόμους Δ1 και Δ2 στη Χώρα, γενικά ταυτίζονται κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, ο προσανατολισμός του δρόμου δεν επηρεάζει τη θερμοκρασία αέρα (Σχ. 7). Σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, οι δύο δρόμοι παρουσιάζουν γενικά υψηλότερες θερμοκρασίες κατά 1-2°C. Σύμφωνα με μετρήσεις αρκετών ημερών στο δρόμο Δ1, παρατηρήθηκαν υψηλότερες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της νύχτας από τις αντίστοιχες της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά 0.5-1.5°C (Σχ.8). Κατά τη διάρκεια της ημέρας οι θερμοκρασίες στο δρόμο Δ1 είναι είτε ελαφρώς υψηλότερες είτε ταυτίζονται με τις θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα ότι στο νεόδμητο οικισμό παρουσιάζεται το φαινόμενο της θερμικής νησίδας, το οποίο είναι εντονότερο κατά τις νυχτερινές ώρες.

4.1.2 ΣΤΕΓΑΣΜΕΝΟΣ ΔΡΟΜΟΣ

Συγκρίνοντας τη θερμοκρασία αέρα εντός του στεγασμένου δρόμου δ4 με αυτή εκτός του στεγασμένου δρόμου (δ2), παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία αέρα εντός του στεγασμένου τμήματος του δρόμου είναι σαφώς χαμηλότερη κατά τη διάρκεια των ωρών ηλιοφάνειας, με τη μέγιστη διαφορά να φτάνει τους 7°C. Κατά τη διάρκεια της νύχτας οι θερμοκρασίες δεν παρουσιάζουν αξιοσημείωτη διαφορά. (Σχ.9)



Σχ. 9



Σχ. 10.

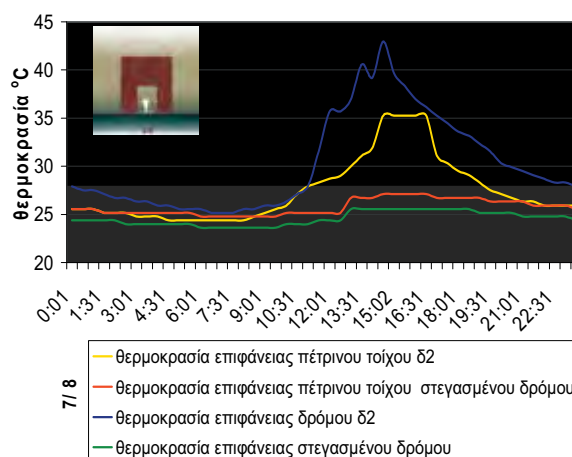
4.1.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΕΡΑ ΔΡΟΜΩΝ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΙΣ ΔΥΟ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της σύγκρισης των δρόμων Δ1 στη Χώρα και δ3 στον παραδοσιακό οικισμό, οι οποίοι έχουν τον ίδιο προσανατολισμό (BA-ΝΔ), σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας οι θερμοκρασίες στον δ3 είναι χαμηλότερες από αυτές στον Δ1 κατά 1-3°C (Σχ. 10). Κατά τη διάρκεια της ημέρας οι μέγιστες θερμοκρασίες στους δύο δρόμους είναι γενικά στα ίδια επίπεδα. Κατά τη διάρκεια της νύχτας η θερμοκρασία στο δ3 είναι χαμηλότερη κατά περίπου 3- 4°C. Οι διαφορές που παρατηρούνται ανάμεσα στους δύο δρόμους οφείλονται καταρχήν στη διαφορά θερμοκρασίας περιβάλλοντος λόγω διαφοράς υψομέτρου. Επιπλέον, τα μεγαλύτερα ποσοστά ηλιασμού που δέχεται ο δρόμος Δ1 λόγω μικρότερης αναλογίας $\kappa/\pi = 0.7$ σε σχέση με τον δ3, επηρεάζουν τη θερμοκρασία αέρα. Η διαφορά θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια της νύχτας, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στην περιοχή της Χώρας η θερμότητα που αποθηκεύεται λόγω αυξημένου ηλιασμού είναι μεγαλύτερη.

4.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

4.2.1 ΣΤΕΓΑΣΜΕΝΟΣ ΔΡΟΜΟΣ

Στο σχ.11 παρουσιάζονται οι μετρήσεις επιφανειακής θερμοκρασίας του κατακόρυφου τοίχου και της οριζόντιας επιφάνειας εντός του στεγασμένου δρόμου (δ4) οι οποίες συγκρίνονται με τις αντίστοιχες μετρήσεις στο δρόμο (δ2) ο οποίος δεν στεγάζεται και αποτελεί συνέχεια του στεγασμένου δρόμου δ4. Η θερμοκρασία επιφάνειας του κατακόρυφου τοίχου εντός του στεγασμένου δρόμου παρουσιάζει πολύ μικρές διακυμάνσεις σε σύγκριση με αυτή εκτός του στεγασμένου τμήματος του δρόμου. Κατά τη διάρκεια της ημέρας η θερμοκρασία του

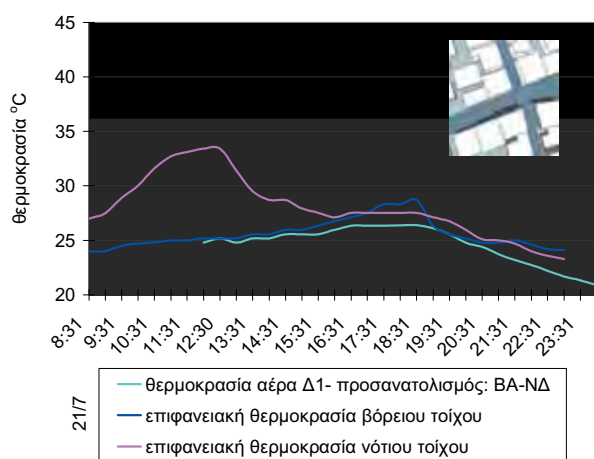


τοίχου του στεγασμένου δρόμου δεν ξεπερνά τους 27°C ενώ η μέγιστη θερμοκρασία του τοίχου στο δρόμο δ2 είναι 35.5°C. Κατά τη διάρκεια της νύχτας οι δύο θερμοκρασίες δεν παρουσιάζουν σημαντική διαφορά. Οι μετρήσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας της επίστρωσης του δρόμου δ4 παρουσιάζουν σταθερότητα κατά τη διάρκεια του 24ώρου με πολύ μικρές διακυμάνσεις και η μέγιστη θερμοκρασία δεν ξεπερνά τους 25.5°C. Αντίθετα, στον δρόμο δ2 η θερμοκρασία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις και κατά τη διάρκεια της ημέρας η επιφάνεια έχει πολύ μεγαλύτερη θερμοκρασία από την αντίστοιχη του στεγασμένου δρόμου και αγγίζει τους 43°C. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η επιφάνεια του δ2 παρουσιάζει και πάλι υψηλότερη θερμοκρασία αλλά με μικρότερη διαφορά σε σύγκριση με την ημέρα.

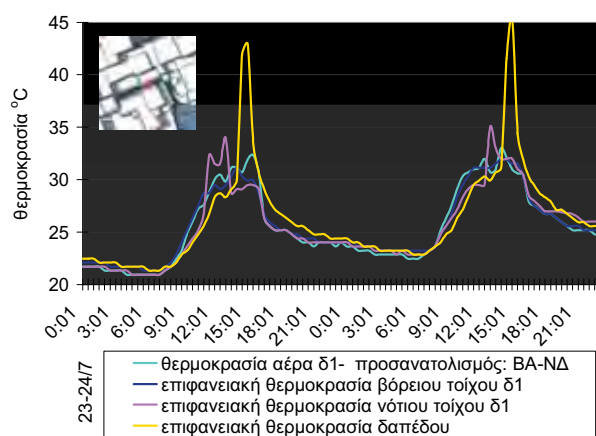
4.2.2 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Στο διάγραμμα του Σχ. 12 απεικονίζονται οι μετρήσεις επιφανειακής θερμοκρασίας των εκατέρωθεν όψεων του δρόμου Δ1 στη νεόδμητη περιοχή. Ο δρόμος έχει προσανατολισμό ΒΑ-ΝΔ με απόκλιση 30° από τον άξονα Α-Δ και αναλογία Υ/Π=0.7. Η εξωτερική επιφάνεια και των δύο όψεων καλύπτεται με σοβά και είναι χρώματος λευκού. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, η θερμοκρασία των επιφανειών επηρεάζεται σαφώς από τον προσανατολισμό και τις συνθήκες ηλιασμού/ σκιασμού καθώς παρουσιάζει σημαντική άνοδο κατά τις ώρες που η επιφάνεια δέχεται την άμεση ηλιακή ακτινοβολία και σημαντική πτώση κατά τις ώρες που είναι σκιασμένη. Η νότια όψη παρουσιάζει υψηλότερες θερμοκρασίες σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας με τη μέγιστη να φτάνει τους 34°C στις 12.30 μμ. Η βόρεια όψη έχει περισσότερο σταθερή θερμοκρασία η οποία αυξάνεται μόνο κατά τις ώρες του άμεσου ηλιασμού και η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται είναι 28°C. Η μέγιστη διαφορά ανάμεσα στις απέναντι όψεις είναι 8°C.

Στο Σχ. 13 απεικονίζονται οι μετρήσεις θερμοκρασίας επιφανειών των εκατέρωθεν πλευρών του δρόμου δ1, ο οποίος έχει τον ίδιο προσανατολισμό με τον Δ1 (ΒΑ-ΝΔ) , η



Σχ. 12



Σχ. 13

θερμοκρασία της οριζόντιας επιφάνειας του δρόμου και η θερμοκρασία αέρα. Παρατηρούμε ότι οι θερμοκρασίες των απέναντι όψεων του δρόμου δεν διαφοροποιούνται σημαντικά με εξαίρεση τις ώρες που ο νότιος τοίχος δέχεται ηλιακή ακτινοβολία. Παρά τον διαφορετικό προσανατολισμό λοιπόν, η μεγάλη αναλογία Υ/Π= 4, η οποία συνεπάγεται μεγάλα ποσοστά σκιασμού των επιφανειών, έχει ως αποτέλεσμα να μη διαφοροποιούνται σημαντικά οι θερμοκρασίες των επιφανειών. Η μέγιστη διαφορά ανάμεσα στις απέναντι όψεις είναι 4°C. Κατά τη διάρκεια της νύχτας οι θερμοκρασίες ταυτίζονται. Σημειώνεται επίσης, ότι οι θερμοκρασίες των επιφανειών είναι πολύ κοντά στις θερμοκρασίες του αέρα.

5. ΣΥΝΟΨΗ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η έννοια του δρόμου έχει υιοθετηθεί ως η βασική δομική μονάδα ανάλυσης στην έρευνα του αστικού μικροκλίματος. Στα πλαίσια της μελέτης του μικροκλίματος παραδοσιακού και νεόδμητου οικισμού πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες πειραματικές μετρήσεις κατά τη θερινή περίοδο σε δρόμους δύο περιοχών με διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς τη γεωμετρία και την πυκνότητα δόμησης.

Όσον αφορά στη θερμοκρασία αέρα, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στη θερμοκρασία αέρα δρόμων με διαφορετικό προσανατολισμό της ίδιας περιοχής μελέτης, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο προσανατολισμός δεν επηρεάζει τη θερμοκρασία αέρα. Το συμπέρασμα αυτό συμφωνεί με τη σχετική βιβλιογραφία σύμφωνα με την οποία στην μικροκλίμακα, η διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα δεν μπορεί να συσχετισθεί άμεσα με τη γεωμετρία του αστικού φαραγγιού και η μέση θερμοκρασία αέρα των δρόμων επηρεάζεται κυρίως από διαδικασίες κίνησης των αέριων μαζών. [1],[2],[3],[4]. Σε δρόμους ίδιου προσανατολισμού παρατηρήθηκαν κάποιες διαφορές, οι οποίες πιθανότατα οφείλονται στη διαφορά ταχύτητας του αέρα η οποία επηρεάζει την απομάκρυνση της θερμότητας. Σημειώνεται ότι στη βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί περιπτώσεις δρόμων όπου παρατηρήθηκε διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα σε δρόμους με διαφορετικές αναλογίες Υ/Π. Στις περιπτώσεις αυτές, οι οποίες μάλιστα αφορούσαν στη μελέτη παραδοσιακών οικισμών, είτε οι διαφορές ήταν μικρές [5] είτε επρόκειτο για δρόμους με εξαιρετικά μεγάλη αναλογία Υ/Π, της τάξης του 7-10 [6],[7]. Η θερμοκρασία αέρα εντός του στεγασμένου τμήματος του δρόμου διαπιστώθηκε πως είναι σημαντικά χαμηλότερη από τη θερμοκρασία εκτός του στεγασμένου δρόμου κατά τη διάρκεια της ημέρας, με τη μέγιστη διαφορά να φτάνει τους 7°C. Είναι σαφές λοιπόν ότι οι στεγασμένες διαδρομές εξασφαλίζουν πολύ καλές συνθήκες θερμικής άνεσης κατά τη θερινή περίοδο.

Στον παραδοσιακό οικισμό παρατηρούνται χαμηλότερες θερμοκρασίες στο δρόμο σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τις πρωινές ώρες (φαινόμενο όασης). Το φαινόμενο διακόπτεται από την ηλιακή ακτινοβολία που ανεβάζει τις θερμοκρασίες των επιφανειών οι οποίες επηρεάζουν τη θερμοκρασία του αέρα. Κατά τη διάρκεια της νύχτας παρατηρείται το φαινόμενο της θερμικής νησίδας καθώς οι θερμοκρασίες στο δρόμο είναι κατά 2-2.5°C υψηλότερες από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στο νεόδμητο οικισμό κατά τη διάρκεια της ημέρας οι θερμοκρασίες στο δρόμο Δ1 είναι είτε ελαφρώς υψηλότερες είτε ταυτίζονται με τις θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα ότι στο νεόδμητο οικισμό παρουσιάζεται το φαινόμενο της θερμικής νησίδας σε όλη τη διάρκεια του 24ώρου, το οποίο είναι αρκετά εντονότερο κατά τις νυχτερινές ώρες στις οποίες η θερμοκρασία στο δρόμο είναι κατά 0.5-1.5°C υψηλότερη. Επίσης, προκύπτει ότι κατά τη διάρκεια της νύχτας το φαινόμενο είναι εντονότερο στον παραδοσιακό οικισμό από τον νεόδμητο. Το φαινόμενο μπορεί να αποδοθεί στην αποθήκευση θερμότητας στις επιφάνειες, και ιδιαίτερα στην περίπτωση του παραδοσιακού οικισμού οφείλεται στη μειωμένη αποβολή θερμότητας με ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της νύχτας λόγω μικρού συντελεστή θέασης του ουρανού και στη μειωμένη ταχύτητα του ανέμου. Τα συμπεράσματα αυτά συμφωνούν με αντίστοιχα αποτελέσματα που έχουν παρουσιαστεί για την περίπτωση παραδοσιακών οικισμών από άλλες μελέτες [7] [8].

Σε αντίθεση με τη θερμοκρασία αέρα, παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στη θερμοκρασία κατακόρυφων επιφανειών με διαφορετικό προσανατολισμό. Συμπεραίνεται ότι η θερμοκρασία των επιφανειών επηρεάζεται κυρίως από τις συνθήκες ηλιασμού/ σκιασμού και συνεπώς ο προσανατολισμός, η αναλογία Υ/Π καθώς και ειδικά μορφολογικά χαρακτηριστικά μπορούν να επηρεάσουν καθοριστικά τη θερμοκρασία των επιφανειών. Οι θερμοκρασίες των οριζόντιων επιφανειών παρουσιάζουν επίσης σαφώς υψηλότερες τιμές από αυτές των κατακόρυφων. Τα συμπεράσματα αυτά συμφωνούν με τα συμπεράσματα άλλων αντίστοιχων μελετών [1],[5],[9],[10],[11]. Η μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας που

καταγράφηκε ανάμεσα σε δύο απέναντι όψεις δρόμων είναι της τάξης των 8K. Στην περίπτωση δρόμων με μεγάλη αναλογία Υ/Π στον παραδοσιακό οικισμό, διαπιστώθηκε ότι οι θερμοκρασίες των απέναντι όψεων του δρόμου δεν διαφοροποιούνται σημαντικά, με εξαίρεση ελάχιστες ώρες της ημέρας. Παρά τον διαφορετικό προσανατολισμό λοιπόν, η μεγάλη αναλογία Υ/Π η οποία συνεπάγεται μεγάλα ποσοστά σκιασμού των επιφανειών, έχει ως αποτέλεσμα να μην διαφοροποιούνται σημαντικά οι θερμοκρασίες των απέναντι επιφανειών, οι οποίες είναι πολύ κοντά στις θερμοκρασίες αέρα. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με αποτελέσματα για δρόμους μεγάλης αναλογίας Υ/Π [7]. Για την περίπτωση του στεγασμένου δρόμου διαπιστώθηκε σημαντική διαφοροποίηση των θερμοκρασιών επιφάνειας οι οποίες είναι πολύ χαμηλότερες από τις αντίστοιχες εκτός του στεγασμένου δρόμου, με τη μέγιστη διαφορά για τον κατακόρυφο τοίχο να φτάνει τους 8K και για την οριζόντια επιφάνεια τους 17K. Επιπλέον, οι θερμοκρασίες εντός του στεγασμένου δρόμου παρουσιάζουν ελάχιστες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι χαμηλές θερμοκρασίες επιφανειών συμβάλλουν στην εξασφάλιση καλών συνθηκών θερμικής άνεσης για τους πεζούς αλλά και για το εσωτερικό των κτιρίων.

Συγκρίνοντας τις θερμοκρασίες αέρα των δύο περιοχών παρατηρήθηκε ότι σχεδόν καθ'όλη τη διάρκεια της ημέρας οι θερμοκρασίες στον παραδοσιακό οικισμό είναι χαμηλότερες από αυτές στη Χώρα. Οι διαφορές που παρατηρήθηκαν ανάμεσα στους δύο δρόμους οφείλονται κατ'αρχήν στη διαφορά θερμοκρασίας περιβάλλοντος λόγω διαφοράς υψομέτρου και στα μεγαλύτερα ποσοστά ηλιασμού που δέχεται η Χώρα λόγω μικρότερης αναλογίας Υ/Π. Η διαφορά θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια της νύχτας, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η θερμότητα που αποθηκεύεται στην περιοχή της Χώρας λόγω αυξημένου ηλιασμού είναι μεγαλύτερη. Τέλος, οι θερμοκρασίες των επιφανειών στον παραδοσιακό οικισμό ήταν χαμηλότερες από τις αντίστοιχες της νεόδμητης περιοχής.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Pearlmutter D, Bitan A, Berliner P. (1999). Microclimatic analysis of 'compact' urban canyons in an arid zone. *Atmospheric Environment* 33. pp 4143-4150
2. Santamouris M. (2001) The canyon effect. In *Energy and climate in the urban built environment*, James&James. pp.69-96
3. Barring L, Mattson J.O, Lindqvist S (1985). Canyon Geometry, street temperatures and urban heat island in Malmo Sweden. *Journal of Climatology*, Vol.5 pp. 433-444
4. Shashua-Bar L, Hoffman M E,(2003) Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees. *Energy and Buildings* 35 pp. 61-68
5. Bourbia F, Awbi H.B.(2004) Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate Part 1: Air and surface temperature measurements. *Renewable Energy* Febr. 249-262
6. Givoni B (1998). *Climate considerations in building and urban design*. Ed. John Wiley & sons, New York.
7. Rosenlund H, Johansson E, Grundstrom K, Kortbi M, Mraissi M (2000) Urban micro-climate in the city of Fez, Morocco. *Architecture, City, Environment. Proceedings of PLEA 2000*, Cambridge. James& James Publishers. pp.472-476
8. Coronel J. F.and Alvarez S.(2001) Experimental work and analysis of confined urban spaces. *Solar Energy* Vol. 70, No. 3, pp. 263-273
9. Eliasson, I. (1990-91) Urban Geometry, Surface temperature and Air Temperature. *Energy and Buildings*, Vol. 15-16, pp.141-145.
10. Eliasson I, (1996) Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. *Atmospheric Environment* 30 no3 pp. 379-392
11. Santamouris M. (2001) Appropriate materials for the urban environment. In *Energy and climate in the urban built environment*, James&James. pp.160-181

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΟΜΗΜΕΝΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΑΣΤΙΚΟΥ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΟΣ

Π.Α. Φωκαΐδης¹, Μ. Νεοφύτου

Εργαστήριο Περιβαλλοντικής Ρευστομηχανικής,
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου
Καλλιπόλεως 75, 1678 Λευκωσία, Κύπρος

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η θερμική άνεση και η ενεργειακή απόδοση των πόλεων καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από την κλιματολογία του αστικού περιβάλλοντος, η οποία με τη σειρά της επηρεάζεται αναδραστικά από την θερμορευστομηχανική του δομημένου περιβάλλοντος και ειδικά από τα φαινόμενα μεταφοράς στην ατμόσφαιρα. Κλασσικό παράδειγμα αυτής της αλληλεπίδρασης αποτελεί το φαινόμενο της αστικής θερμονησίδας, όπου οι ενεργειακές απορροές της αστικής δραστηριότητας επιδρούν άμεσα στο μικροκλίμα της πόλης, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας το βράδυ και τη μείωση του θερμομετρικού εύρους. Η αλληλεπίδραση αυτή συνίσταται κυρίως σε δύο βασικές παραμέτρους:

- Στην ενεργειακή απόδοση του δομημένου περιβάλλοντος και κυρίως στα φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας στο περιβάλλον μέσω ακτινοβολίας
- Στο κτιριακό ανάγλυφο και στην δυνατότητα ενίσχυσης φαινομένων εξαερισμού (ventilation) του αστικού περιβάλλοντος μέσω της επιλογής βέλτιστων γεωμετριών.

Η εργασία αυτή προσεγγίζει κυρίως το επίπεδο του εξαερισμού του αστικού περιβάλλοντος μέσα από μετρήσεις σε εργαστηριακή κλίμακα με τη χρήση της μεθόδου Ταχυμέτρησης Εικόνας Σωματιδίων (Particle Image Velocimetry – PIV) σε μοντέλο αστικού πλέγματος σε υδραυλικό κανάλι. Παράλληλα επιχειρείται μία εμπεριστατωμένη βιβλιογραφική αναφορά στην ερευνητική πρόοδο στον τομέα της μελέτης της αλληλεπίδρασης του κτιριακού περιβάλλοντος και του μικροκλίματος των πόλεων. Η ιδιαιτερότητα της συγκεκριμένης δημοσίευσης προκύπτει επίσης από το γεγονός ότι σε αυτή παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που της πρώτης εφαρμογής Ταχυμέτρησης Εικόνας Σωματιδίων (Particle Image Velocimetry – PIV) στον κυπριακό ερευνητικό χώρο.

Λέξεις Κλειδιά: Οδικό Φαράγγι, Αστική Θερμνησίδα, Ταχυμέτρηση Εικόνας Σωματιδίων (PIV)

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η μελέτη του μικροκλίματος, καθώς επίσης και της ποιότητας του αέρα σε τυπικά αστικά συστήματα, όπως για παράδειγμα σε οδικά φαράγγια, αποκτά ολοένα και περισσότερη σημασία στα πλαίσια του ορθολογικού ενεργειακού και περιβαλλοντικού σχεδιασμού των αστικών πλεγμάτων. Η σημαντικότερη παράμετρος η οποία καθορίζει τον βαθμό περιβαλλοντικής καταπόνησης καθώς επίσης και ενεργειακών απωλειών στην περίπτωση των οδικών φαραγγίων είναι η γεωμετρία των κτιρίων και η δυνατότητα αερισμού των αστικών πλεγμάτων, όπως αυτή προκύπτει από την θερμορευστομηχανική συμπεριφορά της κείμενης ατμόσφαιρας σε συνάρτηση με το αστικό ανάγλυφο. Η επιλογή των βέλτιστων γεωμετρικών σχέσεων δόμησης αποτελεί αντικείμενο ορθολογιστικού πολεοδομικού σχεδιασμού, καθώς ο καθορισμός αυτών είναι σκόπιμο να καθορίζεται μέσα από στοχευμένες ερευνητικές εργασίες στο επίπεδο του σχεδιασμού και της υλοποίησης των έργων. Από τα συμπεράσματα των μετρή-

¹ Corresponding Author: fokaides@ucy.ac.cy

Associated Web site: <http://www.eng.ucy.ac.cy/EFM/index.htm>

t. +357 22 894588 ; f. +357 22 892295

σεων και των μοντέλων τα οποία θα αναπτυχθούν στην κατεύθυνση αυτή ενδέχεται να προκύψουν και οι βέλτιστες πρακτικές σχεδιασμού πυκνοδομημένων αστικών συμπλεγμάτων. Τα τελευταία χρόνια με την εξέλιξη της πειραματικής ρεστομηχανικής και των συναφών υπολογιστικών μοντέλων απαντώνται στην βιβλιογραφία αξιόλογες εργασίες οι οποίες προσεγγίζουν τη θεματολογία της μελέτης της ατμοσφαιρικής ροής σε δεδομένες γεωμετρίες οι οποίες προσομοιάζουν το δομημένο αστικό περιβάλλον. Στη συνέχεια επιχειρείται μία σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση αξιόλογων εργασιών από τις οποίες προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα. Οι Dezsö-Weidinger et al. [1] αξιοποιούν την πειραματική μέθοδο της Ταχυμέτρησης Εικόνας Σωματιδίων (Particle Image Velocimetry - PIV) για τον προσδιορισμό του γινομένου της διακύμανσης της ταχύτητας και της συγκέντρωσης σωματιδίων σε δεδομένη γεωμετρία η οποία προσομοιάζει αστικό φαράγγι σε ανεμοσήραγγα εργαστηριακής κλίμακας. Ο όρος αυτός αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για ρευστοδυναμικά υπολογιστικά εργαλεία (CFD) προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η προσομοίωση της τυρβώδους διάχυσης η οποία χρησιμεύει ως εισερχόμενο σε μοντέλα RANS για προσομοίωση τυρβωδών ροών. Τα πειραματικά αποτελέσματα αυτής της εργασίας επιβεβαιώνουν το γεγονός ότι η μέση συγκέντρωση των σωματιδίων, τα οποία στην προκειμένη περίπτωση προσομοιώνουν την συμπεριφορά ρυπαντών στο οδικό φαράγγι, παρουσιάζεται αυξημένη ανάντη της ροής. Παράλληλα παρατηρείται η παρουσία μίας σταθερής δίνης μέσα στο οδικό φαράγγι, το οποίο στην συγκεκριμένη εργασία έχει δυσδιάστατο χαρακτήρα. Τα πορίσματα αυτής της εργασίας θεωρούνται ιδιαίτερα χρήσιμα στις περιπτώσεις μελέτης όπου ο υπερισχύον μηχανισμός προσέγγισης της τυρβώδους ροής είναι η διάχυση, δεν έχουν όμως ισχύ στις περιπτώσεις όπου υπερισχύει η οριζόντια στροβιλώδης μεταφορά.

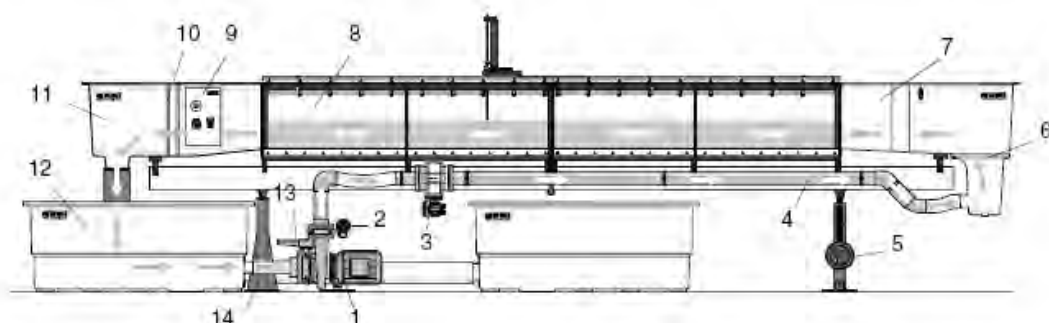
Οι Caton et al. [2] πραγματοποίησαν μετρήσεις σε υδραυλικό κανάλι για τον καθορισμό του μηχανισμού μεταφοράς στην περίπτωση δυσδιάστατης ροής με λόγο διαστάσεων ύψους κτιρίων - πλάτους δρόμου (h / d) = 1. Με βάση τα ευρήματα της εργασίας τους η παράμετρος η οποία καθορίζει τον μηχανισμό τυρβώδους μετάδοσης στην περίπτωση χαμηλού τυρβώδους ιξώδους της υπερκείμενης ροής είναι τα χαρακτηριστικά του οριακού στρώματος το οποίο αναπτύσσεται μεταξύ της υπερκείμενης ροής και της θραύσης δίνης εντός του φαραγγιού. Οι βασικοί παράμετροι οι οποίοι προκύπτουν από τα πειραματικά ευρήματα αυτής της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν στην βελτιστοποίηση αναλυτικών υπολογιστικών ρεστομηχανικών μοντέλων, επιτυγχάνοντας ικανοποιητική συμφωνία των αποτελεσμάτων των δύο προσεγγίσεων. Η βελτιστοποίηση του υπολογιστικού μοντέλου σε αυτή την περίπτωση έδωσε την ευκαιρία για μελέτη του χαρακτήρα του εισερχόμενου στο φαράγγι ρεύματος για διάφορες συνθήκες της ατμόσφαιρας, αποδεικνύοντας ότι ο βαθμός της τύρβης της υπερκείμενης ροής, αποτελεί την καθοριστική παράμετρο για την συμπεριφορά της ροής μέσα στο φαράγγι.

Μία πρόσφατη εργασία των Simoeens et al. [3] εξετάζει με την χρήση της πειραματικής μεθόδου (PIV) την συμπεριφορά της ροής μέσα σε οδικά φαράγγια για μεταβαλλόμενους λόγους διαστάσεων πλάτους δρόμου – ύψους κτιρίων (d / h) (1-10). Σε αυτή την εργασία γίνεται η διακριτοποίηση του χαρακτήρα της ροής σε τρεις κατηγορίες και συγκεκριμένα στις περιοχές της ωσεί στρωτής ροής (skimming flow), στις περιοχές ομόρου απορεύματος ανατάραξης (wake flow) και στις αδιάφορες – μονωμένες ροές (isolated flow). Για όλες τις εξεταζόμενες γεωμετρίες, παρατηρείται η παρουσία μίας επικρατούσας δίνης με αρνητικό τυρβώδες η οποία προκύπτει από τον χαρακτήρα της υπερκείμενης ροής και του οριακού στρώματος το οποίο δημιουργείται μεταξύ της αδιατάρακτης ροής και του τεχνητού κοιλώματος. Για μεγαλύτερους λόγους πλάτους δρόμου – ύψους κτιρίων ($d / h > 2$) παρατηρείται και η δημιουργία μιας δεύτερης δίνης με θετικό τυρβώδες μέσα στο οδικό φαράγγι στην περιοχή κατάντη της ροής στην προσήνεμη περιοχή του μοντέλου. Για ακόμη μεγαλύτερες τιμές του υπό εξέταση λόγου ($h / d > 6$), προκύπτει μία τριτεύουσα δίνη ανάντη του φαραγγιού στην απάνεμη πλευρά του ανάντη προσομοιωτή κτιρίου. Ο χαρακτήρας της τριτεύουσας δίνης δεν έχει την ευστάθεια των άλλων δύο δινών, καθώς το κέντρο του μετακινείται. Οι διατμητικές τάσεις Reynolds ($\overline{U'V'}$) στο οριακό στρώμα υπερκείμενης ροής και τεχνητού κοιλώματος είναι αρνητικές

για όλες τις υπό εξέταση γεωμετρίες. Η κατακόρυφη περιοχή όπου απαντώνται αρνητικές τιμές των διατμητικών τάσεων εκτείνεται για μεγαλύτερους λόγους πλάτους δρόμου – ύψους κτιρίων. Για όλες τις υπό μελέτη γεωμετρίες παρατηρείται επίσης μια μικρή περιοχή θετικών διατμητικών τάσεων στην υπερκείμενη περιοχή ανάντη του φαραγγιού.

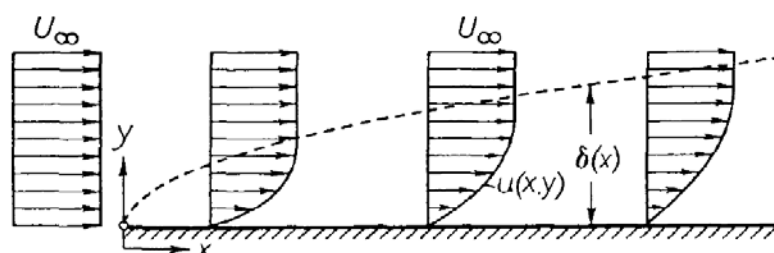
3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ - ΜΕΘΟΛΟΓΙΑΣ

Το ροϊκό πεδίο το οποίο εξετάζεται στα πλαίσια αυτής της εργασίας σε πειραματικό επίπεδο, αποτελεί μία σύνθεση δύο επιφανειών επίπεδης πλάκας ως επίσης και μίας εσωτερικής κοιλότητας με λόγο ύψους – πλάτους (h/d) 1, τοποθετημένης κάθετα στην διεύθυνση της ροής (**Σχήμα 1**), περιορίζοντας έτσι το πρόβλημα σε δισδιάστατη ροή. Η δεδομένη σχέση ύψους – πλάτους ($h/d = 1$) επιλέχθηκε λόγω του ότι αυτή κυμαίνεται στις τυπικές γεωμετρίες του κυπριακού αστικού ανάγλυφου. Το ύψος της κοιλότητας ορίστηκε στα 60 mm με βάση τα δεδομένα της ροής στο υδραυλικό κανάλι. Η λογική προκύπτει από το πάχος του οριακού στρώματος, το οποίο αναπτύσσεται μέσα στο κανάλι με την χρήση μηχανισμού δημιουργίας οριακού στρώματος (trip wire). Συγκεκριμένα ο αριθμός Reynolds του οριακού στρώματος υπολογίζεται με τη βοήθεια της ακόλουθης σχέσης (**Σχήμα 2**)



- | | | |
|--|-----------------------------|------------------------------|
| 1. Φυγόκεντρος Αντλία | 5. Διάταξη ρύθμισης κλίσης | 10. Αισθητήρας υπερχειλίσσης |
| 2. Ρυθμιστής και βαλβίδα διακοπής ροής | 6. Ανορθωτής ροής | 11. Στοιχείο εξόδου |
| 3. Μετρητής παροχής | 7. Στοιχείο εισόδου | 12. Δεξαμενή |
| 4. Γραμμή παροχής | 8. Κεντρικό Στοιχείο | 13. Διακόπτης ροής |
| | 9. Κιτίο ηλεκτρικού ελέγχου | 14. Σταθερό έδρανο |

Σχήμα 1: Υδραυλικό Κανάλι Gunt, HM 162 Modular Flow Channel



Σχήμα 2: Ανάπτυξη οριακού στρώματος σε Κανάλι Ροής [4]

$$Re_{X,krit} = \frac{Ux}{\nu} = 5 \cdot 10^5 \quad (3.1)$$

Εβρισκόμενοι σε τυρβώδη ροή, το πάχος του οριακού στρώματος ορίζεται ως [4]

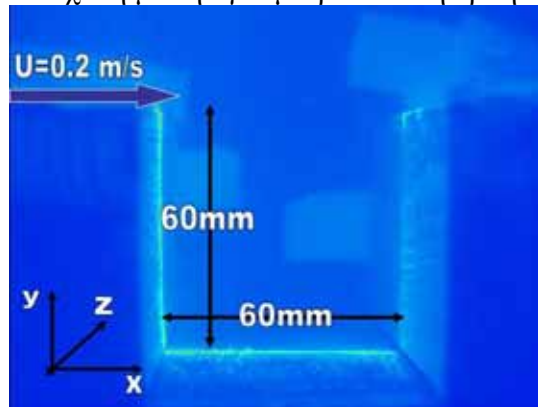
$$\delta = 0,14 \cdot \left[\frac{\nu}{U_{\infty}} \right] \cdot \left[\frac{Re_X}{\ln Re_X} \right] \cdot G[\ln Re_X] \quad (3.2)$$

Το πάχος του οριακού στρώματος ορίστηκε για τα ακόλουθα δεδομένα:

- Διαστάσεις ροής: $z = 0,3 \text{ m}$, $y = 0,35 \text{ m}$
- Ταχύτητα ελεύθερης ροής: $U_{\infty} = 0,29 \text{ m/s}$, υπολογιζόμενη με βάση τη μέση παροχή ρευστού και την διατομή του καναλιού
- Κινηματικό ιξώδες ρευστού: $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (νερό στους 20°C)
- Απόσταση σημείου μέτρησης από καλώδιο δημιουργίας οριακού στρώματος: $x = 4 \text{ m}$

Ο αριθμός Reynolds της ροής στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται με βάση το ύψος του κτιρίου και την ταχύτητα της ελεύθερης ροής, και ισούται με 17400.

Το υδραυλικό κανάλι το οποίο χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας (Gunt, HM 162 Modular Flow Channel – **Σχήμα 3**) έχει διατομή 300 mm x 450 mm, όπου για τις ανάγκες των μετρήσεων η στάθμη του νερού περιορίστηκε στα ≈ 350 mm. Αναλυτικές πληροφορίες σε σχέση με την γεωμετρία και την ροή στο υδραυλικό κανάλι δίνονται στον **Πίνακα 1**.



Σχήμα 3: Μοντέλο οδικού φαραγγιού

Η βασική πειραματική τεχνική η οποία χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι η ταχυμέτρηση εικόνας σωματιδίων (Particle Image Velocimetry – PIV). Συγκεκριμένα το σύστημα ανάλυσης της ροής που χρησιμοποιήθηκε είναι σε θέση να καθορίσει στιγμιαία το δυσδιάστατο πεδίο ταχυτήτων. Η φυσική αρχή στην οποία εδράζει τη λειτουργία του η μέθοδος (PIV) είναι αυτή της σκέδασης Mie μονοχρωματικού φωτός. Για το σκοπό αυτό η υπό εξέταση ροή εμποτίζεται με σωματίδια των οποίων η διάμετρος είναι 1 - 10 φορές μεγαλύτερη από το μήκος κύματος της ακτίνας φωτός laser με την οποία φωτίζεται η ροή. Πέραν του γεγονότος ότι τα σωματίδια αυτής της τάξης μεγέθους σκεδάζουν ανελαστικά το φως, είναι επίσης σε θέση να ακολουθούν την ροή πιστά. Η λογική της μέτρησης με (PIV) συνίσταται στο γεγονός ότι μία παλλόμενη ακτίνα φωτός (laser) διαμορφώνεται σε ένα φωτεινό φύλλο (laser light sheet) και οι σκεδάσεις των σωματιδίων που διέρχονται του φύλλου αυτού και ακολουθούν πιστά την ροή, καταγράφονται από μία προηγμένη ψηφιακή κάμερα CCD. Ο προσδιορισμός του πεδίου των ταχυτήτων επιτυγχάνεται μέσω αλληλοσυσχέτισης διαδοχικών εικόνων, οι οποίες λαμβάνονται σε προκαθορισμένους χρόνους. Οι χρόνοι λήψης εικόνων στην μέθοδο (PIV) ορίζονται από δεδομένες παραμέτρους όπως την μέση ταχύτητα της υπό εξέταση ροής, την ανάλυση επεξεργασίας των αποτελεσμάτων (interrogation area, window overlap) καθώς επίσης και την ευαισθησία της κάμερας. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος το οποίο χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας δίνονται στον **Πίνακα 2**.

Μήκος	8750 mm
Μήκος υαλοκατασκευής	7500 mm
Πλάτος Διατομής	300 mm
Ύψος Διατομής	450 mm
Όγκος Νερού σε Δεξαμενές	3,5 m³
Μέγιστη Παροχή	220 m³ / h

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά Υδραυλικού Καναλιού Gunt, HM 162

Πηγή Φωτός (Litron, Nano L 125-15 – Nd:YAG)	
Επαναληψιμότητα παλμού [Hz]	0-15 (ανά laser)
Ενέργεια ανά παλμό [mJ]	125 @ 532 nm
Διάμετρος ακτίνας [mm]	5
Χρόνος εκπομπής [ns]	< 0.5
Κάμερα (Imager Pro X 4M)	
Εύρος ευαισθησίας [nm]	290 – 1100
Μέγεθος κάρτας [pixel]	2048
Μέγεθος pixel [μm]	7.4
Χρονική ανάλυση [ns]	500

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά Συστήματος Ταχυμέτρησης Εικόνας Σωματιδίων (PIV)

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

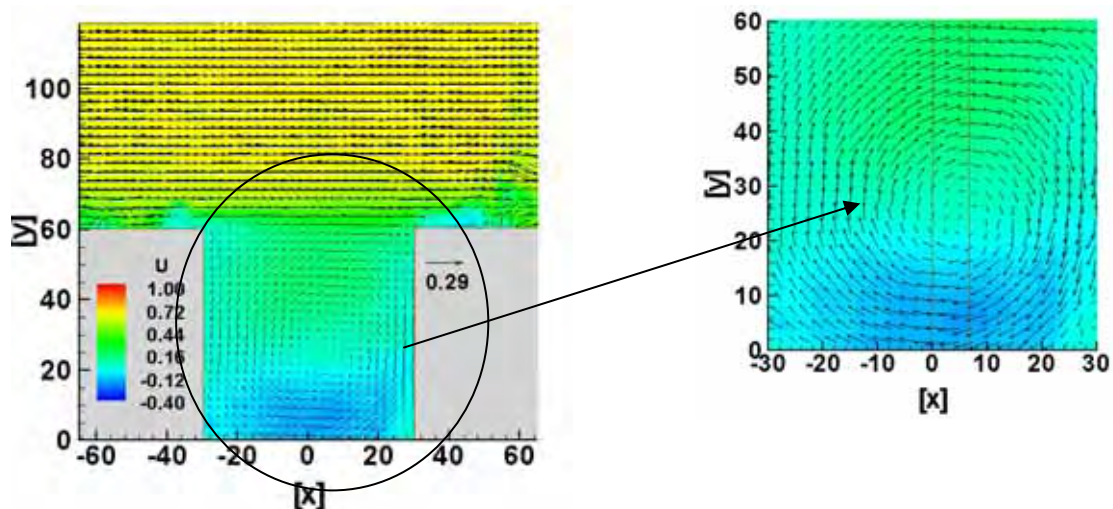
Στα **Σχήματα 4-7** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του πεδίου με την χρήση της μεθόδου PIV στην πειραματική διάταξη. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε για μέση ταχύτητα της ροής 0.29 m/s και το σύνολο των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται προκύπτουν ως η αξιολόγηση 35 διαδοχικών ζευγών μετρήσεων. Ο χρόνος μεταξύ των διαδοχικών μετρήσεων καθορίστηκε με βάση

- τα δεδομένα της ροής (μέση ταχύτητα ελεύθερης ροής)
- το πεδίο οπτικογράφησης (field of view / σε αυτή την περίπτωση 150 mm x 150 mm)
- το μέγεθος του παράθυρου ανάλυσης (interrogation window / σε αυτή την περίπτωση 64 pixels)

και ισούται για τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με 1750 μ s. Όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αδιαστατοποιημένα με τη βοήθεια της μέσης ταχύτητας ροής στο κανάλι. Για τις μεν μέσες ταχύτητες, το μέτρο διαιρείται με το μέτρο της μέσης ταχύτητας ροής, για την δε κινητική ενέργεια και τις τάσεις Reynolds με το μισό του τετραγώνου της μέσης ταχύτητας στην πρώτη περίπτωση, και με το τετράγωνο της μέσης ταχύτητας στη δεύτερη. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγινε με τη χρήση του Λογισμικού DaVis 7.2 της εταιρείας La Vision [5].

Στα **Σχήματα 4 και 5** δίνεται η μέτρηση της μέσης ταχύτητας του ροϊκού πεδίου τόσο σε μορφή δυσδιάστατων διανυσμάτων και ισοϋψείς περιγραμμάτων, όσο και σε μορφή ροϊκών γραμμών. Για τον προσδιορισμό της μέσης ταχύτητας χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \quad (4.1)$$



Σχήμα 4: Αδιαστατοποιημένη διανυσματική μέση ταχύτητα και ισοϋψής περίγραμμα οριζόντια συνιστώσα της μέσης ταχύτητας (\bar{U}) (αριστερά) και λεπτομέρεια ζώνης περιδίνησης (δεξιά)

Όπως αναμενόταν, μέσα στο οδικό φαράγγι παρατηρείται μία μεγάλη δίνη ανακύκλωσης η οποία εκτείνεται μέσα σε όλο το κοίλωμα και φτάνει μέχρι το κατώτατο σημείο του φαραγγιού. Η δίνη αυτή προκύπτει κυρίως λόγω του οριακού στρώματος το οποίο σχηματίζεται μεταξύ της οροφής των κτιρίων και της ανεμπόδιστης ροής, και το οποίο διακόπτεται στην περιοχή πάνω από την κοιλότητα, με αποτέλεσμα τη σύγκλιση της ροής προς το κατάντη κτίριο. Η ύπαρξη και η έκταση της δίνης επιβεβαιώνεται και με την μέτρηση της μέσης ταχύτητας στον άξονα κάθετα της ροής (**Σχήμα 5**). Συγκεκριμένα στο οριακό στρώμα ροής και κατάντη κτιρίου μετρήθηκαν αρνητικές ταχύτητες ενώ στο κτίριο ανάντη της ροής, οι τιμές της (\bar{V}) είναι θετικές. Αντίστοιχα, η φορά της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας στα κατώτερα στρώματα του φαραγγιού είναι αντίθετη με αυτήν της ελεύθερης ροής (**Σχήμα 4**). Αξιο-

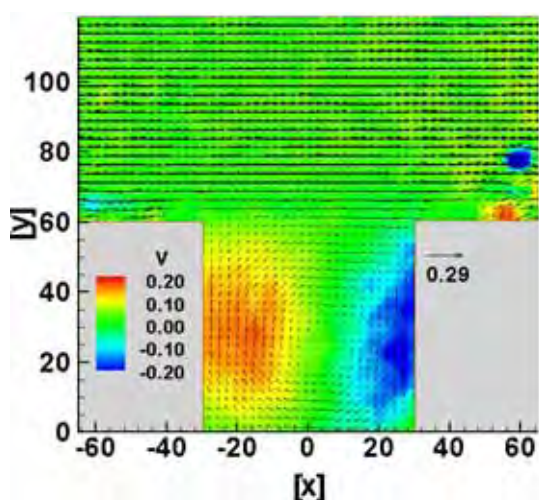
σημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι το κέντρο περιδίνησης δεν βρίσκεται στο κέντρο του τεχνητού φαράγγιού αλλά ελαφρώς μετατοπισμένο κατά 6 [mm] περίπου προς το κτίριο κατάντη της ροής (**Σχήμα 4 - λεπτομέρεια**). Το εύρημα αυτό έρχεται να επιβεβαιώσει σειρά εργασιών οι οποίες αφορούν σε ροή σε οδικά φαράγγια [1], [2], [3] και οι οποίες υποδεικνύουν αυτό τον χαρακτήρα της ροής.

Στο **Σχήμα 6** δίνονται τα ισοϋψείς περιγράμματα της τυρβώδους κινητικής ενέργειας του ροϊκού πεδίου. Η τυρβώδη κινητική ενέργεια ορίζεται ως το άθροισμα του τετραγώνων της μέσης τετραγωνικής απόκλισης των ταχυτήτων, στα επίπεδα τα οποία αυτές έχουν προσδιοριστεί, δηλαδή

$$k = \frac{1}{2} (U_{RMS}^2 + V_{RMS}^2) \quad (4.2)$$

όπου η ρίζα της μέσης τετραγωνικής απόκλισης της ταχύτητας (Root Mean Square – RMS) υπολογίζεται ως

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2} \quad (4.3)$$

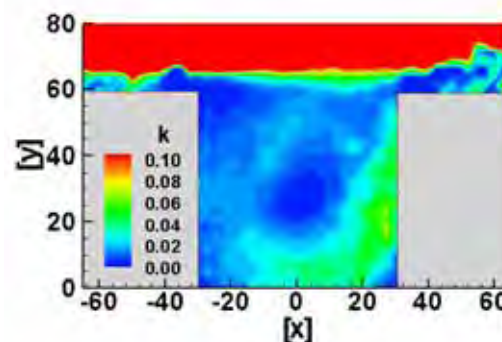
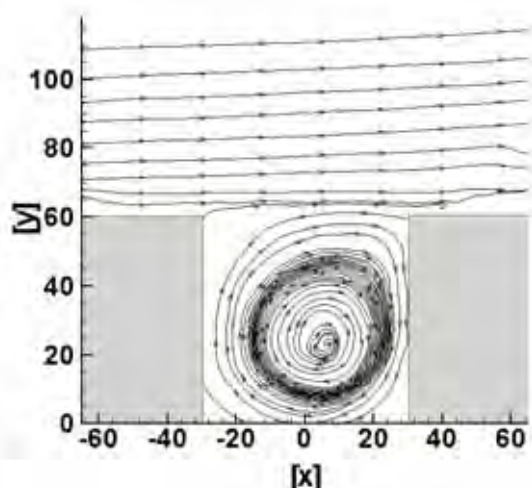


Σχήμα 5: Αδιαστατοποιημένη διανυσματική μέση ταχύτητα και περίγραμμα ισοϋψών κάθετης συνιστώσας της μέσης ταχύτητας (\bar{V})

Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρούνται δύο μεγάλες ζώνες:

- η πρώτη εκτείνεται από το οριακό στρώμα και προς την ελεύθερη ροή, και
- η δεύτερη περιορίζεται μέσα στην ορθογωνική κοιλότητα.

Συγκρίνοντας τα μέτρα της κινητικής ενέργειας στις δύο περιοχές, προκύπτει η διαπίστωση ότι το μέτρο της τυρβώδους κινητικής ενέργειας στην υπερκείμενη του αστικού θόλου (urban canopy) ροή, η οποία και είναι απαλλαγμένη από την επίδραση των κτιρίων, είναι αρκετά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο μέτρο μέσα στο οδικό φαράγγι. Το εύρημα αυτό είναι αναμενόμενο και εδράζεται στο γεγονός ότι το μέτρο της ταχύτητας στην



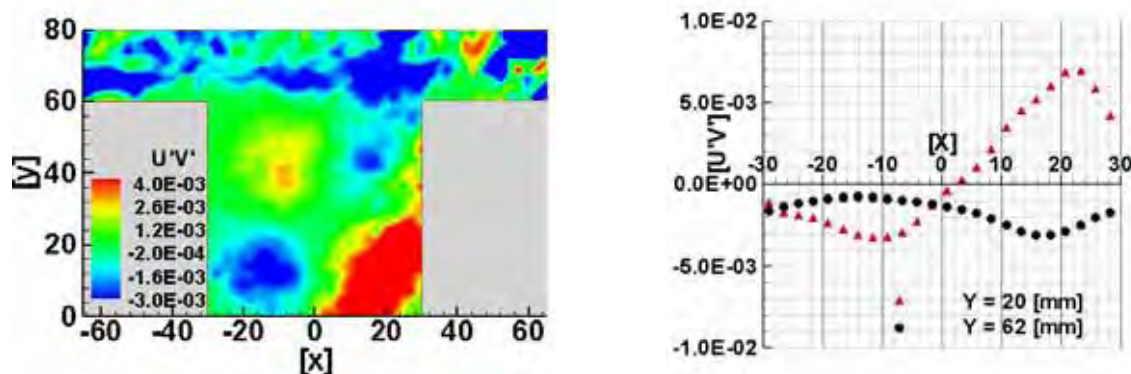
Σχήμα 6: Ροϊκές γραμμές πεδίου μέσων ταχυτήτων (αριστερά) και περίγραμμα ισοϋψών αδιαστατοποιημένης τυρβώδους κινητικής ενέργειας (k) (δεξιά)

περιοχή αυτή είναι μεγαλύτερο από τις ταχύτητες που παρατηρούνται μέσα στην ανακυκλούμενη δίνη. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η περιοχή κατάντη, στο οριακό στρώμα που δημιουργείται μεταξύ του τεχνητού κτιρίου και της περιδινιμένης ροής. Συγκεκριμένα στην περιοχή αυτή παρουσιάζεται αύξηση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, καθώς μεγάλο μέρος της ενέργειας της ροής εκτονώνεται στο οριακό στρώμα το οποίο δημιουργείται σε αυτό το σημείο λόγω της πρόσκρουσης της ροής στο κτίριο. Το εύρημα αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία λόγω του γεγονότος ότι αντίστοιχη αναμένεται να είναι και η συγκέντρωση αέριων ρύπων στην περίπτωση μελέτης ατμοσφαιρικής διασποράς ρυπαντών λόγω της δημιουργίας στην συγκεκριμένη περιοχή ενός σημείου στασιμότητας ροής (stagnation point). Ακόμη η περιοχή του κέντρου περιδίνησης παρουσιάζει μηδενικές τιμές της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνει τον χαρακτήρα της ροής μέσα στο τεχνητό κοίλωμα και συγκεκριμένα το γεγονός ότι οι ταχύτητες στο σημείο αυτό είναι μηδενικές. Λόγω του συγκεκριμένου χαρακτήρα της ροής η περιοχή αυτή, το κέντρο περιδίνησης δηλαδή, αναμένεται να είναι αδιάφορη για την συγκέντρωση ρύπων. Πολύ σημαντικό εύρημα αποτελεί επίσης το αισθητά μειωμένο μέτρο της τυρβώδους κινητικής ενέργειας στη διεπιφάνεια μεταξύ της υπερκείμενης ροής του αστικού θόλου και του αστικού φαραγγιού. Η μέτρηση υποδηλώνει το μειωμένο μέτρο τυρβώδους διάχυσης στο επίπεδο αυτό και επιβεβαιώνει το ουσιαστικό πρόβλημα της κακής εξαέρωσης του αστικού ανάγλυφου, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις των αστικών φαραγγιών.

Ένα άλλο εύρημα το οποίο ενδέχεται να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για την ερμηνεία του ροϊκού πεδίου μέσα σε οδικό φαράγγι είναι οι διατμητικές $(\overline{U'V'})$ τάσεις Reynolds, όπως αυτές υπολογίζονται από τα μετρητικά δεδομένα και οι οποίες δίνονται στο **Σχήμα 7**. Οι τάσεις αυτές εκφράζουν τα φαινόμενα τυρβώδους εναλλαγής στα διάφορα στρώματα του ροϊκού πεδίου και υπολογίζονται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\overline{U'V'} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})(V_i - \bar{V}) \quad (4.4)$$

Η εκ περιστροφής συμμετρία της περιδινιμένης αέριας μάζας μέσα στην κοιλότητα επιβεβαιώνεται με τις μηδενικές τιμές των διατμητικών τάσεων $(\overline{U'V'})$ στο κέντρο περιδίνησης. Συγκεκριμένα, λόγω της συμμετρίας την περιδινιμένης μάζας δεν αναμένεται η οποιαδήποτε μεταφορά μάζας από ή προς το κέντρο περιδίνησης, ως εκ τούτου στο σημείο αυτό οι διατμητικές τάσεις Reynolds μηδενίζονται. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η κατανομή των διατμητικών τάσεων στην περιφέρεια της περιδινιμένης αέριας μάζας. Συγκεκριμένα η διεύθυνση του $(\overline{U'V'})$ βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία με την διεύθυνση των συνιστωσών



Σχήμα 7: Περίγραμμα ισοϋψών αδιαστατοποιημένων διατμητικών τάσεων Reynolds $(\overline{U'V'})$ (αριστερά) και αδιαστατοποιημένες διατμητικές Τάσεις Reynolds $(\overline{U'V'})$ στο οριακό στρώμα κοιλότητας και υπερκείμενης ροής ($Y = 62[\text{mm}]$) και μέσα στην κοιλότητα ($Y = 20[\text{mm}]$) (δεξιά)

της ταχύτητας στις διάφορες περιοχές του πεδίου ταχυτήτων. Οι μέγιστες διατμητικές τάσεις Reynolds παρουσιάζονται όπως αναμενόταν, στην περιοχή της μέγιστης τυρβώδους κινητικής ενέργειας, όπου τα φαινόμενα μεταφοράς λόγω τυρβώδους διάχυσης μεγιστοποιούνται. Η ερμηνεία του φαινομένου αυτού και η συσχέτισή του με την ενδεχόμενη συγκέντρωση ρύπων στο σημείο αυτό έχει γίνει αναλυτικά στην προηγούμενη παράγραφο. Ιδιαίτερης σημασίας είναι επίσης η συμπεριφορά των διατμητικών τάσεων Reynolds στο οριακό στρώμα μεταξύ κοιλότητας και ελεύθερης ροής. Συγκεκριμένα η φορά των τάσεων σε αυτό το σημείο είναι προς το φαράγγι. Εντούτοις το μέτρο των διατμητικών τάσεων είναι αισθητά χαμηλότερο από αυτό που παρατηρείται μέσα στο φαράγγι, υποδηλώνοντας έτσι το ασθενές των φαινομένων μεταφοράς στο σημείο αυτό και συνεπώς τον κακό εξαερισμό της ορθογωνικής κοιλότητας.

5. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σε σχέση με την μελλοντική εργασία η οποία θα ακολουθήσει, ιδιαίτερη σημασία δίνεται στο αστικό δομημένο περιβάλλον της Κύπρου και συγκεκριμένα στις γεωμετρίες που απαντώνται στα αστικά κέντρα του νησιού. Γενικότερα στις πόλεις της Κύπρου απαντώνται οι ακόλουθες τυπολογίες:

- το συνεχές σύστημα δόμησης στην εντός των τειχών πόλη και στους πυρήνες των παλιών χωριών (Στρόβολος, Παλλουριώτισσα, Άγιοι Ομολογητές, Καϊμακλι, Έγκωμη, Άγιος Δομέτιος, Αγλαντζιά)
- το πανταχόθεν ελεύθερο σύστημα δόμησης, στις περιοχές όπου η δόμηση στηρίζεται στην πολεοδομική πρακτική και στο σχέδιο ανάπτυξης της πόλης
- το μεικτό σύστημα στο μεσοδιάστημα του συνεχούς και του πανταχόθεν ελεύθερου.

Στην γνώση των συγγραφέων, δεν υπάρχει προηγούμενη εργασία η οποία να αποτυπώνει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κυπριακού αστικού περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα να απαιτείται ουσιαστική προεργασία στην επιλογή των σημείων προσομοίωσης και μελέτης.

Μείζονος σημασίας είναι επίσης η μελέτη ροής και διασποράς σε αστική κλίμακα με ανομοιογενή γεωμετρία ως προς τη μεταβλητότητα στο ύψος των κτιρίων, καθώς οι εργαστηριακές πειραματικές μελέτες που έχουν εκπονηθεί μέχρι σήμερα αφορούν σε γεωμετρίες ομοιόμορφου ύψους κτιρίων και οι οποίες δεν είναι αντιπροσωπευτικές για το υφιστάμενο αστικό ανάγλυφο. Επίσης, μία παράμετρος η οποία δεν λαμβάνεται υπόψη στα υφιστάμενα μαθηματικά θερμορυστομηχανικά μοντέλα, και οι οποία επηρεάζει ιδιαίτερα σημαντικά την ικανότητα των μοντέλων, είναι αυτή της μετάδοσης θερμότητας στον περιβάλλοντα χώρο από τα κτίρια, μέσω ακτινοβολίας. Πρόσφατη εργασία που εκπονήθηκε στο ΕΠΡ [6] αποδεικνύει ότι τα υφιστάμενα μοντέλα αστοχούν μέχρι και 7°C στην πρόβλεψή τους, καταδεικνύοντας την σημασία της ορθής παραμετροποίησης των ιδιοτήτων των δομικών υλικών ως προς την εκπομπή ακτινοβολίας στο περιβάλλον.

Τέλος σε σχέση με τον σχολιασμό του ροϊκού πεδίου και της ενδεχομένης συμπεριφοράς ρυπογόνων αέριων ουσιών ευρισκόμενες σε αυτό, ο σχολιασμός των ευρημάτων αυτής της εργασίας πραγματοποιήθηκε για ιδανικές συνθήκες, για συνεχόμενη δηλαδή και αδιατάρακτη ροή σε υδραυλικό κανάλι. Στην πραγματικότητα τα μετεωρολογικά φαινόμενα έχουν στοχαστικό χαρακτήρα, ως εκ τούτου ολοκληρωμένα συμπεράσματα σε σχέση με την δυναμική συμπεριφορά ρυπαντών σε οδικό φαράγγι μπορούν να εξαχθούν μόνο σε συνδυασμό με μετρήσεις πεδίου. Ως εκ τούτου η επαλήθευση της συμπεριφοράς των ρύπων στα αστικά συμπλέγματα θα γίνει σε συνδυασμό με μετρήσεις πεδίου οι οποίες θα βελτιστοποιούν και θα ολοκληρώνουν τα πορίσματα αυτής της εργασίας.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΥΝΟΨΗ

Η εργασία αυτή στόχευε στην πειραματική διερεύνηση ροής σε συνθήκες οι οποίες προσομοιώνουν τη ροή σε αστικό φαράγγι. Για τους σκοπούς της εργασίας η περιοχή της ατμοσφαιρικής ροής η οποία υπέρκειται του αστικού θόλου ως επίσης και το κομμάτι εκείνο της ροής το οποίο εισέρχεται σε οδικό φαράγγι διαστάσεων 60 mm x 60 mm προσομοιώθηκε σε

υδραυλικό κανάλι ροής. Για τον καθορισμό του δυσδιάστατου ροϊκού πεδίου τόσο σε σχέση με το πεδίο μέσων ταχυτήτων, όσο και σε επίπεδο τυρβώδους κινητικής ενέργειας και ορθών και διατμητικών τάσεων Reynolds, χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία της Ταχυμέτρησης Εικόνας Σωματιδίων (Particle Image Velocimetry - PIV). Τα ευρήματα της εργασίας επιβεβαίωσαν αυτά προηγούμενων εργασιών [1] [2] [3] με τον προσδιορισμό μίας κύριας δίνης ανακύκλωσης μέσα στο τεχνητό οδικό φαράγγι. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι το κέντρο περιδίνησης δεν βρίσκεται στο κέντρο του τεχνητού φαραγγιού αλλά ελαφρώς μετατοπισμένο κατά 6 [mm] περίπου προς το κτίριο κατάντη της ροής (**Σχήμα 4 - λεπτομέρεια**). Μέσα από τον αναλυτικό χαρακτηρισμό της δίνης, προσδιορίστηκε μια περιοχή κατάντη, στο οριακό στρώμα μεταξύ κτιρίου και ροής, στην οποία παρατηρούνται ιδιαίτερα αυξημένα επίπεδα κινητικής ενέργειας και εναλλαγής τυρβώδους διάχυσης. Στην περιοχή αυτή ενδέχεται να παρουσιαστεί αυξημένη συγκέντρωση ρύπων, λόγω της πρόσκρουσης του ρευστού στο κτιριακό υπόθεμα και την δημιουργία ενός σημείου στασιμότητας ροής (stagnation point). Μέσα από τα ευρήματα της εργασίας επιβεβαιώθηκε επίσης ο προβληματικός εξασρισμός των οδικών φαραγγιών, καθώς στην διεπιφάνεια μεταξύ ροής υπερκείμενης του αστικού θόλου και τεχνητής κοιλότητας τα επίπεδα τυρβώδους διάχυσης της ροής παρουσιάζονται αισθητά μειωμένα. Ακόμη η περιδίνηση μέσα στο οδικό φαράγγι παρουσιάζει μια ιδιαίτερη ευστάθεια, καθώς η εναλλαγή μάζας από και προς το κέντρο περιδίνησης βρέθηκε να είναι αμελητέα, επιβεβαιώνοντας έτσι την εκ περιστροφής συμμετρία της υπό εξέταση δίνης. Ιδιαίτερης σημασίας είναι επίσης η συμπεριφορά των διατμητικών τάσεων Reynolds στο οριακό στρώμα μεταξύ κοιλότητας και ελεύθερης ροής. Συγκεκριμένα η φορά των τάσεων σε αυτό το σημείο είναι προς το φαράγγι, έχει δηλαδή αρνητικό πρόσημο σε όλη την περιοχή η οποία υπέρκειται της τεχνητής κοιλότητας. Η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας περνά μέσα από την προσομοίωση ρεαλιστικών γεωμετριών οι οποίες προσομοιώνουν το κυπριακό αστικό πλέγμα. Η προσομοίωση θα αποκτήσει πιο ρεαλιστικό χαρακτήρα αν επέλθει μέσα από την αναλυτική καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης και την κανονικοποίηση του κυπριακού αστικού ανάγλυφου με την βοήθεια και των τοπικών σχεδίων ανάπτυξης. Μείζονος σημασίας είναι και η επιβεβαίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τη βοήθεια μετρήσεων πεδίου, καθώς τα μετεωρολογικά φαινόμενα χαρακτηρίζονται ως στοχαστικά, και ως εκ τούτου οι μετρήσεις σε εργαστηριακή κλίμακα από μόνες τους εμπεριέχουν ένα ιδιαίτερα σημαντικό συντελεστή σφάλματος. Τέλος η ιδιαιτερότητα αυτής της δημοσίευσης συνίσταται στο γεγονός ότι σε αυτή παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που της πρώτης εφαρμογής Ταχυμέτρησης Εικόνας Σωματιδίων (Particle Image Velocimetry – PIV) στον κυπριακό ερευνητικό χώρο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Dezsö-Weidinger, G. et al. (2003) : Measurement of the turbulent mass flux with PTV in a street canyon, Journal of Wind Engineering, and Industrial Aerodynamics 91, pp. 1117–1131
- [2] Caton, F. et al. (2003) : Dispersion mechanisms in a street canyon, Atmospheric Environment 37, pp. 693–702
- [3] Simoeens, S. et al. (2007) : The flow across a street canyon of variable width—Part 1: Kinematic description, Atmospheric Environment 41, pp. 9002–9017
- [4] H. Schlichting, et al. (2000) : Grenzschicht Theorie, Springer Verlag, ISBN-3-540-55744-x
- [5] DaVis 7.2 Software, Item-Number(s)Q 1005xxx, Product Manual, La Vision, 2008
- [6] Kakoniti, An. (2008) : The effect of radiation heat transfer in the urban heat island phenomenon, using computational fluid dynamics simulation, Master of Science Thesis, University of Cyprus, 2008

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΟΛΙΚΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ – ΕΞΑΓΩΓΗ ΝΕΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

Ε. Α. Μέχλερη, Π. Α. Ζέρβας, Χ. Σαρίμβεης, Ι. Α. Παλυβός, Ν. Χ. Μαρκάτος

*Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου,
Αθήνα 157 80*

Τηλ: 210-7723235, Fax:210-7723228, Email: emehleri@chemeng.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος ασχολείται με τη σύγκριση γνωστών μοντέλων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, για την πρόβλεψη της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες και την επιλογή του πιο κατάλληλου για την περιοχή της Αθήνας. Στο δεύτερο μέρος γίνεται χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ) για τον υπολογισμό της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο. Η αξιολόγηση των εξεταζόμενων μοντέλων, βασίστηκε σε δεδομένα ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, καταγεγραμμένα στο μετεωρολογικό σταθμό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στην Αθήνα (37°58'26"N, 23°47'16"E), καθώς και δεδομένα ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο (32°) καταγεγραμμένα στην Ηλιακή Μονάδα της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ, για περίοδο ενός έτους (2004).

Τα μοντέλα που δοκιμάστηκαν χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, ισοτροπικά και ανισοτροπικά, ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού της διάχυτης ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια. Τα ισοτροπικά που εξετάστηκαν (Liu & Jordan, Koronakis, Jimenez & Castro, Badescu, Tian), υποθέτουν ομοιόμορφη κατανομή της διάχυτης ακτινοβολίας στον ουράνιο θόλο ενώ τα ανισοτροπικά (Circumsolar, Bugler, Temps & Coulson, Klucher, Ma&Iqbal, Reindl), λαμβάνουν υπόψη τις ανομοιομορφίες που παρουσιάζει η διάχυτη ακτινοβολία διερχόμενη μέσα από την ατμόσφαιρα. Για τα μοντέλα που επιλέχθηκαν, πραγματοποιήθηκε ποιοτική σύγκριση με τη βοήθεια διαγραμμάτων, ενώ υπολογίστηκαν διάφορα στατιστικά μεγέθη (συντελεστής προσδιορισμού R^2 , μέσο σφάλμα MBE, ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE, μέσο επί τοις εκατό σφάλμα MPE, στατιστικός συντελεστής t-stat), ώστε να επιλεγεί το καταλληλότερο. Με βάση τις τιμές των στατιστικών συντελεστών αυτών, έγινε μία ταξινόμηση των μοντέλων ως προς την ακρίβειά τους στον υπολογισμό της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο.

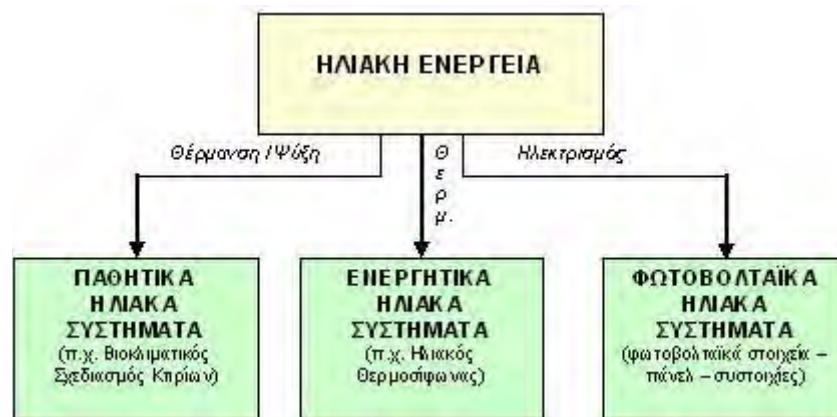
Το ισοτροπικό μοντέλο των "Liu & Jordan", ήταν το καλύτερο, ενώ το "Circumsolar model", δεν είχε ιδιαίτερα καλή απόδοση δεδομένου ότι θεωρεί την διάχυτη ακτινοβολία ως άμεση. Τα ανισοτροπικά μοντέλα : " Bugler", "Reindl", "Temps & Coulson", "Klucher", "Ma & Iqbal", "Jimenez & Castro", όπως και τα ισοτροπικά μοντέλα "Badescu" και "Tian", ταξινομούνται μετά το μοντέλο "Koronakis", το οποίο είναι εξίσου καλό με το ισοτροπικό μοντέλο των "Liu & Jordan".

Τέλος, αναπτύσσεται μοντέλο ΤΝΔ το οποίο εκτιμά την ολική ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, λαμβάνοντας ως δεδομένα εισόδου μόνο την ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο καθώς και την ακτινοβολία εκτός της ατμόσφαιρας, τη ζενιθιακή γωνία, καθώς και τη γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων του ήλιου στο φωτοβολταϊκό συλλέκτη. Η σύγκριση με τα προαναφερθέντα μοντέλα της βιβλιογραφίας

έδειξε ότι το μοντέλο ΤΝΔ εκτιμά ρεαλιστικότερα την ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο, καθώς αποδίδει καλύτερα σε περιοχές όπου τα μοντέλα της βιβλιογραφίας την υποεκτιμούν ή την υπερεκτιμούν μόνιμα.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια καθαρή, ήπια, ανεξάντλητη, και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της [1]. Όσον αφορά στην εκμετάλλευσή της ηλιακής ενέργειας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίζεται σε τρεις βασικές κατηγορίες εφαρμογών: τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα (Σχήμα 1). Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμική ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της τελευταίας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.



Σχήμα 1. Βασικές χρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας

Η εκτίμηση της ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο, είναι απαραίτητη καθώς τα περισσότερα ηλιακά συστήματα εγκαθίστανται υπό κλίση στο σημείο χρήσης. Επίσης, η άμεση και διάχυτη συνιστώσα της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ισχύος φωτοβολταϊκών συστημάτων, για το σχεδιασμό θερμικών ηλιακών συστημάτων και για την εκτίμηση της απόδοσής τους. Παρόλο που τα δεδομένα ολικής και διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο είναι γνωστά σε διάφορους μετεωρολογικούς σταθμούς, οι αντίστοιχες τιμές σε κεκλιμένο επίπεδο δεν είναι διαθέσιμες και εκτιμώνται με τη χρήση διαφόρων μοντέλων [2], λαμβάνοντας υπόψη τις συνιστώσες της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η γνώση των συνιστωσών της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο κρίνεται απαραίτητη για τον υπολογισμό της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο, καθώς δεν μπορεί να αναπτυχθεί ένα μοντέλο υπολογισμού της μόνο από την ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο για δύο κυρίως λόγους [3]:

- Η διάχυτη ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο εμπεριέχει και την ανακλώμενη ακτινοβολία από τα παρακείμενα αντικείμενα ή το έδαφος
- Η τοποθέτηση του συλλέκτη σε κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο δεν λαμβάνει υπόψη το μέρος του ουράνιου θόλου που είναι πίσω από το συλλέκτη. Η ακτινοβολία που προέρχεται από αυτό το τμήμα του ουράνιου θόλου, δεν εξαρτάται μόνο από τη γωνία κλίσης, την αζιμουθια γωνία του συλλέκτη και από το ηλιακό ύψος, αλλά και από τις συνθήκες της ατμόσφαιρας

Τα μοντέλα για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: ισοτροπικά και ανισοτροπικά.

Τα ισοτροπικά μοντέλα [4-8], υπολογίζουν τη διάχυτη ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο, θεωρώντας ότι κατανέμεται ομοιόμορφα στον ουράνιο θόλο. Η υπόθεση όμως αυτή, δεν είναι σωστή [9], και έτσι, αναπτύχθηκαν άλλα μοντέλα, γνωστά ως ανισοτροπικά, βασισμένα στη μερική ανισοτροπία της ατμόσφαιρας. Τα μοντέλα αυτά, λαμβάνουν υπόψη την αύξηση της διάχυτης ακτινοβολίας λόγω της κοντινής απόστασης από τον ήλιο (circumsolar) και λόγω της κοντινής απόστασης από τον ορίζοντα (horizon brightening). Μεταξύ των ανισοτροπικών μοντέλων που εξετάστηκαν και στην παρούσα εργασία είναι: Circumsolar [10], Ma & Iqbal [10], Bugler [11], Temps & Coulson [12], Klucher [13], Reindl [14].

Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος παρουσιάζονται διάφορα μοντέλα για τον υπολογισμό της διάχυτης ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο και συγκρίνονται με τον υπολογισμό διαφόρων στατιστικών δεικτών. Στο δεύτερο μέρος αναπτύσσεται ένα νέο μοντέλο υπολογισμού της ολικής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο, με τη χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων [15].

2. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία υπολογισμού της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο.

2.1. ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ

Η ολική ηλιακή ακτινοβολία, I_t , η οποία προσπίπτει σε μία κεκλιμένη επιφάνεια αποτελείται από τρεις συνιστώσες: την άμεση (I_{t_b}) που προέρχεται από τον ηλιακό δίσκο, τη διάχυτη (I_{t_d}) που προέρχεται από τον ουράνιο θόλο, καθώς και την ανακλώμενη που προέρχεται από το έδαφος της γύρω περιοχής (I_{t_r}), όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση:

$$I_t = I_{t_b} + I_{t_d} + I_{t_r} \quad (1)$$

Η άμεση ακτινοβολία την οποία θα δεχθεί το επίπεδο, εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων. Η διάχυτη και η ανακλώμενη ακτινοβολία που δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο δεν εξαρτώνται από τον προσανατολισμό του επιπέδου ούτε προέρχονται από όλο τον ουράνιο θόλο ή το έδαφος της γύρω περιοχής. Έτσι η διάχυτη ακτινοβολία την οποία δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο, θα προέρχεται μόνο από το τμήμα του ουρανού που "βλέπει" το επίπεδο.

Η άμεση και η ανακλώμενη συνιστώσα της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο μπορούν εύκολα να υπολογιστούν με τη χρήση απλών αλγορίθμων, όμως η φύση της διάχυτης ακτινοβολίας είναι πολύπλοκότερη και χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στον υπολογισμό της.

Η άμεση ακτινοβολία μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$I_{t_b} = I_b \times (\cos\theta / \cos\theta_z) \quad (2)$$

όπου I_b : η άμεση ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο, θ_z : η ζενιθιακή γωνία (Εξ.(3)), θ : η γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων του ήλιου, δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται από τις ηλιακές ακτίνες και την κάθετο στην επιφάνεια του συλλέκτη (Εξ.(4)). Έτσι,

$$\cos\theta_z = \sin\varphi \times \sin\delta + \cos\varphi \times \cos\delta \times \cos\omega \quad (3)$$

και

$$\cos\theta = \sin\delta \times \sin\varphi \times \cos b - \sin\delta \times \cos\varphi \times \sin b \times \cos\gamma + \cos\delta \times \cos\varphi \times \cos b \times \cos\omega + \cos\delta \times \sin\varphi \times \sin b \times \cos\gamma \times \cos\omega + \cos\delta \times \sin b \times \sin\gamma \times \sin\omega \quad (4)$$

όπου δ : η ηλιακή απόκλιση, φ : το γεωγραφικό πλάτος της θέσης, ω : η ωριαία γωνία του ήλιου, ενώ b και γ είναι η κλίση και η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη, αντίστοιχα.

Η ανακλώμενη συνιστώσα σε κεκλιμένο επίπεδο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{tr} = \frac{1}{2} \times r_E \times I \times (1 - \cos b) \quad (5)$$

όπου, r_E : ο συντελεστής ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας.

2.2. ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΔΙΑΧΥΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Στον Πίνακα 1, παρατίθενται τα μοντέλα υπολογισμού της διάχυτης ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο, τα οποία μελετήθηκαν σε αυτή την εργασία.

Πίνακας 1. Σχέσεις υπολογισμού της διάχυτης ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη

Μοντέλο	Έτος	Τύπος	Εξίσωση
Liu & Jordan	1962	Ισοτροπικό	$I_{da} = I_d \times (1 + \cos b/2)$
Temps & Coulson	1977	Ανισοτροπικό	$I_{da} = (I_d \times (1 + \cos b) \times (1 + (\sin b/2)^3 \times (1 + (\cos\theta_z)^2) \times (\sin\theta_z)^3)$
Bugler	1977	Ανισοτροπικό	$I_{da} = I_d - ((0.05 \times I_{db}/\cos\theta) \times (1 + \cos b/2) + (0.05 \times I_{db} \times \cos\theta))$
Klucher	1979	Ανισοτροπικό	$I_{da} = I_d \times (0.5 \times (1 + \cos b/2) \times (1 + F \times (\sin b/2)^3 \times (\cos\theta_z)^2 \times (\sin\theta_z)^3)$
Ma&Iqbal	1983	Ανισοτροπικό	$I_{da} = I_d \times ((K_r \times R_b) + (1 - K_r) \times (\cos b/2)^2)$
Iqbal	1983	Ανισοτροπικό	$I_{da} = I_d \times R_b$
Jimenez & Castro	1986	Ανισοτροπικό	$I_{da} = 1/2 \times 0.2 \times I \times (1 + \cos b)$ $I_{db} = 0.8 \times I \times R_b$
Koronakis	1986	Ισοτροπικό	$I_{da} = 1/3 \times I_d \times (2 + \cos b)$
Reindl	1990	Ανισοτροπικό	$I_{da} = I_d \times ((1 - A_i) \times (1 + \cos b/2) \times (1 + F) \times (\sin b/2)^3 + (A_i \times R_b))$
Tian	2001	Ισοτροπικό	$I_{da} = I_d \times (1 - b/180)$
Badescu	2002	Ισοτροπικό	$I_{da} = I_d \times (3 + \cos 2b)/4$

3. ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για τη σύγκριση των προαναφερθέντων συσχετίσεων, όπως και για την εξαγωγή του νέου μοντέλου υπολογισμού της ολικής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, καταγράφηκαν στο σταθμό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στην Αθήνα, περίπου 4.5 χλμ. ανατολικά από την Πλατεία Συντάγματος, στο δυτικό μέρος του

Υμηττού. (37°58'26"B, 23°47'16"A, 219μ. υψόμετρο) [16]. Τα δεδομένα αυτά είναι δεκάλεπτες τιμές ολικής, άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, όπως επίσης και τιμές ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο, υπολογισμένες σε kW/m^2 , για την περίοδο ενός έτους (1^η Ιανουαρίου 2004-31 Δεκεμβρίου 2004), οι οποίες μετασχηματίστηκαν σε 8760 ωριαίες τιμές. Στη συνέχεια, αφαιρώντας τις μηδενικές τιμές της καταγεγραμμένης ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο, η τελική βάση δεδομένων αποτελείται από 4283 τιμές. Η μορφή των δεδομένων παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Δομή των δεδομένων στη βάση

Αύξων αριθμός δεδομένων	$I_{b_{rec}}$	$I_{d_{rec}}$	I_{rec}	$I_{t_{rec}}$
1	0.00055176	0.020282	0.020833	0.014167
2	0.19003	0.066301	0.25633	0.36833
...
...
40	0.0010649	0.041602	0.042667	0.039167
41	0.00025615	0.0022438	0.0025	0.0025
...
4283	0.00038376	0.0019496	0.0023333	0.0016667

Τιμές σε: kW/m^2

4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το νέο μοντέλο που αναπτύχθηκε βασίζεται στη χρήση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων [15,17], λαμβάνοντας ως δεδομένα εισόδου την ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο, την ακτινοβολία στο επίπεδο εκτός της ατμόσφαιρας, τη ζενιθιακή γωνία και τη γωνία των ηλιακών ακτίνων με την κάθετο στην επιφάνεια του συλλέκτη, έχοντας ως έξοδο την ολική ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο. Το εξαχθέν μοντέλο συγκρίθηκε με αυτά που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 2.2 τόσο ποιοτικά, όσο και με τον υπολογισμό διαφόρων στατιστικών συντελεστών, με εμφανή την ακρίβεια υπολογισμού της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Με βάση την απόδοσή τους, τα μοντέλα υπολογισμού της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο παρουσιάζονται "κατά σειρά επιτυχίας" στον παρακάτω πίνακα, όπου έχουν υπολογιστεί διάφοροι στατιστικοί δείκτες για την αξιολόγησή τους [18].

Πίνακας 3. Στατιστικοί δείκτες για τα μοντέλα υπολογισμού της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

1.Μοντέλο νευρωνικών δικτύων RBF	$R^2=0.95891$, $RMSE=0.029467$, $MBE\%=0.865$, $MBE=0.00079975$ $MPE=7.7667$, $t\text{-stat}=1.734$
2.Ισοτροπικό Liu&Jordan, 1962	$R^2=0.938$, $RMSE=0.085$, $MBE\%=6.995$, $MBE=0.032$ $MPE=7$, $t\text{-stat}=25.9$
3.Ισοτροπικό-Koronakis, 1986	$R^2=0.938$, $RMSE=0.087$, $MBE\%=8.829$, $MBE=0.036$ $MPE=7.8$, $t\text{-stat}=28.9$

4.Ισοτροπικό-Badescu, 2002	$R^2=0.935$, $RMSE=0.082$, $MBE\%=5.738$, $MBE=0.023$ $MPE=4.934$, $t-stat=18.238$
5.Ισοτροπικό-Tian, 2001	$R^2=0.934$, $RMSE=0.081$, $MBE\%=4.388$, $MBE=0.017$ $MPE=3.739$, $t-stat=13.721$
6.Ανισοτροπικό-Bugler, 1977	$R^2=0.937$, $RMSE=0.089$, $MBE\%=9$, $MBE=0.037$ $MPE=8.18$, $t-stat=29.3$
7.Ανισοτροπικό-Reindl, 1990	$R^2=0.934$, $RMSE=0.097$, $MBE\%=10.719$, $MBE=0.044$ $MPE=10.307$, $t-stat=33.165$
8. Ανισοτροπικό –Temps& Coulson, 1977	$R^2=0.938$, $RMSE=0.098$, $MBE\%=12.443$, $MBE=0.053$ $MPE=11.43$, $t-stat=40.917$
9. Ανισοτροπικό -Klucher, 1979	$R^2=0.939$, $RMSE=0.099$, $MBE\%=12.719$, $MBE=0.054$ $MPE=12.13$, $t-stat=41.265$
10.Ανισοτροπικό –Ma&Iqbal	$R^2=0.926$, $RMSE=0.108$, $MBE\%=13.537$, $MBE=0.058$ $MPE=12.637$, $t-stat=40.606$
9.Ανισοτροπικό-Jimenez& Castro, 1986	$R^2=0.869$, $RMSE=0.123$, $MBE\%=-10.789$, $MBE=-0.036$ $MPE=-4.569$, $t-stat=19.645$
12.Ανισοτροπικό-Iqbal, 1983	$R^2=0.8$, $RMSE=0.243$, $MBE\%=31.3$, $MBE=0.17$ $MPE=31.4$, $t-stat=62.5$

Από τον Πίνακα 3 προκύπτει ότι με εξαίρεση το ανισοτροπικό μοντέλο του Jimenez & Castro, οι θετικές τιμές του MBE δείχνουν μια υπερεκτίμηση του I_t σε σχέση με τις καταγεγραμμένες τιμές. Συγκεκριμένα οι τιμές του MBE% κυμαίνονται από 0.865% για το μοντέλο των νευρωνικών δικτύων έως 31.3% για το ανισοτροπικό μοντέλο του Iqbal. Οι τιμές του συντελεστή προσδιορισμού δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές μεταξύ τους όπως επίσης και οι τιμές του RMSE, με εξαίρεση το μοντέλο των νευρωνικών δικτύων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αξιολόγηση των παραπάνω μοντέλων στηρίχτηκε και σε ποιοτική σύγκριση με τη χρήση διαγραμμάτων καθώς, κατόπιν παρατηρήσεων, βγήκε το συμπέρασμα ότι οι στατιστικοί δείκτες δεν είναι αντιπροσωπευτικοί για την ακρίβεια των μοντέλων.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή έγινε μία μελέτη σύγκρισης ορισμένων μοντέλων υπολογισμού της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο, όπως επίσης και η εξαγωγή ενός νέου μοντέλου με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Ο υπολογισμός των στατιστικών συντελεστών για τα μοντέλα αυτά έδειξε ότι το νέο μοντέλο, όπως επίσης και το κλασικό ισοτροπικό μοντέλο των Liu & Jordan [4] παρουσιάζουν μεγαλύτερη ακρίβεια από τα υπόλοιπα στον υπολογισμό της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο. Τελικά, έπειτα και από ποιοτική σύγκριση, το μοντέλο των νευρωνικών δικτύων προτείνεται για τον υπολογισμό της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο, όχι μόνο διότι έχει μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά και διότι χρησιμοποιεί ως δεδομένο μόνο την ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο.

ΟΡΟΛΟΓΙΑ

A_i	Συντελεστής ατμοσφαιρικής διαπερατότητας (I_b/I_{oh})
b	Η κλίση του συλλέκτη
F	Συντελεστής υπολογισμού της φωτεινότητας του ορίζοντα ($\sqrt{I_b/I}$)
I	Η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο
I_{rec}	Καταγεγραμμένη ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο
I_b	Άμεση ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο
I_{brec}	Καταγεγραμμένη άμεση ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο
I_d	Διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο
I_{drec}	Καταγεγραμμένη διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο
I_{oh}	Η ακτινοβολία στο επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας
I_t	Ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο
I_{tb}	Άμεση ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο
I_{td}	Διάχυτη ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο
I_{tr}	Ανακλώμενη ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο
I_{trec}	Καταγεγραμμένη ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο
K_t	Συντελεστής καθαρότητας της ατμόσφαιρας (I/I_{oh})
MBE	Μέσο σφάλμα
MPE	Μέσο επί τοις εκατό σφάλμα
r_E	Ο συντελεστής ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας
R^2	Συντελεστής προσδιορισμού
R_b	$\cos\theta / \cos\theta_z$
$RMSE$	Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος
$t-stat$	Στατιστικός συντελεστής
γ	Η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη
δ	Η ηλιακή απόκλιση
θ	Η γωνία των ηλιακών ακτίνων με την κάθετο στην επιφάνεια του συλλέκτη
θ_z	Η ζενιθιακή γωνία
φ	Το γεωγραφικό πλάτος της θέσης
ω	Η ωριαία γωνία του ήλιου

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Duffie JA , Beckman WA, *Solar Engineering on Thermal Processes*, third ed., John Wiley & Sons Ltd., New York, 2006.
2. Noorian Mohammad Ali, Moradi Isaac, Kamali Ali Gholam, *Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces*, Renewable Energy 2008; 33: 1406-1412.
3. Behr HD, *Solar radiation on tilted south-oriented surfaces: Validation of transfer-models*, Solar Energy 1997; 61(6):399-413
4. Liu BYH, Jordan RC, *Daily insolation on surfaces tilted towards the equator*, Trans ASHRAE 1962:526-41
5. Koronakis PS, *On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area*, Solar Energy 1986;36(3):217-25
6. Jimenez JI, Castro Y, *National assembly of geophysics and geodesy*, vol. II, 1986. p. 805
7. Badescu V, *3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces*, Renewable Energy 2002;26:221–223
8. Tian YQ, Davies-Colley RJ, Gong P, Thorrold BW, *Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect*, Agricultural and Forest Meteorology 2001;109:67–74.
9. Hamilton HL, Jackson A, *A shield for obtaining diffuse sky radiation from portions of the sky*, Solar Energy 1985; 34(1): 121-123
10. Iqbal M, *An introduction to solar radiation*, Canada: Academic Press; 1983, ISBN 0-12-373752-4
11. Bugler JW, *The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation*, Solar Energy 1977;19(5):477-91
12. Temps RC, Coulson KL, *Solar radiation incident upon slopes of different orientation*, Solar Energy 1977;19(2):179–84
13. Klucher TM, *Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces*, Solar Energy 1979;23(2):111–114
14. Reindl DT, Beckman WA, Duffie JA, *Evaluation of hourly tilted surface radiation models*, Solar Energy 1990;45(1):9–17
15. Sarimveis H, Alexandridis A, Tsekouras G, Bafas G., *A Fast and Efficient Algorithm for Training Radial Basis Function Neural Networks Based on a Fuzzy Partition of the Input Space*, Industrial and Engineering Chemical Research, 2002, 41, 751-59
16. <http://www.chemeng.ntua.gr/solarlab/THERMIE-en.html>
17. P. L. Zervas, H. Sarimveis, J. A. Palyvos, N. C. G. Markatos. Prediction of Daily Global Solar Irradiance Surfaces Based on Neural-Network Techniques. Renewable Energy 2008; 33(8): 1796-1803.
18. Stone RG, Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models, Solar Energy 1993; 5(4): 289-291

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ - ΑΠΕ - ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΕΙΦΟΡΟ ΤΟΥΡΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΤΑ ΝΗΣΙΑ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ

E. Μιχάλαϊνα¹ και Ι. Τρυπαναγνωστόπουλος²

¹Ειδική Επιστήμων, Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, Ελλάδα
Υποψήφια Διδάκτωρ Πανεπιστημίου Σορβόνης, Παρίσι 75005, Γαλλία
Τηλ: +234 96382071, e-mail: michalena@hotmail.com
²Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 26500
Τηλ: 2610 997472, e-mail: yiantrip@physics.upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή διερευνούνται ειδικά χαρακτηριστικά εφαρμογής των ηλιακών θερμικών συλλεκτών και φωτοβολταϊκών και εξετάζεται η συμβολή τους στην αειφόρο τουριστική ανάπτυξη στα νησιά της Μεσογείου. Μελετώνται βέλτιστες πρακτικές και επιδιώκεται η διερεύνηση των αναγκαίων προϋποθέσεων, υπό τις οποίες οι πρακτικές αυτές θα μπορούσαν να εφαρμοστούν εξ ίσου καλά και σε άλλες περιοχές. Στην μελέτη λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψη η ευαισθησία πολλών νησιώτικων περιοχών της Μεσογείου σε σχέση με τις κλιματικές αλλαγές και τις προοπτικές περαιτέρω οικονομικής τους ανάπτυξης, μέσα από τη σχεδίαση εναλλακτικών μορφών τουρισμού. Προτείνονται τρόποι ευρείας χρήσης των τεχνολογιών ηλιακής ενέργειας, σε τομείς με υψηλό δείκτη ενεργειακών απαιτήσεων και παρουσιάζονται ορισμένες νέες σχεδιάσεις, που παρέχουν ικανοποιητικό συνδυασμό απόδοσης, κόστους, λειτουργικότητας και αισθητικής. Τέλος, εξετάζονται παράγοντες που επηρεάζουν την εφαρμογή των ηλιακών συστημάτων στον τουριστικό τομέα και προσδιορίζονται τα κριτήρια για την αποτελεσματικότητα της διείσδυσής τους στην αγορά.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η τουριστική δραστηριότητα αυξάνεται με ρυθμό περί το 4% ετησίως, ενώ τα έσοδα από την παγκόσμια τουριστική ανάπτυξη αναμένεται να ανέλθουν σε €1.500 δις έως το 2010. Σε όρους δαπανών και απασχολούμενου προσωπικού, ο τουρισμός ανάγεται σε πρώτη «βιομηχανία» παγκοσμίως [1, 2] ενώ ταυτόχρονα αποτελεί στοιχείο της σύγχρονης καθημερινότητας και ευκαιρία για περαιτέρω οικονομική ανάπτυξη για χώρες (ή περιοχές) που αντιμετωπίζουν δυσχέρειες λόγω των σύγχρονων οικονομικών προβληματισμών και συνθηκών. Τα παραπάνω βρίσκουν ιδιαίτερη εφαρμογή στο χώρο της Μεσογείου, όπου βρίσκονται χιλιάδες μικρά και μεγάλα, κατοικημένα και ακατοίκητα ευρωπαϊκά νησιά και όπου πρόσφατα αναπτύχθηκαν σημαντικές Ευρωπαϊκές πρωτοβουλίες.

Η Μεσόγειος είναι εν γένει μια πολύ δυναμική περιοχή. Στις χώρες της διαμένουν 145 εκατομμύρια κάτοικοι. Το ποσοστό του πληθυσμού που διαμένει στη Μεσόγειο αυξήθηκε κατά 1,7% την περίοδο 2000-2006, ενώ η αύξηση της οικονομικής ανάπτυξης κατά την ίδια περίοδο κυμάνθηκε κατά μέσον όρο στο 1%-2%. Κατά την διάρκεια της ίδιας περιόδου, ο πληθυσμός αυξήθηκε από 132 σε 145 εκατομμύρια κατοίκους [3].

Η περιοχή της Μεσογείου είναι στρατηγικής σημασίας για την Ευρώπη και γι' αυτό η ΕΕ προσπαθεί να υποστηρίξει τις Μεσογειακές χώρες να μετατραπούν προοδευτικά σε μια ζώνη σταθερότητας και ευημερίας. Η Διακήρυξη της Βαρκελώνης προσφέρει μια βάση για την προώθηση αειφόρου και ισορροπημένης οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης στην Περιοχή.

Τα νησιά της Μεσογείου συμμετέχουν κατά 2,2% στο ακαθάριστο Ευρωπαϊκό προϊόν και προσελκύουν το 30% του παγκόσμιου τουρισμού (σχεδόν 220 εκατομμύρια τουρίστες ετησίως). Το ποσοστό αυτό, αναμένεται να ανέλθει στο 50% κατά τα επόμενα χρόνια [4]. Το υψηλό αυτό ποσοστό, οφείλεται σε υφιστάμενους τουριστικούς πόρους.

Το φυσικό κάλλος των νησιών αυτών, η αυθεντική κοινωνική νοοτροπία και η μοναδική ιστορική και πολιτισμική τους κληρονομιά, ενθαρρύνουν την ανάπτυξη εναλλακτικών μορφών τουρισμού. Έτσι, τα νησιά αυτά, αποτελούν προορισμούς ταυτόχρονα, «πολυτελών διακοπών», αναψυχής, πολιτισμικής ενημέρωσης, αθλητικών δραστηριοτήτων, κλπ.

Παράλληλα ωστόσο, η συσσώρευση επισκεπτών και η ανέγερση μεγάλων ξενοδοχειακών εγκαταστάσεων και υποδομών σε τόσο ευαίσθητους και περιορισμένους, γεωγραφικά, χώρους, οδηγεί στην υπερεκμετάλλευση των τουριστικών αυτών πόρων και στην υποβάθμιση των γύρω τοπίων, καθώς και σε φαινόμενα υπερκατανάλωσης υδάτινου και ενεργειακού δυναμικού. Η συνειδητοποίηση αυτής της υποβάθμισης οδήγησε στη σύλληψη του όρου «βιώσιμη τουριστική ανάπτυξη» και αποτελεί μια επιπρόσθετη ευκαιρία για τις τοπικές κοινωνίες να αξιοποιήσουν τα οφέλη από την ιδιαίτερη πολιτισμική και φυσική ταυτότητα του τόπου τους [5].

Στην εργασία αυτή, η μελέτη εστιάζεται στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας στα νησιά της Μεσογείου.

2. ΝΗΣΙΑ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σε μια χρονική περίοδο όπου οι κυριότερες ευρωπαϊκές ανησυχίες αφορούν την εξασφάλιση ενεργειακού ανεφοδιασμού, την αύξηση της Ευρωπαϊκής ανταγωνιστικότητας μέσω καινοτόμων τεχνολογιών και έρευνας και τη λήψη μέτρων για την ανταπόκριση στις διεθνείς περιβαλλοντικές υποχρεώσεις που απορρέουν από το πρωτόκολλο του Κυότο [6], οι ΑΠΕ έρχονται να διαδραματίσουν κυρίαρχο ρόλο τόσο σε ευρωπαϊκό, όσο σε εθνικό και τοπικό επίπεδο. Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο «επιβάλλονται» πλέον από το Ευρωπαϊκό Δίκαιο με τη μορφή «υποχρεωτικών» ποσοστών στο εθνικό ενεργειακό ισοζύγιο των κρατών-μελών.

Σε εθνικό επίπεδο αποτελούν μέρος ειδικών ρυθμίσεων που απορρέουν από πλήθος Νόμων και Υπουργικών Αποφάσεων. Σε τοπικό επίπεδο, ο ρόλος των ΑΠΕ γίνεται επιτακτικός λόγω συνθηκών και αυτό αφορά κυρίως τα νησιά. Πέραν των τουριστικών πιέσεων που προαναφέρθηκαν, οι νησιώτικες περιοχές, αν και δεν συμβάλλουν σοβαρά στην έκλυση περιβαλλοντικών ρύπων, είναι οι πρώτες που βάλλονται από τις κλιματικές αλλαγές [7].

Η πλειοψηφία των νησιών δεν είναι «συνδεδεμένα» στο βασικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρισμού των ηπειρωτικών χωρών, γεγονός που επιφέρει υψηλό κόστος της ενεργειακής τους τροφοδότησης από πετρέλαιο και την ανάγκη για ενεργειακή αυτονομία. Από την άλλη, τα νησιά έχουν πλούσιο φυσικό ενεργειακό δυναμικό και επιπρόσθετα ενδείκνυνται για την ανάπτυξη εναλλακτικών μορφών τουρισμού, όπως άλλωστε υποδεικνύει η σύγχρονη τάση εθνικής και Ευρωπαϊκής τουριστικής στρατηγικής.

Παρ'όλα αυτά, το δυναμικό αυτό και τα οφέλη του για όλη την περιοχή της Μεσογείου παρεμποδίζονται από δυσκολίες οι οποίες κυρίως συνδέονται με ανεπαρκές θεσμικό καθεστώς, καθώς και με την πλασματική παρουσίαση του κόστους τους ως «υψηλό», λόγω της μη ενσωμάτωσης στα ορυκτά καύσιμα του εξωτερικού κόστους των συμβατικών καυσίμων. Η έλλειψη ενημέρωσης των ενεργειακών χρηστών σχετικά με τις τεχνολογίες ΑΠΕ είναι ένα επιπρόσθετο πρόβλημα [3].

Η **Σικελία** είναι το μεγαλύτερο νησί της Μεσογείου και η οικονομία της βασίζεται κυρίως στον τουρισμό. Το 70% του ηλεκτρισμού παράγεται από ορυκτά καύσιμα (κυρίως πετρέλαιο) και μόνο το 25% προέρχεται από ΑΠΕ (κυρίως υδροηλεκτρική ενέργεια). Το κόστος τους παραγόμενου ηλεκτρισμού είναι από τα υψηλότερα της Ευρώπης (77,91 €/MWh, με μέση

τιμή Ιταλίας 69,84 €/MWh). Στη Σικελία το δυναμικό φυσικών ενεργειακών πόρων (κυρίως ανέμου, υδάτινων πόρων και γεωθερμίας) παραμένει υψηλό. Δεδομένου ότι το νησί περιλαμβάνει περιοχές που υπόκεινται σε καθεστώς διεθνούς προστασίας (περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί από τη UNESCO ως περιοχές παγκόσμιας κληρονομιάς), επιχειρείται η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας ώστε να προσφέρει βιώσιμες λύσεις.

Ένα άλλο παράδειγμα περαιτέρω τουριστικής ανάπτυξης με την συμβολή της ηλιακής τεχνολογίας, παρουσιάζεται στο ελληνικό νησί της **Γαύδου**. Οι τουριστικές υποδομές είναι σχεδόν ανύπαρκτες, ενώ η κύρια τουριστική δραστηριότητα εντοπίζεται το καλοκαίρι κατά το οποίο συχναίνουν στο νησί παραθεριστές που κάνουν ελεύθερο camping.

Από το γεγονός αυτό, συνάγεται ότι το νησί εμφανίζει σποραδικές (στον τόπο και στο χρόνο) ενεργειακές ανάγκες, οι οποίες καλύπτονται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα 20KW και μερικά ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη.

Στα **Κανάρια νησιά**, παρακολουθούμε επίσης την προσπάθεια διάδοσης και ενημέρωσης για τις ΑΠΕ, οργανωμένη από το ερευνητικό εργαστήριο ITER, που έχει τη βάση του σε ένα από τα νησιά. Βασικός στόχος του προγράμματος είναι να ευαισθητοποιηθεί η πολιτική ηγεσία, η οποία ούτως ή άλλως, στις μέρες μας ενδιαφέρεται για τις αειφόρες ενεργειακές λύσεις στην ανάπτυξη και εξαγγελία των ενεργειακών τους προγραμμάτων.

Το ίδιο θέμα της ενημέρωσης σχετικά με τη λειτουργία των ηλιακών συστημάτων, θεωρήθηκε πρωτεύων εμπόδιο για την περαιτέρω εγκατάστασή τους στον κτιριακό τομέα της **Σαρδηνίας**. Η οικονομία του νησιού βασίζεται κυρίως στον πρωτογενή τομέα (33%) και στον τουρισμό (48%), ο οποίος απασχολεί το 60% του τοπικού ανθρώπινου δυναμικού και είναι υπεύθυνος για το 7% του Ακαθάριστου Εγχώριου Προϊόντος.

Ο δευτερογενής τομέας αποτελεί το 19% του νησιού. Σε ότι αφορά την ενεργειακή προσφορά του νησιού, και παρά το γεγονός ότι το νησί εξυπηρετείται στην πλειοψηφία του από εισαγόμενο πετρέλαιο, οι αρχές επεξεργάστηκαν ένα Σχέδιο ΑΠΕ λαμβάνοντας ως κριτήριο τις ειδικές ενεργειακές ανάγκες και ενεργειακούς πόρους της κάθε περιοχής ξεχωριστά.

Παρόμοιο Σχέδιο ανάπτυξης των ΑΠΕ έχει να παρουσιάσει και το νησί της **Κύπρου**. Οι τεχνολογίες ΑΠΕ βρίσκουν πρόσφορο έδαφος ανάπτυξης στο νησί, λόγω των έντονων γεωμορφολογικών του χαρακτηριστικών, του κλίματός του, των τοπικών φυσικών του πόρων και της τοπικής αποδοχής για καινοτόμες ενεργειακές τεχνολογίες. Κυρίαρχη θέση μορφής ΑΠΕ είναι η ηλιακή ενέργεια όπου και φέρνει την Κύπρο πρώτη χώρα στον κόσμο στην εγκατάσταση ηλιακών θερμικών συλλεκτών ανά 1000 κατοίκους (~700 m²/1000 κατ).

Σε αντίθεση με τη Σαρδηνία, το Σχέδιο για τις ΑΠΕ στην Κύπρο έχει σχεδιαστεί από τοπικούς παράγοντες και είναι τοπικού χαρακτήρα. Σύμφωνα με αυτό, σε περιοχές με ευαίσθητα οικοσυστήματα και ιστορικά μνημεία έχουν επιλεχθεί ήπιες παρεμβάσεις που δεν θα δημιουργήσουν οπτικές οχλήσεις. Σε περιοχές με πολυτελή τουρισμό, έχει δοθεί προτεραιότητα στην ιδέα της χρήσης ηλιακών οχημάτων για τα γήπεδα γκολφ. Στις δε απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές, η χρήση βιομάζας προωθείται για οικιακές χρήσεις.

Την ίδια προσπάθεια ευαισθητοποίησης του κοινού (με ιδιαίτερη έμφαση στους μαθητές), παρατηρούμε στην **Κρήτη**. Υπεύθυνο για το συντονισμό πρακτικών και μέτρων σχετικών με την ενέργεια σε τοπικό επίπεδο είναι το Ενεργειακό Γραφείο Περιφέρειας Κρήτης το οποίο, σε συνεργασία με τις τοπικές αρχές, εφάρμοσε ένα πενταετές πρόγραμμα ενημέρωσης σχετικά με τις ΑΠΕ με την προοπτική το νησί να αναπτύξει ένα αξιόπιστο ενεργειακό σύστημα με τη μέγιστη δυνατή συμβολή ΑΠΕ.

Τα αποτελέσματα της πενταετούς ενημέρωσης και η εκτεταμένη χρήση ανεμογεννητριών και ηλιακών θερμικών συλλεκτών, καθώς επίσης πρόσφατα και την είσοδο των φωτοβολταϊκών, συνέβαλλαν στην πλήρη αποδοχή των ΑΠΕ από τους κατοίκους του νησιού και στην ανάπτυξη οικολογικού τουρισμού που προσέφερε και προσφέρει πολλαπλά οφέλη για το νησί.

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΓΟΡΑΣ ΑΠΕ ΣΤΑ ΝΗΣΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΟΥΡΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ

Με τα παραπάνω παραδείγματα, προσπαθήσαμε να εκτιμήσουμε παρούσες προσεγγίσεις εφαρμογών ΑΠΕ σε νησιά (κυρίως της Μεσογείου ή με χαρακτηριστικά συγγενή με τα νησιά της Μεσογείου). Τέτοιου είδους προσεγγίσεις επιχειρήθηκαν στο παρελθόν [8] αλλά τα πλαίσια που αναπτύχθηκαν ήταν μάλλον τεχνικού ή οικονομικού περιεχομένου και δεν περιελάμβαναν θέματα θεσμικού χαρακτήρα ή θέματα τοπικής διακυβέρνησης.

Παρατηρήσαμε ότι η εφαρμογή των ΑΠΕ στη Μεσόγειο και κυρίως στα νησιά της εμπεριέχει στοιχεία πολιτικού και στρατηγικού χαρακτήρα. Η δε παρακολούθηση των κινήτρων βάσει των οποίων λειτούργησαν οι αρχές, ή οι τελικοί χρήστες, σχετικά με την υιοθεσία των συστημάτων ηλιακής ενέργειας, οδήγησε σε συγκεκριμένα μοντέλα αιεφόρου οικονομικής και τουριστικής ανάπτυξης.

Τα 10 εκατομμύρια κόσμου που δεν έχουν πρόσβαση σε ηλεκτρισμό, καθώς και επείγοντα προβλήματα οικονομικο-κοινωνικού χαρακτήρα στο χώρο της Μεσογείου, έχουν αναδείξει τις ΑΠΕ και τις τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας σε πιθανή λύση των προβλημάτων αυτών [3]. Η ΕΡΙΑ εκτιμά ότι το ετήσιο δυναμικό ηλιακής ενέργειας σε όρους εγκατεστημένης ισχύος, για τις χώρες της Μεσογείου (εκτός των Ευρωπαϊκών χωρών), θα μπορούσε να διαμορφωθεί από 15 MW το 2005 σε 61 MW το 2010 και σε 2,5 GW το 2020. Ως περιφερειακά «συστήματα», τα νησιά της Μεσογείου θα μπορούσαν να επηρεάσουν την πολιτική εξάπλωσης των ηλιακών συστημάτων. Για να το πετύχουν ωστόσο αυτό, θα πρέπει να αποκτήσουν «πολιτική δύναμη επιρροής», δηλαδή να δημιουργήσουν συγκριτικά πλεονεκτήματα και προστιθέμενες αξίες, σε περιορισμένο, σχετικά, χρόνο και με γνώμονα την αιεφόρο ανάπτυξη. Ειδικότερα για τα νησιά της Μεσογείου, οι οποιεσδήποτε στρατηγικές θα πρέπει να προσβλέπουν στη διατήρηση της τοπικής και πολιτισμικής κληρονομιάς, και στην περίπτωσή μας στην δημιουργία ενεργειακής αυτόρκειας και οικονομικής ανάπτυξης με τρόπο που να σέβεται το περιβάλλον και την κοινωνική ευζωία.

Τα παραπάνω έχουν ιδιαίτερη εφαρμογή στα πλαίσια της τουριστικής ανάπτυξης των νησιών της Μεσογείου και άρα στην οικονομική ανάπτυξή τους και ευημερία τους. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων το ενδιαφέρον για το μαζικό τουρισμό έχει δώσει τη θέση του στον «ποιοτικό τουρισμό», ο οποίος χρειάζεται αντίστοιχα «ποιοτικές μεθόδους» εξηλεκτρισμού.

Οι εφαρμογές ΑΠΕ διαφέρουν από νησί σε νησί εν σχέσει με την τουριστική ανάπτυξη. Σε νησιά στα οποία ο τουρισμός δεν έχει αναπτυχθεί (βλ. περίπτωση **Γαύδου**) και όπου υπάρχουν περιθώρια περαιτέρω τουριστικής ανάπτυξης, η εφαρμογή ηλιακών συστημάτων θα μπορούσε να είναι ζωτικής σημασίας και η «ποιοτική» ενεργειακή τροφοδότηση να αποτελέσει προϋπόθεση για την ανάπτυξη αυτή και κατ' επέκταση για την ανάπτυξη της τοπικής οικονομίας. Υπάρχει βέβαια και η περίπτωση κατά την οποία η ενεργειακή στρατηγική - η σχετική με τις ΑΠΕ - δεν έχει καμία αιτιακή σχέση με τη στρατηγική τουριστικής ανάπτυξης. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να συμβαίνει σε μεγάλα νησιά όπου ο τουρισμός δεν είναι η πρωτεύουσα δραστηριότητα.

Η κατανόηση της αιτιακής σχέσης μεταξύ των ΑΠΕ και της τουριστικής ανάπτυξης είναι σημαντική, διότι οι ΑΠΕ θα μπορούσαν να αποτελέσουν μοχλό και κίνητρο ανάπτυξης συγκεκριμένων τουριστικών δραστηριοτήτων. Έτσι, «απειλές» που διαγνώθηκαν στις αναλυθείσες περιπτώσεις, θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε «ευκαιρίες» για την ανάπτυξη ΑΠΕ. Το υψηλό ποσοστό ανεργίας, για παράδειγμα, στη **Σικελία** είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών με συνέπεια την προσέλευση ενός νέου είδους τουρισμού στο νησί. Η ανάγκη περαιτέρω τουριστικής έλευσης στη **Γαύδο** επίσης, οδήγησε στη σκέψη για την ανάπτυξη ενεργειακής υποδομής αποτελούμενης από φωτοβολταϊκά για την κάλυψη των αναγκών εξηλεκτρισμού και αφαλάτωσης. Στην περίπτωση αυτή, η ανάλυση περιπτώσεων αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς η οποιαδήποτε γνώση σχετικά με την

ενσωμάτωση ΑΠΕ και των εμποδίων που παρουσιάστηκαν είναι σημαντική, για λόγους εξοικονόμησης χρόνου και βελτιστοποίησης αποτελέσματος.

Εάν εστιάσουμε επίσης την προσοχή μας στην περιοχή της Μεσογείου και στην τουριστική δραστηριότητα, θα μπορέσουμε να δούμε ότι ο κυρίαρχος τύπος τουριστικής ανάπτυξης διαφέρει από την τουριστική ανάπτυξη τη βασιζόμενη σε ιδιωτικές επιχειρήσεις (**Κύπρος ή Κανάριοι νήσοι**), έως αυτές που ακολουθούν συγκεκριμένη εθνική στρατηγική (**Σαρδηνία**). Ο κυρίαρχος αυτός τύπος συνδέεται με συγκεκριμένη διαδικασία ενσωμάτωσης ΑΠΕ. Έτσι για παράδειγμα, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στην περίπτωση που η τουριστική ανάπτυξη βασίζεται σε ιδιωτικές επιχειρήσεις, τα κίνητρα που δίδονται για την ανάπτυξη ΑΠΕ έχουν κυρίως θεσμικό χαρακτήρα (επιδότησεις, κλπ) (bottom-up approach), ενώ στην περίπτωση που η τουριστική ανάπτυξη αποτελεί κύριο μέλημα της εθνικής στρατηγικής, τα κίνητρα σχετίζονται κυρίως με την ύπαρξη τοπικών δεξιοτήτων η τοπικού πνεύματος καινοτομίας (top down approach). Οι δε επιδοτήσεις, κλπ, στην περίπτωση αυτή, είναι ευρωπαϊκού ή διεθνούς χαρακτήρα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι εφαρμογές ηλιακής ενέργειας (που είναι και το ζητούμενο αυτής της εργασίας), μπορούν να ακολουθήσουν διαφορετικούς δρόμους, ανάλογα με τις υπάρχουσες τουριστικές ανάγκες και επιλογή της τουριστικής πολιτικής.

Σε όλη αυτή τη διαδικασία εξεύρεσης της βέλτιστης προσέγγισης, η τοπική διακυβέρνηση θα πρέπει να είναι σταθερή στις θέσεις της, και όσο το δυνατόν πιο ανεξάρτητη από κεντρικά κατευθυνόμενες επιλογές. Για να το επιτύχει αυτό, θα πρέπει να ασκείται από πολίτες πλήρως ενημερωμένους σχετικά με τις δυνατότητες και τα προβλήματα των τεχνολογιών αυτών. Η εμπειρία έχει δείξει ότι η ωρίμανση της αποδοχής μιας νέας τεχνολογίας στο μυαλό των χρηστών είναι χρονοβόρα. Για το σκοπό αυτό, οποιαδήποτε τεχνολογία ΑΠΕ θα πρέπει να εγκαθίσταται κατά προτεραιότητα σε περιοχές όπου οι κάτοικοι είναι ήδη εξοικειωμένοι με τη συγκεκριμένη τεχνολογία. Η συνέργεια εθνικών πρωτοβουλιών και εργαλείων θα πρέπει επίσης να ενθαρρυνθεί σε μια προοπτική μακροπρόθεσμου ορίζοντα. Απαιτείται η υποστήριξη των ανεπτυγμένων κρατών προς τα αναπτυσσόμενα κράτη για την ολοκληρωμένη θεσμοθέτηση μέτρων και πολιτικών, καθώς και μια πολιτική επιλογής βέλτιστων τεχνολογιών ΑΠΕ για συγκεκριμένες ζώνες. Νέα εργαλεία χρηματοδότησης θα πρέπει να αναπτυχθούν, μέσα από τη συνέργεια εμπορικών συνεταιρισμών και χρηματοπιστωτικών ιδρυμάτων.

4. ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΗΣΙΑ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ

4.1 Εφαρμογή των συστημάτων ηλιακής ενέργειας στα νησιά της Μεσογείου

Μέχρι τώρα το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την εφαρμογή ΑΠΕ στα νησιά της Ελλάδας αφορούσε την εγκατάσταση ανεμογεννητριών και σε κάποιο βαθμό των φωτοβολταϊκών. Το αιολικό δυναμικό είναι αρκετά υψηλό και το κόστος των Α/Γ έχει μειωθεί. Ο δε ήλιος παρέχει μια σταθερή πηγή ενέργειας ιδίως το καλοκαίρι όπου παρουσιάζεται η ανάγκη για επιπρόσθετο ενεργειακό ανεφοδιασμό. Οι θερμικοί ηλιακοί συλλέκτες είχαν εφαρμοστεί σε ικανοποιητικό βαθμό στο παρελθόν αλλά τελευταία δεν αποτελούν ελκυστική επιλογή, λόγω κυρίως του γεγονότος ότι η ανομοιομορφία και το σχετικά μεγάλο ύψος των θερμοσιφωνικών συσκευών, που αποτελούν την πλειονότητα των ηλιακών θερμικών στην Ελλάδα, προκαλούν μια άσχημη εικόνα, η οποία επιδεινώνεται και με τα υπόλοιπα στοιχεία, όπως κεραίες TV, κλπ, στην οροφή των κτιρίων. Επιπλέον, η γεωθερμία είναι σημαντική ενεργειακή πηγή σε πολλά νησιά, αλλά δεν έχει ακόμη αξιοποιηθεί.

Στην προοπτική μιας εκτεταμένης χρήσης της ηλιακής ενέργειας για θέρμανση νερού, θέρμανση/ψύξη χώρων και ηλεκτρική ενέργεια, αυτή δεν πρέπει να είναι η μοναδική ενεργειακή παρέμβαση αλλά πρέπει να συνδυάζεται και με την χρήση θερμομονωτικών

υλικών, καθώς και ειδικών υαλοπινάκων, που μειώνουν δραστικά τις θερμικές απώλειες των κτιρίων τον χειμώνα και την κατανάλωση ενέργειας για κλιματισμό το καλοκαίρι. Πρέπει να σημειωθεί ακόμη πως μέχρι τώρα στη χώρα μας δεν είναι ορθολογικά σωστή ή χρήση των ΑΠΕ στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της χώρας επειδή ο ηλεκτρισμός από Α/Γ, φβ και άλλες ΑΠΕ (εγκατεστημένη ισχύς περί τα 1100 MW), χρησιμοποιείται για τη θέρμανση νερού στους οικιακούς ηλεκτρικούς θερμοσίφωνες αντί να γίνεται κυρίαρχη χρήση ηλιακών συλλεκτών (όπως συμβαίνει στην Κύπρο), που δεν είναι μόνο περιβαλλοντικά φιλικόι αλλά είναι και πιο οικονομικοί.

Στα νησιά της Ελλάδας, η αντιμετώπιση των αναγκών αιχμών που παρουσιάζονται κυρίως το καλοκαίρι βασίζεται στις Α/Γ, έχουν ωστόσο διατυπωθεί επιφυλάξεις για την αισθητική τους ένταξη στο τοπίο και στην συμβατότητά τους με την τοπική αρχιτεκτονική των νησιών. Από την άλλη, η εφαρμογή των ηλιακών θερμικών συλλεκτών και των φωτοβολταϊκών έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς τα περισσότερα νησιά δεν είναι διασυνδεδεμένα με το εθνικό δίκτυο, και δεδομένου ότι η ηλιακή ενέργεια μπορεί να καλύψει σημαντικό ποσοστό ενεργειακών αναγκών των ξενοδοχειακών μονάδων (ζεστό νερό και θέρμανση χώρων τον χειμώνα και κλιματισμό το καλοκαίρι). Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η χρήση ειδικών συγκεντρωτικών διατάξεων με απορροφητές που μπορεί να είναι θερμικοί συλλέκτες, φωτοβολταϊκά ή υβριδικές φβ/θ συσκευές, για την παραγωγή θερμότητας (επίτευξη υψηλότερων θερμοκρασιών), ηλεκτρισμού (γενική χρήση του), καθώς επίσης και για τα δύο σε συνδυασμό (θέρμανση-ψύξη και ηλεκτρισμός). Τέτοιες διατάξεις μπορούν να συνεισφέρουν και σε άλλες εφαρμογές εκτός από τα κτίρια και τις τουριστικές μονάδες, όπως στον αγροτικό τομέα (θερμοκήπια, ξήρανση προϊόντων, άντληση νερού, καθαρισμός και απολύμανση νερού) και ιδίως για την αφαλάτωση νερού, καθώς το νερό αρχίζει να είναι ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα των νησιών. Επιπλέον αυτών είναι ενδιαφέρουσα και η αξιοποίηση των αιολικών μηχανών, σε συνδυασμό με τις συσκευές ηλιακής ενέργειας, όπου το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην χρήση των Α/Γ μικρής ισχύος στις οροφές των κτιρίων, στους δρόμους, κλπ, καθώς και στον αγροτικό τομέα για άντληση νερού, στα θερμοκήπια και άλλες εφαρμογές, σε συνδυασμό και με τη χρήση φβ.

Ωστόσο το σημερινό θεσμικό πλαίσιο στην Ελλάδα δεν διευκολύνει την εγκατάσταση πολλών νέων θερμικών ηλιακών συλλεκτών. Σε ότι αφορά τα φωτοβολταϊκά, η παρούσα κατάσταση δεν είναι ενθαρρυντική με τα περίπου 10 MW εγκατεστημένης ισχύος συνολικά σε όλη την χώρα. Το υψηλό κόστος τους απαιτεί μεγάλη επιδότηση από την πολιτεία, η οποία όμως περιορίζεται σε επιχειρηματικές επενδύσεις. Την ίδια στιγμή οι νομοθετικές και οικονομικές διευκολύνσεις για οικιακές εφαρμογές είναι περιορισμένες.

4.2 Συμβολή του εργαστηρίου ηλιακής ενέργειας του Παν/μίου Πατρών

Στο εργαστήριο ηλιακής ενέργειας του Παν/μιο Πατρών έχουν αναπτυχθεί πολλά συστήματα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας με σκοπό την μείωση του κόστους, της αποδοτικής λειτουργίας και της αισθητικής ένταξης. Η θέρμανση νερού με ολοκληρωμένες συσκευές συλλέκτη-αποθήκης (συσκευές ICS), είναι μια πιο οικονομική και αισθητική επιλογή σε σχέση με τους συνήθεις θερμοσιφωνικούς συλλέκτες. Οι συσκευές αυτές [9] είναι πιο απλές και έχουν το πλεονέκτημα να μπορούν να είναι αισθητικά προσαρμοσμένες στην αρχιτεκτονική των κτιρίων, ενώ λόγω του μικρότερου ύψους σε σχέση με τις θερμοσιφωνικές συσκευές είναι περισσότερο κατάλληλες για τα νησιά των Κυκλάδων και μπορούν έτσι να αποτελέσουν εναλλακτική λύση για μια ευρεία εφαρμογή τους τα επόμενα χρόνια.

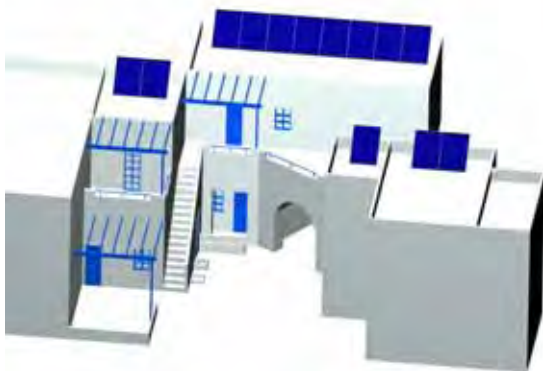
Σε μια εκτεταμένη χρήση της ηλιακής ενέργειας και για την αποφυγή της μονοτονίας του μαύρου χρώματος προτείνονται οι ηλιακοί συλλέκτες με απορροφητή διαφορετικού του μαύρου χρώματος (μπλε, κεραμιδί, πράσινο, κλπ). Οι συλλέκτες αυτοί αν και παρουσιάζουν λίγο μικρότερη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας (περίπου 20%), η χρήση τους

προσδίδει ενδιαφέρουσα χρωματική αίσθηση στις εξωτερικές επιφάνειες των κτιρίων [10]. Ιδιαίτερα στα κτίρια των Κυλαδίτικων νησιών η χρήση μπλέ συλλεκτών είναι πολύ πιο αισθητικά σωστή και μπορεί να συμβάλλει στην ευρεία διάδοση των συστημάτων αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας για ζεστό νερό, θέρμανση και κλιματισμό.

Στις τουριστικές μονάδες των περισσότερων ελληνικών νησιών – αλλά και πολλών άλλων νησιών της Μεσογείου – οι οροφές τους είναι οριζόντιες και έχει προταθεί η τοποθέτηση επίπεδων κατόπτρων μεταξύ των σειρών των συλλεκτών για την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας στα διάκενα μεταξύ των σειρών των συλλεκτών [10]. Οι εγκαταστάσεις αυτές μπορούν να παρέχουν ακόμη και διπλάσια ενέργεια το καλοκαίρι και δίνουν την δυνατότητα πιο οικονομικής ηλιακής θέρμανσης ρευστών σε υψηλότερες θερμοκρασίες και άρα πιο αποτελεσματικής λειτουργίας των διατάξεων κλιματισμού. Ενδιαφέρουσα είναι ακόμη και η χρήση ενισχυτικών κατόπτρων σε διατάξεις ακάλυπτων ηλιακών συλλεκτών για εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών ρευστών (κολυμβητικές πισίνες, προθέρμανση νερού, κλπ).

Τέλος, όσον αφορά την εφαρμογή των φωτοβολταϊκών, εκτός από την εφαρμογή των συνήθων διατάξεων φβ πλαισίων στις οριζόντιες ή επικλινείς οροφές των κτιρίων (σπίτια, ξενοδοχειακές μονάδες, κλπ) προτείνονται και οι νέες ηλιακές διατάξεις των υβριδικών φωτοβολταϊκών/θερμικών (φβ/θ) συσκευών, που επιτυγχάνουν μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό και θερμότητα [11]. Από τις δοκιμές των πειραματικών μοντέλων στο εργαστήριο ηλιακής ενέργειας του Παν/μίου Πατρών έχει προκύψει ότι η θερμική απόδοση μπορεί να φθάσει και πάνω από 50%.

Οι υβριδικές φβ/θ συσκευές μπορεί να έχουν πολύ καλή ενσωμάτωση στα Κυκλαδίτικα νησιά, όπως και σε άλλα νησιά της Μεσογείου που έχουν λευκές εξωτερικές επιφάνειες και μπλέ πόρτες και παράθυρα. Επίσης, για την βελτίωση της αποδοτικότητας των φβ και των υβριδικών φβ/θ συστημάτων προτείνεται η τοποθέτηση διάχυτων ανακλαστήρων με τους οποίους αυξάνεται η αποδιδόμενη ενέργεια. Μια πιο ορθολογικά αποδοτική χρήση των υβριδικών φβ/θ συλλεκτών είναι να παρέχουν προθέρμανση του ρευστού απολαβής της θερμότητας και να συνδυάζονται με μια διάταξη αποδοτικών θερμικών συλλεκτών για την κύρια θέρμανση. Στην περίπτωση αυτή έχουμε και πολύ καλή απόδοση των φβ πλαισίων λόγω της σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας τους.



Σχ. 1 Χρωματιστοί ηλιακοί συλλέκτες



Σχ. 2 Υβριδικά φβ/θ συστήματα και μικρές Α/Γ

Στα Σχήματα 1 και 2 παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις αισθητικής ενσωμάτωσης ηλιακών συλλεκτών με χρωματιστό (μπλε) απορροφητή (Σχ 1) και με υβριδικό φβ/θ σύστημα πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Σχ. 2) σε κυκλαδίτικα κτίρια. Επίσης, στο Σχ. 2 δείχνεται ένα παράδειγμα-πρόταση για την εγκατάσταση μικρών Α/Γ σε συνδυασμό με τα υβριδικά φβ/θ συστήματα, που παράγουν ηλεκτρισμό και θερμότητα.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα νησιά της Μεσογείου είναι πλούσια σε φυσικούς πόρους, πολιτιστική κληρονομιά και πολιτικό ενδιαφέρον και προσελκύουν πλήθος επισκεπτών, αλλά ταυτόχρονα υποφέρουν από τις συνέπειες που επιφέρει ο μαζικός τουρισμός στα εδάφη τους. Οι αρνητικές αυτές, συνέπειες μαζί με τις κλιματικές αλλαγές, αποτελούν απειλή για την ύπαρξή τους. Από την άλλη πλευρά, τα νησιά παρουσιάζουν κοινά χαρακτηριστικά και ευκαιρίες τουριστικής και οικονομικής ανάπτυξης. Σε αυτή την προοπτική, οι τεχνολογίες ΑΠΕ (και κυρίως τα συστήματα ηλιακής ενέργειας) μπορούν να χρησιμεύσουν ως πιλοτικά έργα δημιουργίας τουριστικών υποδομών με βιοκλιματικά χαρακτηριστικά. Προς την κατεύθυνση αυτή προσανατολίζονται οι ερευνητικές προσπάθειες του εργαστηρίου ηλιακής ενέργειας του Παν/μίου Πατρών, μέσω της ανάπτυξης καινοτόμων συστημάτων ηλιακής ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Gee Y. – Makens, C.J.- Choy, J.L.D., World Travel and Tourism pages 35-37 (1992)
2. Makens, G. – Choy, C.J. Organisation des Voyages International) pages. 35-37 (1992)
3. Ben Jannet Allal, H. “Cost Effective Renewable Energy for Rural Areas in the Mediterranean Region”. In the proceedings of the 4th European PV-Hybrid and Mini-Grid Conference, May 2008, Athens, Greece (2008)
4. Dascalaki, Balaras, “Xenios – a methodology for assessing refurbishment scenarios and the potential of application of RES and RUE in hotels”, Energy and Buildings 36 1091 – 1105 (2004)
5. Burns, P. and Montalvillo Sancho, M. “Local perceptions of tourism planning: the case of Cuellar, Spain”, Tourism Management 24 331–339 (2003).
6. Piebalgs, A., Speech in the European Sustainable Energy Week, Brussels (2008).
7. Roper T. “Small Island States and the Clean Development Mechanism (CDM)” (2005).
8. Tsioliaridou E., Bakos G., Stadler M. “A new energy planning methodology for the penetration of RES in electricity sector—application for the island of Crete”, Energy Policy 34 (2006) 3757–3764 (2006).
9. Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis and Th. Nousia. “CPC type integrated collector storage systems”. Solar Energy 72, pp. 327-350 (2002).
10. Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis and Th. Nousia, “Solar Collectors with Colored Absorbers”, Solar Energy 68, No 4, pp 343–356 (2000).
11. Y. Tripanagnostopoulos, Th. Nousia, M. Souliotis and P. Yianoulis. “Hybrid Photovoltaic/ Thermal solar systems”. Solar Energy 72, pp. 217-234 (2002).

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΕΦΙΚΤΟΥ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΩΝ ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΟΙΚΙΑΚΟ ΤΟΜΕΑ

Γ. Μαρτινόπουλος, Γ. Τσιλιγκιρίδης

Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών, Τμ. Μηχ. Μηχανικών Α.Π.Θ.

Τ.Κ. 54 124, Τ.Θ. 487, Θεσσαλονίκη, e-mail: martin@meng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Ελλάδα είναι μια από τις πρωτοπόρες χώρες στη χρήση ηλιακών θερμοσιφωνικών συστημάτων παγκοσμίως. Στην εργασία αυτή επιχειρείται να εκτιμηθεί το μέγιστο τεχνικά δυνατό δυναμικό ηλιακών θερμικών συστημάτων στην Ελλάδα. Για την πραγματοποίηση μιας όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικής εκτίμησης λαμβάνονται υπόψη μια σειρά παραγόντων (κτιριακών, δημογραφικών, κλιματικών) καθώς και κατάλληλα διαστασιολογημένα για τα νοικοκυριά ηλιακά συστήματα. Με τον τρόπο αυτό εκτιμάται ο μέγιστος τεχνικά αριθμός ηλιακών συστημάτων ανά νομό και στη συνέχεια με βάση δημογραφικά και κλιματικά δεδομένα υπολογίζεται η εξοικονομούμενη ενέργεια καθώς και η μείωση των εκπομπών CO₂ που θα μπορούσε να επιφέρει η χρήση των ηλιακών θερμικών συστημάτων στη χώρα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ελλάδα αποτελεί μια από τις πρωτοπόρες χώρες στη χρήση ηλιακών θερμοσιφωνικών συστημάτων παγκοσμίως. Για μεγάλο διάστημα κατείχε την πρώτη θέση στην κατά κεφαλή εγκατεστημένη επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών στην Ευρωπαϊκή Ένωση και σχετικά πρόσφατα ξεπεράστηκε από την Κύπρο και την Αυστρία [1],[2]. Στις μέρες μας, τα ηλιακά θερμοσιφωνικά συστήματα χρησιμοποιούνται από περισσότερες από 800,000 οικογένειες, σχεδόν το 25% του συνόλου ενώ η Ελληνική αγορά εκτιμάται σε 240,000 m² για το 2006 [1].

Στα τέλη του 2007, η συνολική εγκατεστημένη επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών στην Ελλάδα ανέρχονταν σε 3.57 εκατ. m². Το 99% της επιφάνειας εγκατεστημένων ηλιακών συλλεκτών αφορά συστήματα παραγωγής ζεστού νερού κλειστό κύκλωμα [2], [3]. Κατά τη περίοδο 1975 – 1984 είχαμε τις πρώτες μαζικές πωλήσεις ηλιακών συλλεκτών, λόγω της πετρελαϊκής κρίσης καθώς και της υιοθέτησης από την ελληνική κυβέρνηση φορολογικών απαλλαγών για τους χρήστες οπότε η εγκατεστημένη επιφάνεια αυξανόταν σταθερά. Κατά την αμέσως επόμενη περίοδο 1984 – 1986, οι πωλήσεις κυμαίνονταν στα 220.000 m² ετησίως ως αποτέλεσμα μεγάλης διαφημιστικής καμπάνιας με χορηγό το ελληνικό κράτος, αλλά και εξαιτίας του φόβου ότι ο φόρος προστιθέμενης αξίας (ΦΠΑ), που για πρώτη φορά θα εφαρμόζονταν την 1η Ιανουαρίου 1987 θα αύξανε τις τιμές των συστημάτων. Την περίοδο αυτή όλα τα συστήματα κατασκευάζονταν από εγχώριες βιομηχανίες και ένα πολύ μικρό ποσοστό εισάγονταν, κυρίως από το Ισραήλ. Από το 1987 έως το 1993 οι πωλήσεις παρέμειναν σταθερές και η εγκατεστημένη επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών αυξάνεται με σταθερό ρυθμό. Μία μεγάλης κλίμακας διαφημιστική καμπάνια με χορηγούς την ΕΒΗΕ και τον Οργανισμό για την Προώθηση των Ελληνικών Προϊόντων βελτίωσε την εικόνα της αγοράς. Το κίνητρο της έκπτωσης φόρου διατηρήθηκε μέχρι το 1991 οπότε και καταργήθηκε. Η συνεχώς αυξανόμενη τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος, η επιβολή του ΦΠΑ και οι πολλές υποτιμήσεις του εθνικού νομίσματος κατά τη περίοδο αυτή μπόρεσαν να προστατεύσουν την αγορά από μία πτωτική πορεία. Η οικονομική κρίση που επήλθε στις αρχές του '90, οι

κυβερνητικές παρεμβάσεις για τη μείωση της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος, η ελλιπής προώθηση των ηλιακών συστημάτων από τη βιομηχανία και η κατάργηση των οικονομικών κινήτρων από την κυβέρνηση είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση των πωλήσεων προς το τέλος αυτής της περιόδου. Από το 1994 έως και σήμερα η αγορά ηλιακών συστημάτων είναι πρακτικά σταθερή [2], [3], [4].

Μετά την συνδιάσκεψη στο Ρίο και την υπογραφή της συμφωνίας σχετικά με την κλιματική αλλαγή, η Ελληνική κυβέρνηση στην προσπάθεια της να συμμετάσχει στην μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, εφάρμοσε το πρώτο πρόγραμμα για την κλιματική αλλαγή (περιορισμό του CO₂ και των άλλων θερμοκηπικών αερίων). Το 2002 ολοκληρώθηκε το δεύτερο πρόγραμμα, το οποίο τέθηκε σε εφαρμογή το 2003. Σε αυτό ορίζονται τα μέτρα και η πολιτική που πρέπει να ακολουθηθεί για την επίτευξη των στόχων που έθεσε η χώρα μας στο Κυότο.

Ένα από τα μέτρα τα οποία ερευνήθηκαν ήταν η αύξηση της χρήσης ηλιακών θερμικών συστημάτων στον οικιακό τομέα. Σύμφωνα με αυτή τουλάχιστον το 35% των αναγκών σε ζεστό νερό χρήσης θα έπρεπε να καλυφτεί από ηλιακά συστήματα μέχρι το 2010, δηλαδή, περίπου 1,37 GWh_{el} [5].

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση Ηλιακών Θερμικών Βιομηχανιών το τεχνικό δυναμικό της χώρας υπολογίζεται σε περίπου 28.500.000 m² [2]. Η εκτίμηση αυτή θεωρεί τεχνικά δυνατή την εγκατάσταση 2,7 m² συλλεκτικής επιφάνειας για κάθε άτομο στην Ελλάδα, χωρίς να λαμβάνει υπόψη φυσικούς παράγοντες που περιορίζουν την δυνατότητα εγκατάστασης ηλιακών συστημάτων.

Τέτοιοι είναι παράγοντες που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του κτιριακού δυναμικού του οικιακού τομέα όπως η διαθέσιμη επιφάνεια στην οροφή των κτιρίων ή ο αριθμός ορόφων που διαθέτουν, η γεωγραφική κατανομή τους στη χώρα καθώς και δημογραφικοί παράγοντες όπως ο αριθμός νοικοκυριών, το μέγεθος των νοικοκυριών και η γεωγραφική κατανομή τους. Τέλος σημαντική είναι και η επίδραση παραγόντων όπως οι κλιματικές συνθήκες καθώς και η υπάρχουσα τεχνολογία στον τομέα των ηλιακών θερμοσιφωνικών συστημάτων.

Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία λήφθηκε υπόψη το σύνολο των προαναφερθέντων παραγόντων με σκοπό την όσο το δυνατόν ρεαλιστικότερη εκτίμηση του μέγιστου τεχνικά δυναμικού των ηλιακών συστημάτων στη χώρα.

Μετά από την εκτίμηση του μέγιστου τεχνικά δυναμικού των ηλιακών συστημάτων και την γεωγραφική κατανομή του, προσδιορίζεται η ενέργεια που θα μπορούσε να εξοικονομηθεί καθώς και η μείωση των εκπομπών CO₂ από τη χρήση των ηλιακών θερμοσιφωνικών συστημάτων.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΦΙΚΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Όπως προαναφέρθηκε η Ευρωπαϊκή Ένωση Ηλιακών Θερμικών Βιομηχανιών εκτιμά το τεχνικό δυναμικό της χώρας υπολογίζεται σε περίπου 28,500,000 m². Θεωρεί τεχνικά δυνατή δηλαδή, την εγκατάσταση 2.7 m² συλλεκτικής επιφάνειας για κάθε άτομο στην Ελλάδα.

Στη θεώρηση αυτή υπάρχουν δύο ενστάσεις, αφενός τα ηλιακά συστήματα εγκαθίστανται ανά νοικοκυριό και όχι ανά άτομο. Επομένως το θεωρητικά μέγιστο δυναμικό ηλιακών θερμοσιφωνικών συστημάτων μπορεί να υπολογιστεί αντιστοιχώντας ένα σύστημα σε κάθε ελληνικό νοικοκυριό, δηλαδή 3.7 εκατ. συστήματα. Αφετέρου, το μέγεθος των 2,7 m² ηλιακών συλλεκτών ανά άτομο δεν ανταποκρίνεται στην ελληνική πραγματικότητα.

Αντιστοιχίζοντας κατάλληλα διαστασιολογημένο σύστημα στο μέγεθος κάθε νοικοκυριού μπορεί να προκύψει η θεωρητικά μέγιστη επιφάνεια. Η θεώρηση αυτή, ότι κάθε νοικοκυριό μπορεί να έχει ηλιακό θερμοσιφωνικό σύστημα δεν λαμβάνει όμως υπόψη το γεγονός ότι η εγκατάσταση τους περιορίζεται πρωτίστως από τη διαθέσιμη επιφάνεια στην οροφή των κτιρίων και δευτερευόντως από τον αριθμό των ορόφων που διαθέτει το κτίριο. Πρακτικά τα ηλιακά μπορούν να καλύψουν τους ενοίκους των μονοόροφων και διόροφων κτιρίων και μόνο τους ενοίκους στους τελευταίους δύο ορόφους των κτιρίων με περισσότερους ορόφους.

Από το μέγεθος του νοικοκυριού καθώς και από τις κλιματικές συνθήκες εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό το μέγεθος της απαιτούμενης συλλεκτικής επιφάνειας του ηλιακού συστήματος, καθώς και η ενέργεια που μπορεί να εξοικονομηθεί. Τα νοικοκυριά που επιλέχθηκαν να εξεταστούν είναι αυτά των δύο, τριών, τεσσάρων και πέντε ατόμων, τα οποία σύμφωνα με την απογραφή του 2001 αποτελούν την συντριπτική πλειοψηφία του συνόλου [6]. Σημαντική είναι και η επίδραση της διαθέσιμης τεχνολογίας. Τα τυπικά συστήματα για την ελληνική πραγματικότητα αποτελούνται από τον ηλιακό συλλέκτη, δεξαμενή και βάση. Για να καλυφθούν οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες, αναλύονται τέσσερα διαφορετικά ηλιακά συστήματα με συλλέκτες: 1) σωλήνων χαλκού με περύγια χαλκού (Cu-Cu) υψηλής απόδοσης, 2) σωλήνων χαλκού με περύγια χαλκού (Cu-Cu) χαμηλής απόδοσης 3) με περύγια αλουμινίου (Cu-Al) και 4) με περύγια χάλυβα (Cu-St) στα κατάλληλα μεγέθη για κάθε νοικοκυριό, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Αντιστοιχία Ηλιακών Συστημάτων - Νοικοκυριών				
Μέγεθος Νοικοκυριού	Μέγεθος Συστήματος [m ² / l]			
Άτομα	2m ² \180l	4m ² \200l	4m ² \240l	6m ² \240l
2	x			
3		x		
4			x	
5				x

Τα μεγέθη της δεξαμενής είναι 180lt, 200lt και 240lt. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων αυτών ποικίλλουν ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιούν. Ως τιμές των απαραίτητων χαρακτηριστικών για τους υπολογισμούς (δηλαδή των $F_R U_L$ και $F_R(\tau\alpha)_n$) χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από αντιπροσωπευτικούς συλλέκτες (Πίνακας 2) [7].

Πίνακας 2: Τιμές Τεχνικών χαρακτηριστικών αναλυόμενων συστημάτων				
Τεχνολογία Συλλέκτη:	Cu-Cu Low	Cu-Cu High	Cu-Al	Cu -St
$F_R U_L$	6.40	4.80	5.80	7.50
$F_R(\tau\alpha)_n$	0.76	0.79	0.76	0.68

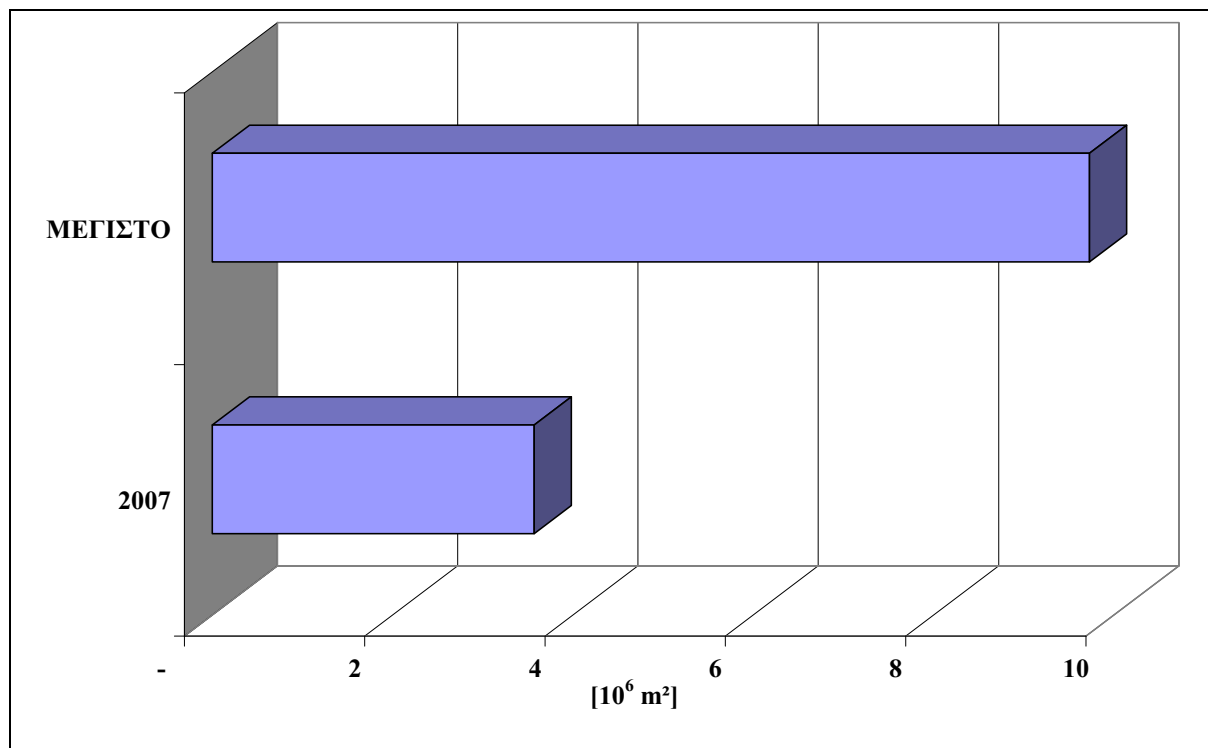
Για τους παραπάνω λόγους χρησιμοποιώντας στοιχεία από την τελευταία απογραφή της ΕΣΥΕ (2001) προσδιορίζεται ο αριθμός των κτιρίων και κατ' επέκταση των νοικοκυριών που μπορούν να εγκαταστήσουν ηλιακό θερμοσιφωνικό σύστημα ανά νομό. Λόγω των διαφορετικών κλιματικών και δημογραφικών δεδομένων, οι εκτιμήσεις γίνονται για κάθε νομό ξεχωριστά αλλά για οικονομία χώρου, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 ανά γεωγραφικό διαμέρισμα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: Συνολικός αριθμός κτιρίων για όλη τη Χώρα										
ΠΕΡΙΟΧΗ	Αριθμός Κτιρίων	Κτίρια δύο ορόφων	Ποσοστό	Νοικοκυριά					Υπόλοιπο	Υπόλοιπο [%]
				Σύνολο	2 όροφοι	3 όροφοι	4 όροφοι	5 όροφοι		
Θράκη	159,191	149,999	94%	119,894	36,858	24,985	22,990	8,118	26,943	22.5
Μακεδονία	830,938	731,464	88%	806,046	229,508	170,518	175,319	56,488	174,213	21.6
Θεσσαλία	349,655	327,872	94%	238,917	68,939	49,102	48,170	19,094	53,612	22.4
Ήπειρος	171,112	160,207	94%	116,540	35,007	22,142	21,124	8,668	29,599	25.4
Ιόνια Νησιά	128,876	119,634	93%	72,196	20,900	14,755	13,717	5,245	17,579	24.3
Αττική	754,728	531,019	70%	1,323,862	355,155	252,720	255,148	127,823	333,016	25.1
Στερεά Ελλάδα	410,476	382,190	93%	262,186	74,514	52,464	52,330	22,095	60,783	23.2
Πελοπόννησος	555,272	518,211	93%	357,296	97,444	70,193	69,098	31,091	89,470	25.1
Νησιά Αιγαίου	343,454	322,368	94%	175,800	51,597	35,966	32,843	11,209	44,185	25.1
Κρήτη	287,268	261,145	91%	201,644	57,102	39,523	39,613	14,332	51,074	25.4
ΣΥΝΟΛΟ	3,990,970	3,504,109	88%	3,674,381	1,016,061	706,908	691,391	280,300	979,721	26.6
										9,729,907

Τεχνικό Δυναμικό
[m²]

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω περιοριστικούς παράγοντες προκύπτει το συνολικά διαθέσιμο δυναμικό, το οποίο αντιστοιχεί στο 73% των συνολικών νοικοκυριών ή σε περίπου 9,73 εκατ. m^2 ηλιακών συλλεκτών (Εικόνα 1). Θεωρώντας ότι κάθε τετραγωνικό μέτρο ηλιακού συλλέκτη αντιστοιχεί σε εγκατεστημένη ισχύ $0,8 \text{ kW}_{\text{th}}$ [1] προκύπτει ότι το μέγιστο τεχνικά δυναμικό του οικιακού τομέα αντιστοιχεί σε εγκατεστημένη ισχύ $6.800 \text{ MW}_{\text{th}}$.



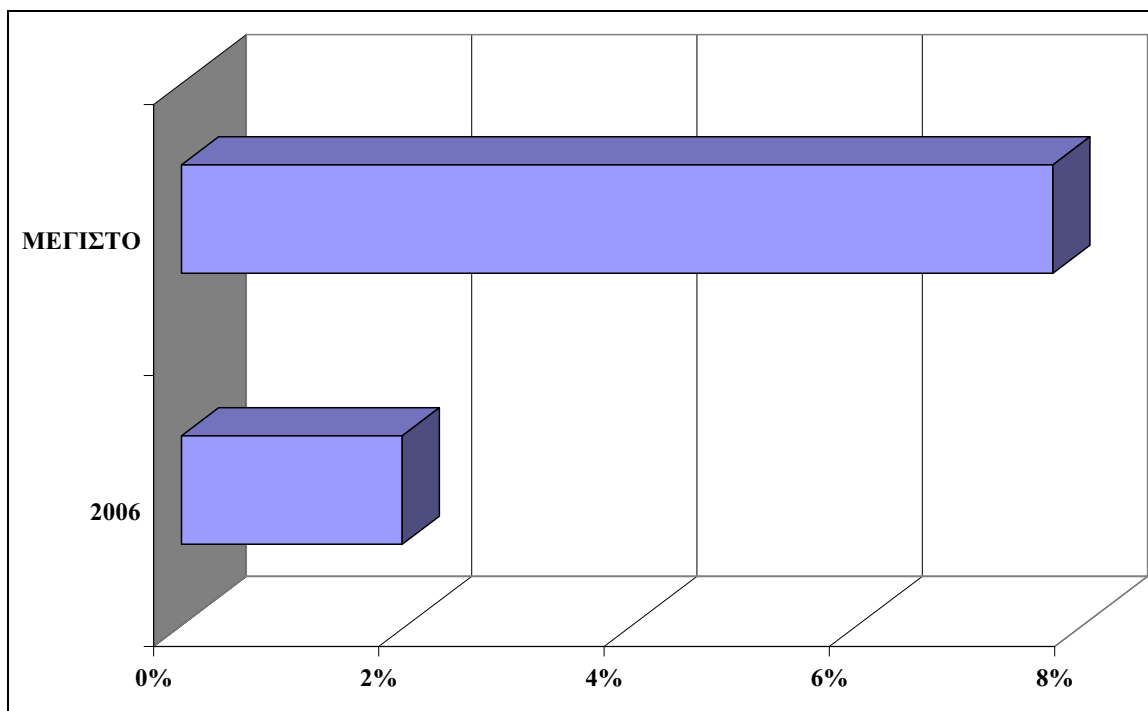
Εικόνα 1: Εγκατεστημένη επιφάνεια ηλιακών θερμοσιφωνικών συστημάτων στον οικιακό τομέα και μέγιστο τεχνικά δυναμικό [1]

Η χρήση των συστημάτων αυτών εξοικονομεί κατά κύριο λόγο ηλεκτρική ενέργεια η οποία θα κάλυπτε τη θέρμανση του νερού, καθώς η χρήση συστημάτων τριπλής ενέργειας αφενός άρχισε μετά το 1990 και αφετέρου καλύπτει θερμικό φορτίο κατά την περίοδο των ψυχρών μηνών που η συμβολή των ηλιακών είναι ούτως ή άλλως μικρή λόγω της χαμηλής έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Για τον υπολογισμό των ενεργειακών οφελών από τα οποία προκύπτουν στη συνέχεια τα περιβαλλοντικά οφέλη χρησιμοποιείται η μέθοδος των καμπύλων f [8],[9],[10], [11]. Οι υπολογισμοί γίνονται για κάθε μήνα από όπου στη συνέχεια υπολογίζεται η ετήσια κάλυψη.

Αρχικά υπολογίζεται το συνολικό μηνιαίο και ετήσιο θερμικό φορτίο που πρέπει να καλυφθεί ανά νομό και οικογένεια (μέγεθος νοικοκυριού). Για τον υπολογισμό, θεωρείται ότι η θερμοκρασία του ζεστού νερού που απαιτείται είναι 50°C , ενώ η απαιτούμενη ποσότητα ανά άτομο 50 lt [12]. Από το απαιτούμενο θερμικό φορτίο ανά οικογένεια και ανά νομό και χρησιμοποιώντας τα υπόλοιπα απαραίτητα μετεωρολογικά δεδομένα [13] και τεχνικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση συλλεκτών, προκύπτει η μηνιαία κάλυψη για κάθε περιοχή και τελικώς το τμήμα του θερμικού φορτίου που καλύπτει το ηλιακό σύστημα.

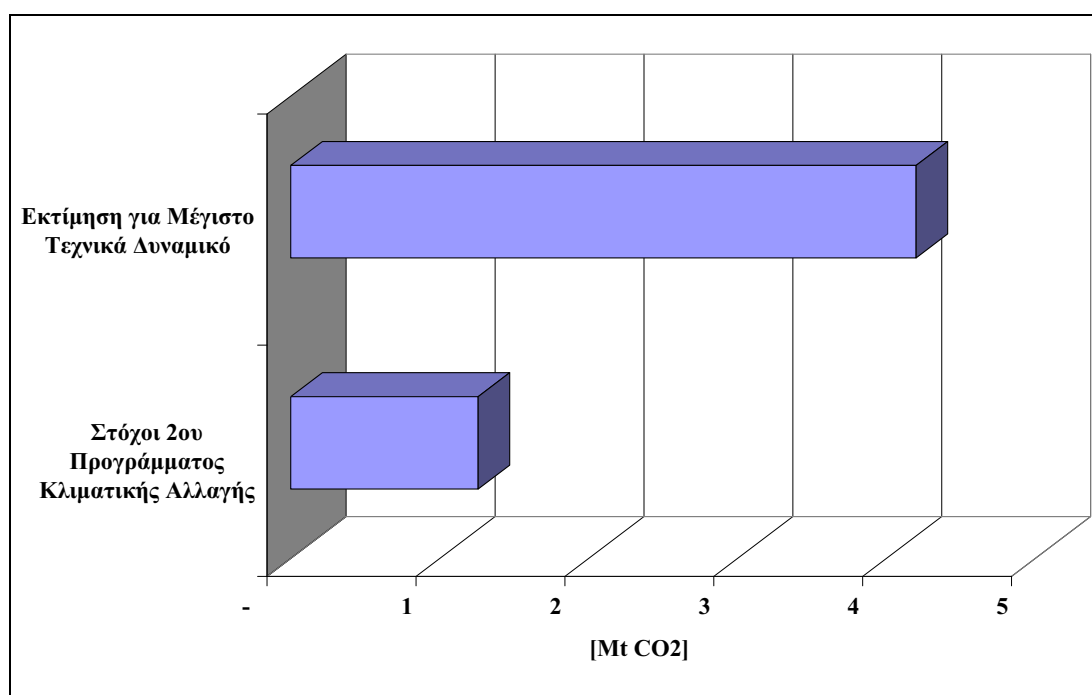
Η κατανάλωση ενέργειας του οικιακού τομέα έφτασε τα 5.491 kTIP το 2006, από αυτά το $1,96 \%$ καλύφθηκε από τη χρήση ηλιακών συστημάτων [14]. Στην περίπτωση του τεχνικά μέγιστου δυναμικού, τα ηλιακά θερμοσιφωνικά συστήματα θα εξοικονομούσαν $424,86 \text{ kTIP}$ ενέργειας ποσοστό $7,8 \%$ της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας του οικιακού τομέα για το

2006 ή 2% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας της χώρας για το ίδιο έτος (21.024 kTIP) (Εικόνα 2).



Εικόνα 2: Εξοικονόμηση ενέργειας στον οικιακό τομέα από τη χρήση ηλιακών θερμοσιφωνικών συστημάτων σήμερα και σύμφωνα με το μέγιστο τεχνικά δυναμικό

Θεωρώντας ότι κάθε παραγόμενη kWh_{el} από το διασυνδεδεμένο σύστημα απελευθερώνει 850 gr CO_2 [15] προκύπτει ότι το συνολικό κέρδος στις εκπομπές CO_2 θα έφτανε τους 4.199 kt CO_2 ή δηλαδή περίπου 4% των συνολικών εκπομπών CO_2 της χώρας για το 2003, τελευταία χρονιά για την οποία υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία [16], [17].



Εικόνα 3: Περιβαλλοντικό όφελος από την χρήση ηλιακών θερμοσιφωνικών συστημάτων

Θα υπερκάλυπτε δηλαδή του στόχους που τέθηκαν από το 2^ο Πρόγραμμα για την Κλιματική Αλλαγή για το 2010 (Εικόνα 3), χωρίς να ληφθούν υπόψη τα κέρδη από την εισαγωγή των ηλιακών θερμοσιφωνικών συστημάτων στον ξενοδοχειακό και βιομηχανικό κλάδο.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως προκύπτει η ελληνική αγορά έχει περιθώριο τουλάχιστον 6 εκατ. m² νέων ηλιακών συστημάτων στον οικιακό τομέα. Για την περίοδο 2005-2010, ο ετήσιος ρυθμός αύξησης εκτιμάται μεταξύ 7 και 9,5%, [2] το οποίο θα οδηγήσει σε μια συνολικά εγκατεστημένη επιφάνεια 5.130.0000 - 6.320.000 m² ηλιακών συλλεκτών.

Τα οφέλη από την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διείσδυση των ηλιακών συστημάτων στον οικιακό τομέα, τόσο ενεργειακά όσο και περιβαλλοντικά κάνουν αναγκαία την προσπάθεια για επίτευξη αυτού του στόχου.

Δυστυχώς, για την επίτευξη μεγαλύτερου ρυθμού αύξησης και επομένως του μέγιστου τεχνικά εφικτού δυναμικού των 9,73 εκατ. m², χρειάζονται κυβερνητικές πολιτικές που προωθούν ενεργά τα ηλιακά συστήματα μέσω κινήτρων. Συγκεκριμένες ενέργειες που πρέπει να γίνουν συμπεριλαμβάνουν την:

- Υποστήριξη της ανάπτυξης της υποδομής της ηλιακής βιομηχανίας μέσω προγραμμάτων για σχεδιαστές και εγκαταστάτες, της ανάπτυξης τυποποίησης και κωδικών λειτουργίας και της διεύρυνσης των διαδικασιών για την εγγυημένη ηλιακή απόδοση.
- Αυστηρή τήρηση πολεοδομικών κανόνων ρύθμισης της ενεργειακής κατανάλωσης σε νέα κτίρια - αυτό θα παρακινήσει την αγορά για ηλιακά συστήματα οικιακής χρήσης μαζί με άλλα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας.
- Επιβολή εγκατάστασης ηλιακών συστημάτων σε όλες τις νέες ή ανακαινιζόμενες κατασκευές στα πρότυπα της Βαρκελώνης.
- Συνεχή και συστηματική ενημέρωση του κοινού για τα οφέλη από τη χρήση ηλιακής ενέργειας.
- Μείωση του ΦΠΑ για την αγορά ηλιακών θερμοσιφωνικών συστημάτων στα ίδια επίπεδα με των μηνιαίων τιμολογίων ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. European Solar Thermal Industry Federation, "Solar Thermal Markets in Europe 2007", June 2008.
2. European Solar Thermal Industry Federation, "Sun in Action II – Vol.2", April 2003.
3. EBHE, "The Greek Solar Market", Athens, 2003.
4. IOBE, "Solar Systems: The domestic market of solar systems", Athens 1985.
5. Τεχνική Έκθεση, "Δεύτερο Ελληνικό Πρόγραμμα Δράσης για την Κλιματική Μεταβολή 2000-2010", Αθήνα, 2003.
6. Εθνική Στατιστική Υπηρεσία, "Στατιστικές Επετηρίδες 1971-2001".
7. Β. Α. Σωτηρόπουλος, "Τελική Έκθεση Έργου: Ανάπτυξη νέου τύπου συλλέκτη για την διεύρυνση των εφαρμογών της ηλιακής ενέργειας" ΠΕΝΕΔ 1991, Θεσσαλονίκη 1997.
8. J. Duffie, W. Beckman, "Solar Engineering of Thermal Processes", Wiley Publication, 1991.
9. B. V. Minnerly, S. A. Klein, W. A. Beckman, "A rating procedure for solar domestic hot water systems based on ASHRAE-95 test results", Solar Energy Vol. 47, No. 6, pp. 405-411, 1991.
10. P. T. Tsilingiris, "Solar water-heating design-A new simplified dynamic approach", Solar Energy Vol. 57, No. 1, pp. 19-28, 1996.

11. G. Tsilingiridis, G. Martinopoulos, N. Kyriakis, "Environmental performance of thermosyphonic domestic solar hot water systems under different climatic conditions: a case study for Greece", Global NEST, The International Journal, Vol. 6, No.3, pp 186-189, 2004.
12. ASHRAE Handbook, "HVAC Applications", 2003.
13. Α. Πελεκάνος, "Σύνταξη πινάκων μετεωρολογικών στοιχείων για ηλιακές εφαρμογές των πόλεων της Ελλάδος", Α' Εθνικό συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας", Τόμος Α', Θεσσαλονίκη, 1982.
14. Υπουργείο Ανάπτυξης, "Εθνικό Πληροφοριακό Σύστημα για την Ενέργεια", Αθήνα, 2008.
15. Υπουργείο Ανάπτυξης, "Περιβαλλοντικός οδηγός ηλιακών θερμικών συστημάτων", Αθήνα, 2008.
16. Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, "Κλιματική αλλαγή, Στοιχεία εκπομπών αέριων ρύπων 1990-2003".
17. Τεχνική Έκθεση, "Ελληνικό πρόγραμμα δράσης για την κλιματική μεταβολή 2000-2010", Αθήνα, 1995.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΟΔΗΓΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΡΙΟΥ ΠΡΟΟΔΟΥ ΕΡΓΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

Σ.Ν. Μποέμη, Σ. Κοντογιάννη, Α. Καραγιαννίδης και Α. Μ. Παπαδόπουλος

Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής, Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, GR-541 24 Θεσσαλονίκη, e-mail:
boemi@aix.meng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, διαχείρισης στερεών αποβλήτων και επεξεργασίας αστικών λυμάτων αποτελούν σήμερα την προμετωπίδα των περιβαλλοντικών και ενεργειακών έργων, αποβλέποντας στην προστασία του περιβάλλοντος, την βιώσιμη ανάπτυξη και την εξοικονόμηση φυσικών πόρων. Τα προβλήματα, οι τεχνολογικές εξελίξεις και οι διανοιγόμενες προοπτικές στους χώρους των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της διαχείρισης στερεών αποβλήτων και επεξεργασίας αστικών λυμάτων είναι ραγδαίες, ξεπερνώντας πολλές φορές τους ρυθμούς με τους οποίους η ελληνική πολιτεία, αλλά και δυστυχώς η ελληνική κοινωνία γενικότερα, προσπαθεί να ανταποκριθεί στις προκλήσεις, πιέσεις (και ενίοτε αδιέξοδα) που αντιμετωπίζει. Ωστόσο, η Ελλάδα εμφανίζει αξιόλογη εξέλιξη σε αυτά τα μέτωπα αλλά και μεγάλες υπολειπόμενες δυνατότητες και περιθώρια βελτίωσης. Στην παρούσα εργασία αναφέρονται οι εξελίξεις, όπως καταγράφηκαν στα πλαίσια ερευνητικού έργου, στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της διαχείρισης στερεών αποβλήτων και επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Οι τομείς αυτοί είναι ταυτόχρονα διαφορετικοί και συμπληρωματικοί και για το λόγο αυτό χρήζουν διακριτής αντιμετώπισης. Ωστόσο, εντοπίζονται κοινά στοιχεία στα αίτια των προβλημάτων που εντοπίστηκαν στην έρευνα, τα οποία οδηγούν σε παρατηρήσεις, σχόλια και εν τέλει συμπεράσματα που θα ήταν καλό να ληφθούν υπόψη κατά τη λήψη αποφάσεων, οδηγώντας ενδεχομένως σε υιοθέτηση μίας ευρύτερης συνολικής πολιτικής.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα έργα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΔΣΑ) και Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων (ΕΑΛ) αποτελούν σήμερα την προμετωπίδα των περιβαλλοντικών και ενεργειακών έργων αποβλέποντας στην προστασία του περιβάλλοντος και στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων. Η Ελλάδα εμφανίζει μεν αξιόλογη εξέλιξη σε αυτά τα μέτωπα αλλά από την άλλη πλευρά διαθέτει μεγάλες υπολειπόμενες δυνατότητες και περιθώρια βελτίωσης. Η παρούσα εργασία αποτελεί σύνοψη ενός ερευνητικού έργου που είχε ως στρατηγικό στόχο την συνδρομή στο θέμα αυτό.

Η Ελλάδα είναι μια χώρα πλούσια σε όλες τις παραπάνω μορφές ΑΠΕ. Εν τούτοις η αξιοποίησή τους, με λίγες εξαιρέσεις, παραμένει σε χαμηλό επίπεδο, συγκρινόμενη με τις άλλες ευρωπαϊκές χώρες αλλά και με τις δυνατότητες που διαθέτει. Ωστόσο, τα πρόσφατα στοιχεία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, σχετικά με τη χρήση ΑΠΕ από την Ελλάδα, δείχνουν ότι βρίσκεται κοντά στον ευρωπαϊκό μέσο όρο 6,66% (ΕΕ-27) με ποσοστό 5,23%. Οι προσπάθειες, από την ελληνική πλευρά που καταβάλλονται προς την κατεύθυνση αυτή είναι σημαντικές, και ωθήθηκαν από την αλλαγή της νομοθεσίας, ενώ συγχρόνως τα αιολικά και ηλιακά πάρκα, το φυσικό αέριο και η

αναζήτηση άλλων πηγών ενέργειας, φιλικών προς το περιβάλλον, βρίσκονται ψηλά στην πολιτική ατζέντα του Υπουργείου Ανάπτυξης (ΥΠΑΝ) και αποτελούν κυβερνητική δέσμευση [1]. Σκοπός της ελληνικής ενεργειακής πολιτικής είναι η υλοποίηση, εντός καθορισμένου χρονικού ορίζοντα, των αποφάσεων που θα οδηγήσουν στην επίτευξη των στόχων που τέθηκαν. Συγκεκριμένα, η έκθεση για το μακροχρόνιο ενεργειακό σχεδιασμό για την Ελλάδα 2008-2020, υποβλήθηκε τον Αύγουστο του 2007. Είναι η πρώτη έκθεση που υποβάλλεται, ύστερα από συνεργασία του Υπουργείου Ανάπτυξης, της ΡΑΕ και του ΚΑΠΕ σύμφωνα με όσα προβλέπονται στο Ν.3438/2006 «Περί σύστασης του Συμβουλίου Εθνικής Ενεργειακής Στρατηγικής».

Όσον αφορά τη Διαχείριση Αποβλήτων (ΔΑ) η κατάσταση στον ελλαδικό χώρο είναι σε σχετικά μεταβατικό στάδιο, τόσο στα Στερεά Απόβλητα (ΣΑ) όσο και στα Αστικά Λύματα (ΑΛ). Νομοθετικές ρυθμίσεις και εναρμονίσεις με το ευρωπαϊκό δίκαιο είτε εκκρεμούν, είτε δεν εφαρμόζονται στην πράξη. Η ανάπλαση των Χώρων Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων (ΧΑΔΑ) καθυστερεί και οι ΧΑΔΑ παραμένουν ελλείψει επαρκών Χώρων Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων (ΧΥΤΑ) οπότε τα στραγγίσματα των χωματερών μολύνουν τα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα αλλά και το έδαφος. Ταυτόχρονα, η ανακύκλωση υλικών έχει οργανωθεί αλλά τα ποσοστά είναι ακόμη αρκετά χαμηλά και η πληθυσμιακή κάλυψη των υφιστάμενων σχημάτων ανακύκλωσης μικρή ενώ η κομποστοποίηση εφαρμόζεται σε λίγες ακόμη περιοχές.

2. ΣΗΜΕΡΙΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

2.1.ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η τελευταία πρόταση της Επιτροπής για 20% ενέργεια από ΑΠΕ μέχρι το 2020 ανοίγει το δρόμο για τη μαζική ανάπτυξη της Αιολικής Ενέργειας στα 27 κράτη μέλη αλλά και για ένα νέο ενεργειακό μέλλον για την Ευρώπη. Παρέχει ένα σταθερό και εύκαμπτο ευρωπαϊκό πλαίσιο στο οποίο τα κράτη μέλη θα διατηρήσουν τον έλεγχο της πολιτικής τους στις ΑΠΕ, μέσω επιτυχημένων εθνικών συστημάτων υποστήριξης. Επιπλέον, η διασυνοριακή μεταφορά των εγγυήσεων προέλευσης θα μπορεί μόνο να πραγματοποιηθεί εκεί όπου τα κράτη μέλη θα έχουν εκπληρώσει ή θα έχουν ξεπεράσει τους στόχους τους. Για την Ευρωπαϊκή Ένωση Αιολικής Ενέργειας (European Wind Energy Association (EWEA)), αυτά τα δύο στοιχεία είναι κρίσιμα για τη διατήρηση της εμπιστοσύνης των επενδυτών και την ενθάρρυνση ουσιαστικών επενδύσεων στην πράσινη ηλεκτρική ενέργεια [2].

Στην προτεινόμενη νομοθεσία, ο εθελοντικός διασυνοριακός μηχανισμός εμπορικών συναλλαγών συνοδεύεται από μέτρα που αντιμετωπίζουν θετικά τα υπάρχοντα εμπόδια που αντιμετωπίζει η Αιολική Ενέργεια, όπως οι δυσκίνητες διοικητικές διαδικασίες και τα θέματα πρόσβασης στο ηλεκτρικό δίκτυο. Επομένως, μέσω της EWEA προτείνεται η θεσμοθέτηση για την πρόσβαση των ΑΠΕ κατά προτεραιότητα στο ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς και οι απαραίτητοι όροι για τη βελτίωση των χρονοβόρων διοικητικών διαδικασιών.

Ένα άλλο κρίσιμο στοιχείο αφορά τους κανόνες που θα ισχύουν στο μελλοντικό Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών (European Union Emission Trading Scheme (EU ETS)) για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), οι οποίες πρέπει να συμφωνηθούν γρήγορα από το Συμβούλιο των υπουργών και το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. Η EWEA χαιρετίζει την απόφαση της Επιτροπής να καθιερώσει διαδικασίες πλήρους δημοπρασίας για τον τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, από την έναρξη του νέου καθεστώτος το 2013 [3]. Η υπογραφή του Πρωτοκόλλου του Κιότου για την μείωση των εκπομπών των αερίων ρύπων και η αύξηση παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ δημιούργησε την ανάγκη σύστασης και λειτουργίας φορέων διαχείρισης ανανεώσιμων μορφών ενέργειας οι οποίοι είναι και αυτοί που ασχολούνται και φέρουν αρμοδιότητες σχετικά με τον τομέα των ΑΠΕ.

Το βασικό θεσμικό υπόβαθρο για την δημιουργία ελληνικών φορέων διαχείρισης αποτελεί ο Νόμος 2773/99. Με βάση την νομοθεσία αυτή έχουν συσταθεί η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) και η Ανώνυμη Εταιρεία Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ή Διαχειριστής του Συστήματος ή ΔΕΣΜΗΕ), δηλαδή η εταιρεία που διαχειρίζεται το Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας. Πρόκειται για τους δύο βασικούς φορείς λειτουργίας της απελευθερωμένης αγοράς. Ωστόσο, δεν μπορούν να αγνοηθούν το Υπουργείο Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων (ΥΠΕΧΩΔΕ) και το ΥΠΑΝ αλλά και Οργανώσεις/ Ομάδες που ασχολούνται με τις ΑΠΕ, όπως η Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ).

2.2. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΓΡΩΝ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Λαμβάνοντας υπόψη το θέμα της ΔΣΑ και ΕΑΛ η σημερινή κατάσταση παρουσιάζει ένα συνεχόμενο και αυξανόμενο ενδιαφέρον εξαιτίας της:

- Έλλειψης αρχικού και ολοκληρωμένου σχεδιασμού διαχείρισης,
- συγκέντρωσης του πληθυσμού σε αστικά κέντρα,
- επικέντρωσης των δραστηριοτήτων στην αντιμετώπιση των παραγόμενων ΣΑ και ΑΛ, και
- ύπαρξης χώρων διαχείρισης συχνά χωρίς επαρκή υποδομή που δίνουν προσωρινή επίλυση στο θέμα.

Οι στόχοι της ευρωπαϊκής νομοθεσίας καθώς και η αειφορική διαχείριση των αποβλήτων σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα απαιτεί την εφαρμογή της υφιστάμενης νομοθεσίας αλλά και την συμπλήρωσή της ώστε να ληφθούν υπόψη όλες οι κατηγορίες αποβλήτων, την ενημέρωση και συμμετοχή των πολιτών, την βελτιστοποίηση της λειτουργίας των υφιστάμενων έργων διαχείρισης αλλά και την υλοποίηση των προγραμματισμένων έργων διαχείρισης και τέλος τον πλήρη σχεδιασμό των συνολικά απαιτούμενων εγκαταστάσεων και την εξασφάλιση της οικονομικά εύρωστης λειτουργίας τους.

Οι εθνικοί στόχοι στον τομέα της ΔΣΑ που έχουν τεθεί από τη νομοθεσία και τους περιβαλλοντικούς σχεδιασμούς είναι [4]:

- η δημιουργία συστημάτων ολοκληρωμένης ΔΣΑ σε όλες τις περιφέρειες της χώρας,
- η σταδιακή μείωση της ποσότητας των Βιοαποδομήσιμων Αστικών Αποβλήτων που οδηγούνται προς ταφή σε ΧΥΤΑ/ ΧΑΔΑ.
- η σταδιακή αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης/ αξιοποίησης των παραγόμενων αποβλήτων συσκευασίας και άλλων προϊόντων,
- η κάλυψη του συνόλου της χώρας με σύγχρονους ΧΥΤΑ μέχρι το τέλος του 2008,
- ο έλεγχος της λειτουργίας των ΧΑΔΑ και η σταδιακή εξάλειψή τους μέχρι το τέλος της περιόδου υλοποίησης των σύγχρονων έργων ΔΣΑ.

Για την επίτευξη αυτών των στόχων η ελληνικές αρχές έχουν λάβει τα μέτρα και ειδικότερες ενέργειες για την προώθηση της εθνικής στρατηγικής [5]. Μέσω των παραπάνω στόχων επιδιώκεται η γενικότερη μείωση στην παραγωγή που θα πρέπει να είναι της τάξης του 20% μέχρι το 2010 (σε σχέση με το 2000) και κατά τα έτη 2010- 2050 μείωση κατά 50% (σε σχέση με το 2000) σε ότι αφορά την ποσότητα των αποβλήτων που προορίζονται για τελική διάθεση με ιδιαίτερη έμφαση στην μείωση των επικινδύνων αποβλήτων. Η Οδηγία 2004/12/ΕΚ, που αποτελεί τροποποίηση της Οδηγίας 94/62/ΕΚ για τις συσκευασίες και τα απόβλητα συσκευασίας αναφέρει ότι ελλείψει κοινοτικών οικονομικών μέσων, τα κράτη-μέλη μπορούν να θεσπίζουν, σύμφωνα με τις αρχές που διέπουν την πολιτική της ΕΚ στον τομέα του περιβάλλοντος, μεταξύ άλλων την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει». Όσον αφορά στα συστήματα επιστροφής, τα περισσότερα κράτη-μέλη έχουν εφαρμόσει ένα σύστημα στη βάση της αρχής της ευθύνης του παραγωγού. Στην Ελλάδα, ο Εθνικός Οργανισμός για την Εναλλακτική Διαχείριση Συσκευασιών και Άλλων Προϊόντων (ΕΟΕΔΣΑΠ), συστάθηκε

σύμφωνα με το αρθ. 5 του Ν. 2939/2001 αλλά δεν έχει ιδρυθεί και ελεγχθεί ακόμη ενώ ακόμη υποκαθίσταται από το Γραφείο Εναλλακτικής Διαχείρισης Συσκευασιών και Άλλων Προϊόντων (ΓΕΔΣΑΠ)) προβλέπει την ανάπτυξη προγραμμάτων με την εφαρμογή της αρχής της πρόληψης ως κύριας συνιστώσας [6].

Για την υποβοήθηση των περιφερειών και αρμόδιων υπηρεσιών και φορέων στη μετάβαση στα νέα δεδομένα ΔΑ, προγραμματίστηκε η εκπόνηση σχετικών υποστηρικτικών μελετών, στα πλαίσια του Επιχειρησιακού Πρόγραμμα Περιβάλλον (ΕΠΠΕΡ) του Γ' Κοινοτικού πλαισίου Στήριξης (ΚΠΣ). Στη νέα προγραμματική περίοδο οι πόροι του Δ' ΚΠΣ (και αυτοί που τυχόν μεταφέρθηκαν από το Γ') θα χρηματοδοτήσουν μεταξύ άλλων τα έργα των περιφερειών για τις ανάγκες της ΔΣΑ και ΕΑΛ.

3. ΕΝΤΟΠΙΣΜΕΝΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

3.1. ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ

Η μακροχρόνια ύπαρξη επιχορηγήσεων και άλλων, όχι πάντα απαραίτητων, κινήτρων οδηγεί τους επενδυτές σε μια στρεβλή λογική ανάλυσης της οικονομικής σκοπιμότητας και της βιωσιμότητας των σχεδίων. Σε ό,τι αφορά την περαιτέρω εξέλιξη των έργων ΑΠΕ πρέπει να εμπλακούν στη χρηματοδότηση έργων ειδικά χρηματοοικονομικά εργαλεία με μακροπρόθεσμη οικονομική προοπτική, λόγω του σχετικά μεγάλου χρόνου που χρειάζεται για να γίνουν τα έργα αυτά βιώσιμα. Η δυσκολία εξεύρεσης επενδυτικών πόρων για έργα ΑΠΕ, ΔΣΑ και ΕΑΛ, σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με την αδυναμία κοστολόγησης του συνολικού κύκλου ζωής και τη σωστή εκτίμηση των χρηματοοικονομικών, καθιστά μία τέτοια εμπλοκή πολύτιμη. Αυξητικές εκ των κάτω προς τα άνω (bottom-up) προσεγγίσεις στη διάδοση των ΑΠΕ, στην αναγκαιότητα και άλλων πέρα των ΧΥΤΑ έργων ΔΣΑ κρίνονται ως πλέον αποτελεσματικές για την ελληνική κοινωνία.

Μέχρι πρόσφατα, και ενώ η διεθνής αγορά γνωρίζει μια πραγματική κοσμογονία, η ελληνική αγορά επιζούσε χάρη κυρίως στα εγκεκριμένα από το Γ' ΚΠΣ προγράμματα του Επιχειρησιακού Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητα (ΕΠΑΝ) του ΥΠΑΝ. Ωστόσο, η πληθώρα των αιτήσεων, που οδήγησε σε αδυναμία του συστήματος αξιολόγησής τους να τις διαχειριστεί, αλλά και οι υπερβολικές προσδοκίες που καλλιεργήθηκαν ως προς τις αιτούμενες επιχορηγήσεις αφήνουν ερωτηματικά για το ρυθμό και το χρόνο υλοποίησής τους. Το Δ' ΚΠΣ 2007-2013 καθώς και οποιαδήποτε δυνατότητα μέσω Συμπράξεων Δημόσιου & Ιδιωτικού Τομέα (ΣΔΙΤ) (πεδίο που βρίσκεται σε κινητικότητα εδώ και μια διετία) θα πρέπει να αξιοποιηθούν άμεσα και στοχευμένα.

3.2 ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΣΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΚΛΙΜΑΚΑΣ

Η αδειοδοτική διαδικασία στο σύνολο είναι περίπλοκη. Το σχέδιο νόμου που δόθηκε στην δημοσιότητα απέχει σημαντικά από την αρχική πρόταση της ΡΑΕ όσο αφορά τις ΑΠΕ και οι απαιτήσεις των εγκεκριμένων Περιφερειακών Σχεδιασμών Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΠΕΔΣΑ) και ΕΑΛ κρίνονται κατά το μεγαλύτερο μέρος υπερβολικές και μονόπλευρες όσο αφορά την αποτελεσματικότητα αλλά και την οικονομία κλίμακας. Χαρακτηριστικό των περισσότερων είναι οι πολυπληθείς μικροί ΧΥΤΑ που δεν παρέχουν την αναγκαία οικονομία κλίμακας με αποτέλεσμα το κόστος διάθεσης των απορριμμάτων σε αυτούς να είναι πολλαπλάσιο από όσο το κόστος μεταφοράς και τελικής διάθεσης σε μεγάλους κεντρικούς ΧΥΤΑ. Παρομοίως, παρόλο που η Ελλάδα, χαρακτηρίζεται από μεγάλες τιμές αιολικών δυναμικών το κυριότερο πρόβλημά της είναι η διασύνδεση στο κεντρικό δίκτυο, οπότε η κατασκευή μεγάλων αιολικών μονάδων καθίσταται οικονομικά ασύμφορη.

Η κύρια αδυναμία των φορέων υλοποίησης είναι η μικρότερη ή μεγαλύτερη άγνοια της θεσμοθετημένης αλληλουχίας και της μεθόδευσης υλοποίηση των απαραίτητων βημάτων που θα οδηγήσουν στην σωστή προετοιμασία και την έγκαιρη δημοπράτηση των έργων. Απότοκος αυτής της αδυναμίας είναι ο ελλιπής συντονισμός του όλου κύκλου των σχετικών διαδικασιών και οι παρατηρούμενες υπερβάσεις-χρονικές και οικονομικές- στην υλοποίηση των έργων.

Συγκεκριμένα, σήμερα (Νοέμβριος 2008), ο σχεδιασμός, η αδειοδότηση και η κατασκευή ενός αιολικού πάρκου απαιτεί 2- 3 χρόνια, τη στιγμή που μόνο το στάδιο της κατασκευής διαρκεί περίπου 6- 8 μήνες ενώ στα έργα ΔΣΑ και ΕΑΛ απαιτούνται κατά μέσο όρο 1,5- 2 και 2- 3 χρόνια αντίστοιχα.

Στην Ελλάδα, η νομοθεσία εφαρμόζεται σε ορισμένες περιπτώσεις με ελλιπή τρόπο και υπάρχουν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις εθνικές και ευρωπαϊκές προσεγγίσεις. Ο καθορισμός του λόγου για τον οποίο υλοποιούνται τα έργα θα πρέπει να γίνει εξ αρχής έτσι ώστε να επιτευχθούν οι λόγοι για τους οποίους υλοποιούνται και μακροχρόνια οι εθνικοί οι ευρωπαϊκοί στόχοι.

Οι ΑΠΕ, ως πόρος παραγωγής, δεν είναι η λύση του ενεργειακού προβλήματος. Επομένως, πρωταρχικά πρέπει να δοθεί έμφαση στη διαχείριση της ζήτησης και να αυξηθεί το ποσοστό της εξοικονόμησης ενέργειας. Κρίνεται, συνεπώς αναγκαία η ορθολογική χρήση του εκάστοτε επιλεγόμενου πόρου για κάθε εφαρμογή, πόροι οι οποίοι ούτως ή άλλως περιορίζονται ή εξαντλούνται [7]. Συγχρόνως, επιβάλλεται μείωση των αιχμών ζήτησης με χρονική μετατόπιση τους, εφαρμογή τεχνικών διαχείρισης ζήτησης και αξιοποίηση αποκεντρωμένων ενεργειακών συστημάτων. Αφετέρου τα έργα ΔΣΑ και ΕΑΛ θα πρέπει να αλληλοσυμπληρώνονται με στόχο την επίτευξη της μικρότερης ποσότητας αποβλήτων που οδηγούνται στους ΧΥΤΑ. Συνεπώς επιβάλλεται η αξιοποίηση και η υλοποίηση αποκεντρωμένων αλλά και βιώσιμων ενεργειακών και διαχειριστικών συστημάτων.

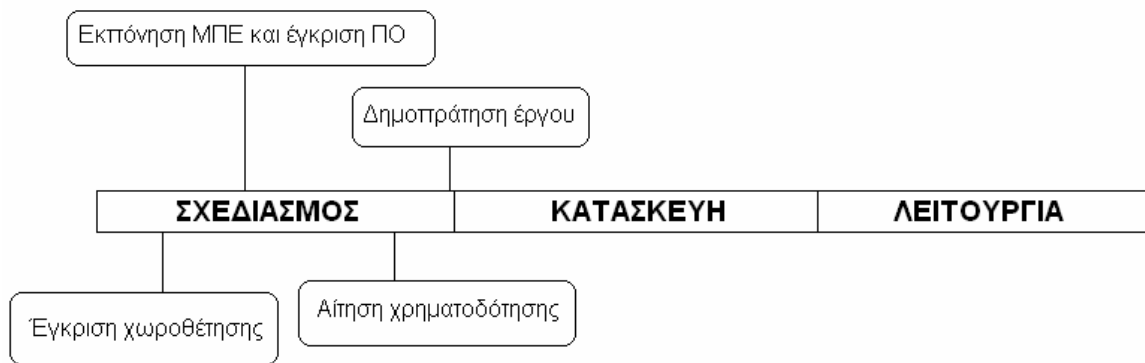
Στον τομέα της ΔΣΑ και ΕΑΛ παρατηρείται έλλειψη δεδομένων σχετικά με την παραγωγή τους στη χώρα μας που οφείλεται σε καθαρά οργανωτικούς λόγους καθώς δεν υπάρχει καταγραφή και συντήρηση εθνικής βάσης δεδομένων. Οι νέες εγκαταστάσεις –συνήθως κυρίως ιδιωτικού συμφέροντος- καταγράφουν τα διαχειριζόμενα απόβλητα, ενώ η εφαρμογή νομοθετικών διατάξεων της ΕΕ (π.χ. κανονισμού REACH (Registration, Evaluation and Authorization of Chemicals) που είναι προσχέδιο νόμου που θα οδηγήσει στον προσδιορισμό και τη σταδιακή απόσυρση των πλέον βλαβερών χημικών ουσιών), αλλά και εφαρμογή των εθνικών νομοθεσιών - εναρμονίσεων με το ευρωπαϊκό δίκαιο, σε σύντομο χρονικό διάστημα θα κάνει επιτακτική αυτού του είδους την καταγραφή [8].

3.3 ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ

Η χωροθέτηση συχνά συναντά δυσχέρειες λόγω της διαρκούς έλλειψης κτηματολογίου και χαρακτηρισμού των χρήσεων της γης, αλλά και των κοινωνικών αντιδράσεων (σύνδρομο Not-In-My-Back-Yard) με βασικούς λόγους την υποβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος και τη μείωση του τουρισμού.

Τα υποστάδια (Εικόνα 1) που αφορούν την χωροθέτηση της εγκατάστασης, τη Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ), την έγκριση των Περιβαλλοντικών Όρων (ΠΟ) και χρηματοδότησης καθώς και τη δημοπράτηση του έργου ΔΣΑ ή/ και ΕΑΛ ενέχουν σε μεγάλο βαθμό κοινούς λόγους καθυστέρησης σε όποιο έργο και αν αφορούν.

Είναι πολύ σημαντικό να καλυφθούν οι σημερινές και αυριανές ανάγκες χωρίς να επέλθει μια διαδικασία αξιολόγησης και εξορθολογισμού τους, αδιαφορώντας για τη βιωσιμότητα του ενεργειακού συστήματος και του οικοσυστήματος. Αυτό πρακτικά σημαίνει πώς πρέπει να μεταβληθεί ο σημερινός τρόπος ζωής και ο τρόπος της οικονομικής ανάπτυξης.



Εικόνα 1: Συνοπτική απεικόνιση των σταδίων και των υποσταδίων υλοποίησης των εγκαταστάσεων Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων και Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων.

3.4 ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ

Προκύπτει λοιπόν η αδήριτη ανάγκη στρατηγικού σχεδιασμού στον τομέα της υλοποίησης των έργων, ενώ κρίνεται σκόπιμη η καθιέρωση και εφαρμογή κανόνων και μεθοδολογιών για τον έλεγχο και την επιτήρησή τους. Η οργάνωση, εδραίωση και συνεπής υλοποίηση πάγιων πολιτικών παραμένει η μοναδική λύση [9]. Τα παραπάνω προκύπτουν και επιβεβαιώνονται από νομοθετικές διατάξεις θα πρέπει να τηρούνται με τρόπο διαφανή, αποτελεσματικό και αποδοτικό και όχι να παραβλέπονται ή να παραποιούνται.

Οι εξελίξεις στον τομέα των επιμέρους μεθόδων και τεχνολογιών διαχείρισης και διάθεσης θα πρέπει να συνδυάζονται με την υποχρέωση τήρησης των βασικών στρατηγικών στόχων που έχουν υιοθετηθεί διεθνώς και σε επίπεδο ΕΕ:

- περιορισμός της ποσότητας και της βλαπτικότητας των παραγόμενων ΣΑ, προτεραιότητα της ανακύκλωσης έναντι της ενεργειακής αξιοποίησης, ασφαλής τελική διάθεση, ορθολογική και ασφαλής μεταφορά που οδηγούν σε έναν βέλτιστο συνδυασμό των διαφόρων μεθόδων, όπως έχει καταστεί διεθνώς αποδεκτός, και
- υποχρεώσεις που απορρέουν από τον περιορισμό των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (π.χ. Πρωτόκολλο Κιότο) και από την προώθηση της χρήσης ΑΠΕ (Οδηγία 2001/77/ΕΚ).

Οι κατευθύνσεις που προτάσσει μία τέτοια στρατηγική θα πρέπει να ενσωματωθούν όχι μόνο σε επίπεδο σχεδιασμού, αλλά και σε επίπεδο εφαρμογής στη χώρα. Η αναγκαιότητα, όμως, αυτή δεν είναι εν γένει συμβατή με τον ακόμη υφιστάμενο κατακερματισμό του ηπειρωτικού ελλαδικού χώρου και των μεγάλων νησιών σε εκατοντάδες διαχειριστικές ενότητες.

4. ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ- ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Αξίζει να σημειωθεί ότι η στενή εμπλοκή των πολιτών (τελικών χρηστών /καταναλωτών για τις ΑΠΕ) θεωρείται όλο και πιο σημαντική για επιτυχείς τεχνολογικές καινοτομίες και στρατηγικές. Η συσσωρευμένη εμπειρία της τελευταίας 15ετίας, τόσο σε διεθνές επίπεδο (μόνο στην Ευρωπαϊκή Ένωση λειτουργούν ήδη πάνω από 40.000 MW σταθμών ΑΠΕ, από τους οποίους τα 26.000 MW είναι αιολικά πάρκα), όσο και στην Ελλάδα, όπου λειτουργούν ήδη περίπου 450 MW ανανεώσιμων, κυρίως αιολικά πάρκα, δείχνει καθαρά, και πέρα από κάθε αμφιβολία, ότι η ίδρυση και λειτουργία έργων ΑΠΕ εμπορικής κλίμακας δημιουργεί ισχυρούς πόλους τοπικής ανάπτυξης και περιβαλλοντικής αναβάθμισης και προσπορίζει πολλαπλά, μετρήσιμα και ουσιαστικά οφέλη στις τοπικές κοινωνίες, στις περιοχές των οποίων εγκαθίστανται τα έργα αυτά.

Ένα από τα σημαντικότερα και δυσκολότερα σημεία της διαχείρισης αποβλήτων είναι η κοινωνική αποδοχή στην υλοποίηση (κυρίως στο στάδιο χωροθέτησης) των έργων ΔΣΑ και ΕΑΛ. Οι αντιδράσεις του κοινού στο συγκεκριμένο είναι συνήθως εντονότερες, με αποτέλεσμα να μεσολαβεί μεγάλο διάστημα από τη στιγμή τεκμηρίωσης της αναγκαιότητας μέχρι την υλοποίηση των προγραμματισμένων έργων.

Η κοινωνική αποδοχή δεν πρέπει να επιδιώκεται στη βάση της προσπάθειας για αλλαγή νοοτροπίας του κοινού (να πειστεί δηλαδή ότι οι εγκαταστάσεις ΔΑ είναι απόλυτα ασφαλείς). Μια τέτοια προσέγγιση θα πυροδοτήσει τις τοπικές αντιδράσεις, γιατί η εμφανής προσπάθεια δημιουργίας συγκεκριμένης άποψης δημιουργεί την αίσθηση επιβολής.

Ωστόσο, για τη λήψη των σωστών αποφάσεων θα πρέπει να αναλυθούν σύνθετα τεχνικά, οικονομικά και κοινωνικά θέματα, και να συνδυαστούν οι αναγκαίες δράσεις έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η τήρηση, με βέλτιστο οικονομικά τρόπο, πολλαπλών νομικών και άλλων απαιτήσεων, που συχνά γίνονται αυστηρότερες με την πάροδο του χρόνου.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε ό,τι αφορά στη περαιτέρω εξέλιξη των έργων ΑΠΕ πρέπει να εμπλακούν στη χρηματοδότηση έργων ειδικά χρηματοοικονομικά εργαλεία με μακροπρόθεσμη οικονομική προοπτική, λόγω του σχετικά μεγάλου χρόνου που χρειάζεται για να γίνουν τα έργα αυτά βιώσιμα. Η δυσκολία εξεύρεσης επενδυτικών πόρων για έργα ΑΠΕ, που σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με την αδυναμία κοστολόγησης του συνολικού κύκλου ζωής μιας ενεργειακής μονάδας και στη σωστή εκτίμηση των χρηματοροών καθιστά μία τέτοια εμπλοκή πολύτιμη. Αυξητικές εκ των κάτω προς τα άνω (bottom-up) προσεγγίσεις στη διάδοση των ΑΠΕ είναι πιο αποτελεσματικές για την ελληνική αγορά ενέργειας. Επομένως, για την ανάπτυξη των ΑΠΕ κοινωνικοί, θεσμικοί και οικονομικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη ενδεικτικά να συνοψισθούν ως εξής:

- Αξιοποίηση του υπάρχοντος ειδικά εκπαιδευμένου προσωπικού σε χρηματοδοτικούς μηχανισμούς ικανούς να στηρίζουν έργα ΑΠΕ.
- Στήριξη ερευνητικών προγραμμάτων έρευνας και ανάπτυξης με στόχο την ανάπτυξη της κατασκευαστικής βιομηχανίας, τη βελτίωση των αειφόρων τεχνολογιών και τη μείωση του αρχικού τους κόστους.
- Επάρκεια γνώσης από διαχειριστές έργων σχετικά με τις ενεργειακές και κοινωνικές ανάγκες των αγροτικών κοινοτήτων καθώς και η έλλειψη προσαρμογής των έργων στις ανάγκες αυτές και συμμετοχής των τοπικών κοινοτήτων στο σχεδιασμό των έργων.

Αντίστοιχα για την ΔΣΑ και ΕΑΛ προκύπτει η αδήριτη ανάγκη στρατηγικού σχεδιασμού στον τομέα της υλοποίησης των έργων ΔΣΑ και ΕΑΛ, ενώ σύμφωνα και με το σχετικό ερευνητικό έργο, κρίνεται σκόπιμη η καθιέρωση και εφαρμογή κανόνων και μεθοδολογιών για τον έλεγχο και την επιτήρησή τους. Η οργάνωση, εδραίωση και συνεπής υλοποίηση άγιων πολιτικών παραμένει η μοναδική λύση στο θέμα της ορθολογικής διαχείρισης των ΣΑ και ΑΛ. Από τη μία πλευρά απαιτείται άμεση κινητοποίηση για την αντιμετώπιση των ολοένα και συχνότερα εμφανιζόμενων εξάρσεων και κρίσεων κάθε είδους, ενώ από την άλλη συντονισμένη προσέγγιση από όλους τους πολιτικά υπεύθυνους σε αυτό το πεδίο (ΔΣΑ και ΕΑΛ).

Τα προβλήματα, οι τεχνολογικές εξελίξεις και οι διανοιγόμενες προοπτικές στους χώρους των ΑΠΕ και της ΔΣΑ και ΕΑΛ είναι ραγδαίες, ξεπερνώντας πολλές φορές τους ρυθμούς με τους οποίους η ελληνική πολιτεία, αλλά και δυστυχώς η ελληνική κοινωνία γενικότερα, προσπαθεί να ανταποκριθεί στις προκλήσεις, πιέσεις (και ενίοτε αδιέξοδα) που αντιμετωπίζει.

Από τη λειτουργία του παρατηρητηρίου προέκυψαν ενδιαφέροντα συμπεράσματα, τόσο γενικότερα όσο και εξειδικευμένα. Αυτό που οφείλει κανείς να τονίσει αντί επιλόγου είναι ότι για την υπέρβαση των καθυστερήσεων, ολιγωριών και δυσκολιών απαιτούνται:

- Η συλλογική προσπάθεια όλων των εμπλεκόμενων φορέων της πολιτείας (κεντρική διοίκηση, τοπική αυτοδιοίκηση, υπηρεσίες, φορείς και ανεξάρτητες αρχές) στην κατεύ-

θυνση ενός αποτελεσματικού, εφαρμόσιμου και κατά το δυνατόν ελάχιστου ως προς την έκτασή του θεσμικού πλαισίου

- Η ανάπτυξη και προώθηση της τεχνογνωσίας που απαιτείται για την επιτυχή εφαρμογή των σύγχρονων τεχνολογιών. Στο σημείο αυτό εντοπίζεται και η ευθύνη πανεπιστημίων, ερευνητικών κέντρων και συλλογικών φορέων όπως το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος.
- Η αλλαγή νοοτροπίας της κοινωνίας, με την κατάλληλη ενημέρωση και την προβολή καλών παραδειγμάτων, ότι το «καλύτερο περιβάλλον» δεν είναι μία γενική και αόριστη επιθυμία, ούτε μια κρατική υποχρέωση, αλλά ένας τρόπος ζωής, που συνεπάγεται οικονομικό κόστος, αλλά αποδίδει πολλαπλά και ποιοτικά απαραίτητα οφέλη.

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

ΑΛ	Αστικά Λύματα	ΚΠΣ	Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	ΣΑ	Στερεά Απόβλητα
ΔΑ	Διαχείριση Αποβλήτων	ΥΠΙΑΝ	Υπουργείο Ανάπτυξης
ΔΣΑ	Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων	ΧΑΔΑ	Χώρος Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων
ΕΑΛ	Επεξεργασία Αστικών Λυμάτων	ΧΥΤΑ	Χώρος Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση	EWEA	European Wind Energy Association

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (Ε&Τ) (2007), Ενημερωτική έκδοση, Τεύχος 29, Νοέμβριος – Δεκέμβριος.
2. Vionis P., Tzen E. and Rossis K. (2006), «I.E.A. Wind Energy Annual Report 2006». Κ.Α.Π.Ε., Ελλάδα, pp. 133-140.
3. Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ) (2008), www.eletaen.gr
4. Ξηρογιαννοπούλου Α. (2007), «Ανάπτυξη ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για την ελαχιστοποίηση της ποσότητας και επικινδυνότητας των στερεών απόβλητων», Διδακτορική διατριβή στο Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής (ΕΜΘΠΜ), Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ).
5. Θεοχάρη Χ., Αραβώσης Κ., Βαρελίδης Π., Ηλίας Δ., Ζιώγας Χ., Ιατρού Σ., Μπούρκα Α., Οικονομόπουλος Α., Παπαρηγορίου Σ., Παντελάρας Π. και Φραντζής Ι. (2006). «Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων στην Ελλάδα - Η περίπτωση της Αττικής», Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα.
6. Εφημερίδα της Κυβερνήσεως (2001), «Συσκευασίες και εναλλακτική διαχείριση των συσκευασιών και άλλων προϊόντων – Ίδρυση Εθνικού Οργανισμού Εναλλακτικής Διαχείρισης Συσκευασιών και Άλλων Προϊόντων (ΕΟΕΔΣΑΠ) και άλλες διατάξεις», Ν. 2939, τεύχος Α 179, 6 Αυγούστου.
7. ICAP, Μελέτη της ICAP για τον Ελληνικό Ενεργειακό Τομέα, 2000.
8. Σκορδίλης Α. (2006), «Η ολοκληρωμένη διαχείριση των απορριμμάτων στην κοινωνία της ανακύκλωσης», Σεμινάριο στελεχών εκπαίδευσης, «Σχολ(ε)ιάζοντας τη διαχείριση των απορριμμάτων: από το σήμερα στο αύριο», 7-10 Δεκεμβρίου, Έδεσσα.
9. Υπουργείο Οικονομίας και Οικονομικών/ Μονάδα Οργάνωσης της Διαχείρισης (ΜΟΔ) του κοινοτικού πλαισίου στήριξης (2006), «Οδηγός διαδικασιών ωρίμανσης έργων διαχείρισης απορριμμάτων-Αναθεωρημένος», Σεπτέμβριος, ISBN 978-9-608-75666-3, www.mou.gr

ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ

Θεόδωρος Ζαχαριάδης

*Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου
Τ.Θ. 50329, 3603 Λεμεσός, Κύπρος
Τηλ. +357 25 002304, Fax +357 25 002667, email: t.zachariadis@cut.ac.cy*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη μελέτη αυτή εξετάστηκε η πιθανή εξέλιξη της κατανάλωσης ηλεκτρισμού στην Κύπρο έως το 2030, σε συνάρτηση με την εξέλιξη των μακροοικονομικών μεγεθών, των τιμών του πετρελαίου και των καιρικών συνθηκών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η χρήση ηλεκτρισμού αναμένεται να τριπλασιαστεί κατά τα επόμενα 20–25 χρόνια, με αυξανόμενη συμμετοχή των οικιακών καταναλωτών και του τριτογενούς τομέα της οικονομίας. Επιπρόσθετα, διενεργήθηκε πρόβλεψη υποθέτοντας σταδιακή μεταβολή των καιρικών συνθηκών λόγω της κλιματικής αλλαγής. Εφαρμόζοντας το μοντέλο μας, υπολογίσαμε ότι η κατανάλωση ηλεκτρισμού στην Κύπρο θα αυξηθεί μέχρι το 2030 κατά 2,9% συνολικά σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Οι αυξημένες ανάγκες για ηλεκτρισμό αναμένεται να οδηγήσουν σε άμεσο κόστος περίπου 15 εκ. Ευρώ το 2020 και 45 εκ. Ευρώ το 2030, ενώ η παρούσα αξία του συνολικού κόστους για την περίοδο 2008-2030 υπολογίζεται να ξεπεράσει τα 200 εκ. Ευρώ (σε σταθερές τιμές 2007).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια σειρά προβλέψεων της κατανάλωσης ηλεκτρισμού στην Κύπρο έως το έτος 2030, για τις τέσσερις βασικές κατηγορίες καταναλωτών: τον οικιακό τομέα, τον τομέα των υπηρεσιών, τη βιομηχανία και τη γεωργία. Οι προβλέψεις αυτές βασίζονται σε οικονομετρική ανάλυση των κυπριακών δεδομένων και σε υποθέσεις για τη μελλοντική εξέλιξη της οικονομικής μεγέθυνσης, των διεθνών τιμών του πετρελαίου και των καιρικών συνθηκών. Η εργασία προσπαθεί επιπλέον να αναδείξει κάποιες από τις πιθανές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στο ηλεκτρικό σύστημα της Κύπρου.

Οι προβλέψεις αυτές, παρά την αβεβαιότητά τους, μπορούν να αποτελέσουν μια ένδειξη για το εύρος εντός του οποίου μπορεί να κυμαίνεται η αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρισμού στην Κύπρο εφόσον δεν συμβούν δραματικές αλλαγές στη διάρθρωση της οικονομικής δραστηριότητας και στις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή και χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς μπορούν να χρησιμεύσουν ως οδηγός για τον μακροχρόνιο σχεδιασμό του κυπριακού ηλεκτρικού συστήματος με στόχο την επάρκεια της ηλεκτρικής τροφοδοσίας της χώρας.

2. ΟΙΚΟΝΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Οι προβλέψεις που παρουσιάζονται στην παρούσα μελέτη βασίζονται στην οικονομετρική ανάλυση που δημοσιεύτηκε σε δύο προηγούμενα Δοκίμια του Κέντρου Οικονομικών Ερευνών (ΚΟΕ) του Πανεπιστημίου Κύπρου (Zachariadis 2006, Ζαχαριάδης 2006). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας τις χρονοσειρές που είναι διαθέσιμες από τη Στατιστική Υπηρεσία της Κυπριακής Δημοκρατίας για την πε-

ρίοδο 1960–2007 σε ετήσια βάση, διερευνήθηκε η δυναμική αλληλεπίδραση της κατανάλωσης διάφορων μορφών ενέργειας, της οικονομικής δραστηριότητας, των τιμών των αντίστοιχων καυσίμων και των καιρικών συνθηκών. Τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία επέτρεψαν να αναλυθεί η κατανάλωση ηλεκτρισμού στον οικιακό, εμπορικό, βιομηχανικό και αγροτικό τομέα, η κατανάλωση βενζίνης και η συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας.

Η ανάλυση διενεργήθηκε με δύο μεθόδους: αφενός με τη χρήση ελέγχων μοναδιαίας ρίζας για τις εμπλεκόμενες μεταβλητές, μεθόδων συνολοκλήρωσης και μοντέλων διανυσματικής αυτοπαλινδρόμησης (vector error correction models – VEC), και αφετέρου με την εφαρμογή μοντέλων μίας εξίσωσης με αυτοπαλινδρόμηση και κατανεμημένη υστέρηση (autoregressive distributed lag models – ARDL). Για τη διενέργεια των προβλέψεων που θα παρουσιαστούν στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η χρήση των μοντέλων ARDL, αφενός διότι τα μοντέλα VEC προσφέρονται περισσότερο για ανάλυση της βραχυχρόνιας αλληλεπίδρασης μεταξύ των μεταβλητών και λιγότερο για μακροχρόνιες προβλέψεις, και αφετέρου διότι τα μοντέλα ARDL έχουν καλύτερες ιδιότητες σε μικρά δείγματα (Pesaran and Shin 1999) και προσεγγίζουν περισσότερο μια δομική (structural) περιγραφή της κατανάλωσης ενέργειας από ό,τι τα μηχανιστικά μοντέλα VEC (Clements and Madlener 1999). Έτσι, για καθεμιά κατηγορία καταναλωτών ηλεκτρισμού (οικιακός τομέας, εμπορικός τομέας και βιομηχανία) το μοντέλο ARDL που χρησιμοποιήθηκε έχει την ακόλουθη μορφή:

$$e_t = \gamma_0 + \sum_{i=1}^m \gamma_{1i} e_{t-i} + \sum_{j=0}^n \gamma_{2j} y_{t-j} + \sum_{k=0}^p \gamma_{3k} p_{t-k} + \sum_{l=0}^q \gamma_{4l} tdd_{t-l} + \xi_t \quad (1)$$

όπου οι μεταβλητές e , y και p συμβολίζουν αντίστοιχα τον φυσικό λογάριθμο της κατανάλωσης ηλεκτρισμού, του εισοδήματος/οικονομικής δραστηριότητας (ανάλογα με τον τομέα) και της λιανικής τιμής του ηλεκτρισμού για την αντίστοιχη κατηγορία καταναλωτών. Η μεταβλητή tdd εκφράζει τις βαθμο-ημέρες θέρμανσης και ψύξης, που αποτελούν την κατάλληλη μετεωρολογική παράμετρο για την παρούσα ανάλυση¹ και χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα της οικιακής και της εμπορικής κατανάλωσης ηλεκτρισμού. Τα ξ_t είναι τα υπόλοιπα της εξίσωσης, που θεωρείται (και έχει ελεγχθεί) ότι είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή μηδέν και σταθερή μεταβλητότητα. Τα m, n, p, q είναι η μέγιστη υστέρηση που επιτράπηκε κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσης των μοντέλων για κάθε μεταβλητή, όπου $m=n=p=q=2$. Για κάθε μοντέλο (δηλαδή για καθεμιά κατηγορία κατανάλωσης – οικιακή, εμπορική και βιομηχανική) επελέγησαν εκείνες οι τιμές των m, n, p, q που ελαχιστοποιούν το πληροφοριακό κριτήριο του Schwarz. Στην παραπάνω εξίσωση περιλήφθηκαν (αλλά δεν παρουσιάζονται εδώ για λόγους συντομίας) και ψευδομεταβλητές για τα έτη εκείνα όπου έκτακτα γεγονότα αλλοίωσαν την ομαλή πορεία των χρονοσειρών (λ.χ. για τα έτη 1974 και 1975).

Η παραπάνω ανάλυση διενεργήθηκε αρχικά με βάση 48 παρατηρήσεις (για την περίοδο 1960–2007), και κατόπιν η εξίσωση (1) επανεκτιμήθηκε για 28 κυλιόμενες εικοσαετείς περιόδους: 1961–1980, 1962–1981, ... 1988–2007. Τα αποτελέσματα των οικονομετρικών εκτιμήσεων παρατίθενται στον Πίνακα 1, όπου φαίνεται ότι η κατανάλωση ηλεκτρισμού και για τις τρεις κατηγορίες καταναλωτών επηρεάζεται αισθητά από το εισόδημα ή την οικονομική δραστηριότητα του κλάδου, με μακροχρόνιες

¹ Ο ορισμός της βαθμο-ημέρας αποσκοπεί στην αποτύπωση τόσο της διάρκειας όσο και της έντασης ψυχρών ή θερμών καιρικών συνθηκών, εκφράζοντας έτσι σε ποιο βαθμό προκύπτουν ανάγκες για θέρμανση ή ψύξη αντίστοιχα ως αποτέλεσμα αυτών των συνθηκών. Έτσι, λ.χ. μια βαθμο-ημέρα θέρμανσης προκύπτει αν η μέση θερμοκρασία κατά τη διάρκεια μιας ημέρας είναι μικρότερη κατά 1°C από μια μέση ημερήσια θερμοκρασία αναφοράς (λ.χ. 18°C). Αθροίζοντας αυτές τις ημερήσιες αποκλίσεις από τη θερμοκρασία αναφοράς, προκύπτουν οι ετήσιες βαθμο-ημέρες θέρμανσης/ψύξης. Σε παλαιότερο Δοκίμιο (Zachariadis 2006) επεξηγείται αναλυτικότερα γιατί χρησιμοποιήθηκαν τόσο οι βαθμο-ημέρες θέρμανσης όσο και ψύξης και παρουσιάζονται σε γραφική μορφή οι ιστορικές τιμές βαθμο-ημερών που παρέσχε στο ΚΟΕ η Μετεωρολογική Υπηρεσία.

ελαστικότητες μεγαλύτερες της μονάδας. Αντίθετα, η κατανάλωση είναι ανελαστική ως προς την τιμή του ηλεκτρισμού στον οικιακό και εμπορικό τομέα, αλλά μακροχρόνια ελαστική στη βιομηχανία. Τέλος, η επίδραση των καιρικών συνθηκών στην κατανάλωση ηλεκτρισμού αποδείχθηκε στατιστικά σημαντική και μάλιστα εντονότερη από την επίδραση της τιμής του ηλεκτρισμού.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα των εκτιμήσεων της εξίσωσης (1) με δεδομένα της περιόδου 1988–2007. Τα y , p και d εκφράζουν τις μεταβλητές εισοδήματος, τιμής και καιρικών συνθηκών όπως περιγράφηκαν στον Πίνακα 1

Εξαρτημένη μεταβλητή	Τάξη υστέρησης	Βραχυχρόνιες ελαστικότητες			Μακροχρόνιες ελαστικότητες		
		y	p	d	y	p	d
Κατανάλωση ηλεκτρισμού, οικιακός	(1,0,0,0)	0,649	-0,095	0,328	1,576	-0,232	0,796
Κατανάλωση ηλεκτρισμού, βιομηχανία	(1,1,1)	0,121	-0,083	-	1,192	-0,819	-
Κατανάλωση ηλεκτρισμού, εμπορικός	(1,0,0,0)	0,310	-0,035	0,141	1,136	-0,128	0,516

Σημείωση: Οι παράμετροι που εκτιμήθηκαν στα τρία παραπάνω μοντέλα ήταν όλες στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο σημαντικότητας τουλάχιστον 5%.

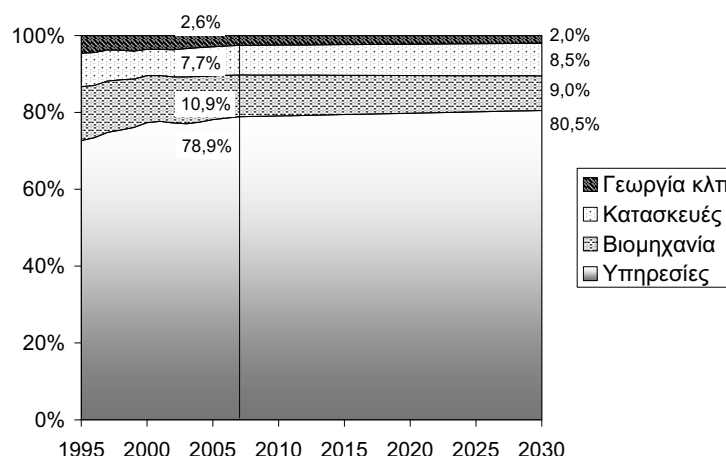
3. ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΠΟΥ ΕΓΙΝΑΝ ΣΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Οι μακροχρόνιες προβλέψεις έχουν στόχο να δώσουν απάντηση σε ερωτήσεις του τύπου «τι θα συμβεί αν ...». Επομένως πρέπει να γίνουν υποθέσεις σχετικά με τη μελλοντική εξέλιξη των εξωγενών μεταβλητών της εξίσωσης (1).

Για την πρόβλεψη της εξέλιξης του Ακαθάριστου Εγχώριου Προϊόντος (ΑΕΠ), της ιδιωτικής κατανάλωσης, καθώς και της προστιθέμενης αξίας της βιομηχανίας, της γεωργίας και του τριτογενούς τομέα, χρησιμοποιήθηκαν προβλέψεις του Υπουργείου Οικονομικών που υποβάλλονται στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Από τις πληροφορίες του Υπουργείου Οικονομικών ήταν διαθέσιμες μόνο προβλέψεις του ΑΕΠ και της ιδιωτικής κατανάλωσης. Για τα υπόλοιπα μακροοικονομικά μεγέθη υποτέθηκε ότι η συμμετοχή της βιομηχανίας, της γεωργίας και των υπηρεσιών στο ΑΕΠ θα διαφοροποιηθεί ελαφρώς από τη σημερινή κατάσταση, στην κατεύθυνση που παρατηρείται κατά την τελευταία δεκαετία, αλλά χωρίς έντονες μεταβολές. Έτσι, ο τριτογενής τομέας αναμένεται να παράγει το 80,5% του ΑΕΠ (έναντι 78,9% το 2007), η βιομηχανία το 9% του ΑΕΠ (έναντι 10,9% το 2007), οι κατασκευές το 8,5% (7,7% το 2007) και ο πρωτογενής τομέας (γεωργία, αλιεία και δασοκομία) το 2% του ΑΕΠ (2,6% το 2007). Η εξέλιξη αυτή παρίσταται στο Διάγραμμα 1.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για να υποθεθεί η εξέλιξη των τελικών τιμών ηλεκτρισμού στο σενάριο αναφοράς περιλάμβανε: α) υπόθεση για την εξέλιξη των τιμών του αργού πετρελαίου, β) εκτίμηση της επίπτωσης των τιμών του αργού πετρελαίου στο κόστος του μαζούτ που προμηθεύεται η Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου (ΑΗΚ) και γ) υπολογισμό της μεταβολής στην τελική τιμή ηλεκτρισμού από τη μεταβολή στο κόστος του μαζούτ. Η υπόθεση για τις διεθνείς τιμές του πετρελαίου βασίστηκε στις υποθέσεις που υιοθέτησε το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ και δημοσίευσε τον Ιούνιο του 2008 (ΕΙΑ 2008). Για το δεύτερο στάδιο που προαναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της μελέτης του 2006, στο πλαίσιο της οποίας έγινε σύντομη οικονομετρική ανάλυση της επίδρασης της τιμής του πετρελαίου στη μέση ετήσια τιμή του μαζούτ που προμηθεύτηκε η ΑΗΚ κατά την περίοδο 1960–2004. Τέλος, σε ό,τι αφορά το τρίτο στάδιο, δηλαδή τον προσδιορισμό της τελικής τιμής του ηλεκτρισμού ως συνάρτηση της μεταβολής του κόστους του μαζούτ, εφαρμόστηκε η ρήτρα καυσίμων που ισχύει στις διατιμήσεις της ΑΗΚ.

Διάγραμμα 1: Συμμετοχή των κύριων κλάδων οικονομικής δραστηριότητας στο ΑΕΠ μέχρι το 2030



Με βάση τη διαδικασία που προαναφέρθηκε, προσδιορίστηκε η τελική τιμή του ηλεκτρισμού έως το έτος 2030 για καθεμία κατηγορία καταναλωτή. Το αποτέλεσμα αυτών των υπολογισμών εμφανίζεται στον Πίνακα 2. Πρέπει να τονισθεί ότι η πρόβλεψη των τιμών του ηλεκτρισμού υπόκειται σε αβεβαιότητες, όπως το επιπλέον κόστος που πρέπει να πληρώσει η ΑΗΚ για τις άδειες εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα, η επίδραση από την εισαγωγή φυσικού αερίου στην ηλεκτροπαραγωγή μετά το 2010, η αυξανόμενη συμμετοχή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ηλεκτρικό σύστημα και η βαθμιαία φιλευλευθεροποίηση της αγοράς ηλεκτρισμού. Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, η πρόβλεψη της κατανάλωσης ηλεκτρισμού δεν αναμένεται να επηρεαστεί αισθητά από αυτές τις αβεβαιότητες λόγω της μικρής επίδρασης των τιμών ηλεκτρισμού στη ζήτηση.

Πίνακας 2: Τιμές ηλεκτρισμού ανά κατηγορία καταναλωτή

	Παρελθόν			Πρόβλεψη		
	2000	2005	2007	2010	2020	2030
Τιμή πετρελαίου (US\$'2006 / βαρέλι)	33,93	56,27	71,83	73,05	58,90	69,51
Τιμή ηλεκτρισμού (Eurocents'2000 / kWh)						
Οικιακοί καταναλωτές	9,77	9,28	10,39	10,58	9,98	10,36
Βιομηχανία	9,21	8,53	9,35	9,54	8,94	9,31
Γεωργία	9,24	8,65	9,51	9,71	9,10	9,48
Εμπορικοί καταναλωτές	11,38	10,14	10,80	10,99	10,39	10,76

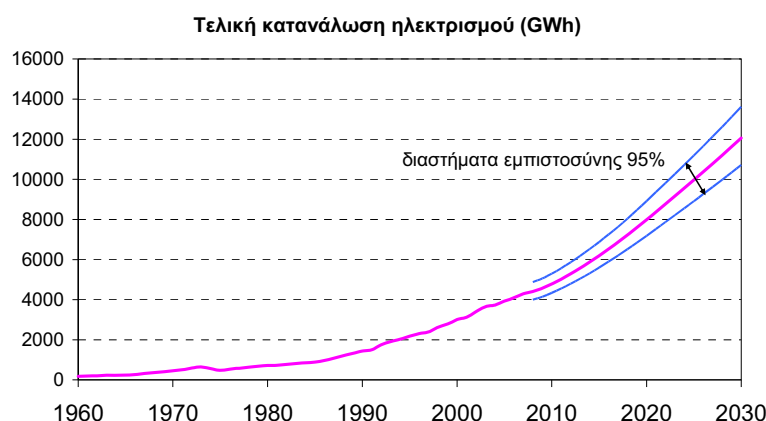
Τέλος, με βάση την καθοδήγηση που μας παρέσχε η Μετεωρολογική Υπηρεσία, στο σενάριο αναφοράς θεωρήθηκε ότι οι συνολικές ετήσιες βαθμο-ημέρες θέρμανσης και ψύξης θα παραμείνουν σταθερές μέχρι το 2030 και ίσες με τον μέσο όρο των βαθμο-ημερών της τελευταίας δεκαετίας. Στο Κεφάλαιο 5 θα γίνουν παραδοχές για μεταβολή των βαθμο-ημερών στο μέλλον ως πιθανή συνέπεια της κλιματικής αλλαγής.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Το Διάγραμμα 2 παρουσιάζει την προβλεπόμενη εξέλιξη της κατανάλωσης ηλεκτρισμού στην Κύπρο έως το 2030, όπως υπολογίστηκε με βάση τις ελαστικότητες του Πίνακα 1. Σύμφωνα με το σενάριο αναφοράς, η συνολική τελική κατανάλωση ηλεκτρισμού το 2030 αναμένεται να ξεπεράσει ελαφρά τις 12000 GWh και να είναι 2,8 φορές υψηλότερη από αυτήν του 2007. Ως συνέπεια των μακροοικονομι-

κών εκτιμήσεων, το μερίδιο της βιομηχανίας και της γεωργίας στην κατανάλωση θα μειωθεί (από 19% το 2007 σε 14% το 2030), με κυρίως «κερδοσμένους» τον οικιακό και τον τριτογενή τομέα, που προβλέπεται να καταναλώνουν το 86% του συνολικού ηλεκτρισμού (έναντι 81% σήμερα). Η κατανάλωση αναμένεται να αυξηθεί με σχετικά υψηλούς ρυθμούς (5,3% ετησίως) κατά τη δεκαετία 2010–2020 λόγω της οικονομικής μεγέθυνσης και των σχετικά χαμηλών τιμών του πετρελαίου στην περίοδο αυτή. Μετά το 2020, οπότε οι τιμές προβλέπεται να αυξηθούν ελαφρά και ο ρυθμός οικονομικής μεγέθυνσης να επιβραδυνθεί, η κατανάλωση ηλεκτρισμού αναμένεται να αυξάνεται με χαμηλότερους ρυθμούς (4,2% ετησίως). Κατά μέσο όρο για όλη την περίοδο 2008–2030, με υποτιθέμενη ετήσια αύξηση του πραγματικού ΑΕΠ 3,5%, η συνολική κατανάλωση ηλεκτρισμού προβλέπεται να αυξάνεται με ρυθμό 1,1% μεγαλύτερο από το ΑΕΠ (4,6% ανά έτος).

Διάγραμμα 2: Πρόβλεψη της τελικής κατανάλωσης ηλεκτρισμού στην Κύπρο έως το έτος 2030



5. ΠΙΘΑΝΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΥΗΜΕΡΙΑ

5.1. Επίδραση στην κατανάλωση ηλεκτρισμού

Σύμφωνα με την πιο πρόσφατη έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής του ΟΗΕ για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC 2007), μέχρι το 2100 η μέση θερμοκρασία της γης είναι πιθανό να αυξηθεί κατά 1,7 έως 4,4 °C.² Η αύξηση αυτή δεν θα είναι ομοιόμορφη σε όλο τον πλανήτη, πάντως στην Ανατολική Μεσόγειο προβλέπεται να κυμανθεί σε αυτά τα επίπεδα (IPCC 2007, Figure SPM.6, σελ. 9). Το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης αυτής αναμένεται να παρατηρηθεί στο δεύτερο μισό του αιώνα, ενώ μέχρι το 2030 προβλέπεται μέση άνοδος της θερμοκρασίας κατά 1°C περίπου (IPCC 2007, Figure SPM.5, σελ. 7). Με βάση τις προβλέψεις αυτές, προσπαθήσαμε να υπολογίσουμε πώς μπορεί να επηρεάσει η άνοδος της θερμοκρασίας την κατανάλωση ηλεκτρισμού στην Κύπρο και τι επίδραση θα έχει στην ευημερία του πληθυσμού. Για τον σκοπό αυτό, υποθέσαμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας θα εξελιχθεί γραμμικά από το 2007 έως το 2030 (δηλαδή 0°C αύξηση το 2007 μέχρι 1°C αύξηση το 2030) και ότι θα είναι ομοιόμορφη τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο κατά τη διάρκεια του έτους.

Για να μετατραπεί η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας σε μεταβολή των βαθμο-ημερών θέρμανσης και ψύξης, που είναι η μεταβλητή την οποία χρησιμοποιούμε, υποτέθηκε ότι για αύξηση της θερμοκρασίας

² Σύμφωνα με το σενάριο A1B του IPCC, που συχνά χρησιμοποιείται από διεθνείς οργανισμούς και αναλυτές ως σενάριο αναφοράς. Βλ. IPCC (2007, Table SPM.1, σελ. 8).

ας κατά 1°C θα έχουμε μείωση κατά μία βαθμο-ημέρα θέρμανσης κάθε μέρα κατά τους μήνες Δεκέμβριο μέχρι και Μάρτιο (όπου η μέση ημερήσια θερμοκρασία στα περισσότερα μέρη της Κύπρου είναι κατά κανόνα κάτω από 17°C), και αύξηση κατά μία βαθμο-ημέρα ψύξης κάθε μέρα κατά τους μήνες Μάιο μέχρι και Οκτώβριο (όπου η μέση ημερήσια θερμοκρασία είναι κατά κανόνα πάνω από 22°C στα περισσότερα μέρη). Έτσι, διενεργήθηκε νέα πρόβλεψη της κατανάλωσης ηλεκτρισμού, όπου υποτέθηκε ότι οι ετήσιες βαθμο-ημέρες αυξάνονται γραμμικά από 1148 (που είναι ο μέσος όρος των ετήσιων βαθμο-ημερών την περίοδο 1988-2007) σε 1211 το έτος 2030. Προφανώς η νέα πρόβλεψη αφορά μόνο τον οικιακό και τον τριτογενή τομέα, όπου διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική επίδραση των καιρικών συνθηκών στη χρήση ηλεκτρισμού.

Από το σενάριο αυτό προκύπτει ότι η κατανάλωση ηλεκτρισμού θα αυξηθεί μέχρι το 2030 κατά 2,9% συνολικά (4,2% στον οικιακό τομέα και 2,5% στον τριτογενή τομέα) σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Η αύξηση θα γίνει περισσότερο αισθητή μετά το 2020, οπότε θα είναι και σχετικά μεγαλύτερη η αύξηση της θερμοκρασίας.

5.2. Επιπτώσεις στην κοινωνική ευημερία

Η αυξημένη κατανάλωση ηλεκτρισμού λόγω της πιθανής ανόδου της θερμοκρασίας στην Κύπρο θα έχει άμεσες επιπτώσεις στην ευημερία των νοικοκυριών και των επιχειρήσεων: εφόσον λ.χ. ένα νοικοκυριό θα δαπανά μεγαλύτερα ποσά για να πετυχαίνει το ίδιο επίπεδο θερμικής άνεσης που θα είχε αν δεν υπήρχε κλιματική αλλαγή, αυτή η επιπλέον δαπάνη θα ισοδυναμεί με την απώλεια ευημερίας του νοικοκυριού. Το κόστος αυτό μπορεί να υπολογιστεί, θεωρώντας κατά προσέγγιση ότι τα νοικοκυριά και οι επιχειρήσεις δεν θα αντιδράσουν μειώνοντας τη χρήση ηλεκτρισμού, πολλαπλασιάζοντας την επιπλέον κατανάλωση ηλεκτρισμού κάθε χρόνο με την προβλεπόμενη λιανική τιμή ηλεκτρισμού εκείνο τον χρόνο, χωριστά για τον οικιακό και τον τριτογενή τομέα. Το αποτέλεσμα των υπολογισμών φαίνεται στον Πίνακα 3: Σε σταθερές τιμές 2007, η συνολική απώλεια ευημερίας εκτιμάται ότι θα ανέλθει σε 15 εκ. Ευρώ το 2020 και 45 εκ. Ευρώ το 2030. Η παρούσα αξία του συνολικού κόστους για την περίοδο 2008-2030 υπολογίζεται σε 239 εκ. Ευρώ. Το μεγαλύτερο μέρος της επιβάρυνσης αναμένεται να το επωμιστούν τα νοικοκυριά· έτσι, παίρνοντας υπόψη τις δημογραφικές προβλέψεις για τη μελλοντική αύξηση του πληθυσμού και την παρατηρούμενη τάση για μείωση του μεγέθους των νοικοκυριών, ανά νοικοκυριό προβλέπεται κατά μέσο όρο κόστος 30 Ευρώ ανά έτος το 2020 και 83 Ευρώ ανά έτος το 2030 (πάντα σε σταθερές τιμές 2007). Πρέπει να τονιστεί ότι η πρόβλεψη αυτή αφορά μια ήπια αύξηση της θερμοκρασίας στην Κύπρο, αφού η περίοδος πρόβλεψής μας φτάνει μέχρι το 2030, ενώ οι μεγάλες αυξήσεις της θερμοκρασίας, σύμφωνα με το IPCC (2007), αναμένονται κατά το δεύτερο μισό του 21ου αιώνα.

Πίνακας 3: Πρόβλεψη του ετήσιου και του συνολικού κόστους από την επιπλέον κατανάλωση ηλεκτρισμού στην Κύπρο έως το 2030 σύμφωνα με το σενάριο κλιματικής αλλαγής

Κόστος (εκ. €'2007)	2010	2015	2020	2025	2030
Οικιακοί καταναλωτές	0,9	4,0	9,5	17,8	29,5
Εμπορικοί καταναλωτές	0,5	2,3	5,4	9,8	15,7
Σύνολο	1,3	6,3	14,9	27,7	45,3
Συνολικό κόστος περιόδου 2008-2030 (παρούσα αξία σε εκ. €'2007):					239,0

Σημείωση: Η παρούσα αξία υπολογίστηκε με προεξοφλητικό επιτόκιο 4%.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πρόβλεψη της κατανάλωσης ηλεκτρισμού αποσκοπεί στην εκπόνηση μακροχρόνιου σχεδιασμού για τη διασφάλιση της απρόσκοπτης τροφοδοσίας σε ηλεκτρική ενέργεια, ιδιαίτερα στην Κύπρο που δεν μπορεί να εισάγει ηλεκτρισμό από άλλες χώρες. Στην εργασία αυτή εξετάστηκε η πιθανή εξέλιξη της κατανάλωσης ηλεκτρισμού στον οικιακό, εμπορικό, βιομηχανικό και γεωργικό τομέα στην Κύπρο έως το 2030, σε συνάρτηση με την εξέλιξη των μακροοικονομικών μεγεθών, των τιμών του πετρελαίου και των καιρικών συνθηκών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, εφόσον συνεχιστούν οι τάσεις που παρατηρήθηκαν κατά τις τελευταίες δεκαετίες και δεν επέλθουν δραματικές αλλαγές στη διάρθρωση της οικονομικής δραστηριότητας και στις διαθέσιμες τεχνολογίες για παραγωγή και χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, η χρήση ηλεκτρισμού αναμένεται να τριπλασιαστεί κατά τα επόμενα 20–25 χρόνια, με αυξανόμενη συμμετοχή των οικιακών καταναλωτών και του τριτογενούς τομέα της οικονομίας.

Εκτός από την ανωτέρω πρόβλεψη, διενεργήθηκε και πρόβλεψη υποθέτοντας σταδιακή μεταβολή των καιρικών συνθηκών λόγω της κλιματικής αλλαγής. Εφαρμόζοντας το οικονομετρικά εκτιμημένο μοντέλο, υπολογίσαμε ότι η κατανάλωση ηλεκτρισμού στην Κύπρο θα αυξηθεί μέχρι το 2030 κατά 2,9% συνολικά (4,2% στον οικιακό τομέα και 2,5% στον τριτογενή τομέα) σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Η αύξηση θα γίνει περισσότερο αισθητή μετά το 2020, οπότε θα είναι και σχετικά μεγαλύτερη η αύξηση της θερμοκρασίας. Οι αυξημένες ανάγκες χρήσης ηλεκτρισμού αναμένεται να οδηγήσουν σε άμεσο κόστος (απώλεια ευημερίας) 15 εκ. Ευρώ το 2020 και 45 εκ. Ευρώ το 2030, ενώ η παρούσα αξία του συνολικού κόστους για την περίοδο 2008-2030 υπολογίζεται σε 239 εκ. Ευρώ (όλα σε σταθερές τιμές 2007). Το μεγαλύτερο μέρος της επιβάρυνσης αναμένεται να το επωμιστούν τα νοικοκυριά, με μέσο κόστος ανά νοικοκυριό 30 Ευρώ ανά έτος το 2020 και 83 Ευρώ ανά έτος το 2030 (σε τιμές 2007).

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι ανωτέρω προβλέψεις υπόκεινται σε αβεβαιότητες, οι οποίες σχετίζονται κυρίως με την αβεβαιότητα στις οικονομικές εξελίξεις, που έχουν πολύ σημαντική επίδραση στην κατανάλωση ηλεκτρισμού, αλλά και με την άγνωστη μέχρι στιγμής επίδραση στις τελικές τιμές από συνδυασμό παραγόντων όπως η υποχρέωση της ΑΗΚ να αγοράζει δικαιώματα εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, η σταδιακή φιλελευθεροποίηση της αγοράς ηλεκτρισμού και η εισαγωγή του φυσικού αερίου και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή. Υπάρχει επίσης μεγάλη αβεβαιότητα σχετικά με την επίδραση των κλιματικών αλλαγών στις καιρικές συνθήκες της Κύπρου. Σε κάθε περίπτωση, οι προβλέψεις πρέπει να χρησιμοποιούνται όχι ως ακριβείς προγνώσεις, αλλά ως εργαλεία για την υποστήριξη του μακροχρόνιου ενεργειακού σχεδιασμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ζαχαριάδης Θ. (2006), Μακροχρόνια πρόβλεψη της κατανάλωσης ηλεκτρισμού στην Κύπρο: Σενάρια και αβεβαιότητες. Δοκίμιο Οικονομικής Πολιτικής 09-06, Κέντρο Οικονομικών Ερευνών, Πανεπιστήμιο Κύπρου, Ιούλιος 2006.

<http://www.erc.ucy.ac.cy/greek/publications.html>

Στατιστική Υπηρεσία (2007), Στατιστικές Βιομηχανίας 2006, Λευκωσία.

Clements M.P. and Madlener R. (1999), Seasonality, cointegration, and forecasting UK residential energy demand. *Scottish Journal of Political Economy*, Vol. 46, No. 2, 185–206.

EIA (US Department of Energy, Energy Information Administration) (2008), Annual Energy Outlook 2008, Report DOE/EIA-0383(2008), Washington, DC, June 2008. <http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/index.html>

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007), Climate Change 2007: Synthesis Report – Summary for Policymakers.
http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_spm.pdf
- Pesaran M.H. and Shin Y. (1999), An Autoregressive Distributed Lag Modelling Approach to Cointegration Analysis. In: Strøm S, editor. *Econometrics and economic theory in the twentieth century: the Ragnar Frisch Centennial Symposium*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- Pesaran M.H., Shin Y. and Smith R.J. (2001), Bounds Testing Approaches to the Analysis of Level Relationships. *Journal of Applied Econometrics* 16: 289–326.
- Zachariadis T. (2006), An empirical time series analysis of energy consumption in Cyprus. *Economic Analysis Paper 01-06*, Economics Research Centre, University of Cyprus. <http://www.erc.ucy.ac.cy/greek/publications.html>

ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΑΠΕ ΣΤΟΝ ΟΙΚΙΑΚΟ-ΞΕΝΟΔΟΧΕΙΑΚΟ ΤΟΜΕΑ ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ

Σιδηρόπουλος Χ.¹, Τσιλιγκιρίδης Γ.¹, Πενταλιώτης Α.¹, Ευρυπίδου Χ.¹,
Παπασταύρος Κ.², Μεσημέρης Θ.², Παπασταύρου Μ.²

¹Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ, 54 124, Θεσσαλονίκη, e-mail: csidirop@auth.gr

²ΟΙΚΟΓΝΩΣΙΑ, Κέντρο Περιβαλλοντικής Έρευνας και Πληροφόρησης

Λεωφ. Μακεδονίτισης 46, 24 005, Λευκωσία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία διερευνώνται οι δυνατότητες χρήσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην Κύπρο ώστε να περιοριστεί η συμβολή στην αέρια ρύπανση τομέων που καταναλώνουν ενέργεια. Αρχικά παρουσιάζεται απογραφή εκπομπών αερίων ρύπων που αποτυπώνει την υφιστάμενη κατάσταση αναφορικά με τους ρύπους CO₂, SO₂, NO_x, CH₄, NMVOC, CO και N₂O για το έτος αναφοράς 2002 που βασίστηκε στη γενική μεθοδολογία EMEP/CORINAIR της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος. Οι τομείς με τη μεγαλύτερη συμμετοχή στις συνολικές εκπομπές είναι η ηλεκτροπαραγωγή και οι οδικές μεταφορές που συνέβαλαν αντίστοιχα κατά 36% και 29% στις εκπομπές CO₂, κατά 62% και 22% στις εκπομπές SO₂, κατά 20% και 35% στις εκπομπές NO_x και κατά 55% και 6% στις εκπομπές N₂O. Η συμβολή του Οικιακού-Ξενοδοχειακού τομέα (θέρμανση χώρου) στις άμεσες εκπομπές είναι σχετικά μικρή (7% στο CO₂, 6% στο SO₂, 1% στα NO_x και 2% στο N₂O), αλλά μεγάλη στις έμμεσες εκπομπές λόγω κατανάλωσης σημαντικού μεριδίου (~34%) της ηλεκτρικής ενέργειας και συγκεκριμένα 12%, 21%, 7%, 19% των συνολικών εκπομπών CO₂, SO₂, NO_x, N₂O αντίστοιχα. Τα περιθώρια μείωσης των εκπεμπόμενων ρύπων μέσω της διεύθυνσης των ΑΠΕ στο ενεργειακό σύστημα της Κύπρου είναι σημαντικά: για διεύθυνση 6% ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή προκύπτει μείωση των εκπομπών κατά 2,2% για το CO₂, 3,7% για το SO₂, 1,2% για τα NO_x και 3,3% για το N₂O. Τέλος, παρουσιάζονται οι δυνατότητες εφαρμογών ΑΠΕ στον Οικιακό-Ξενοδοχειακό τομέα που συμβάλουν στη μείωση των εκπομπών μέσω της άμεσης και έμμεσης υποκατάστασης ηλεκτρικής ή/και θερμικής ενέργειας.

Λέξεις-κλειδιά: Αέρια Ρύπανση, ΑΠΕ, Απογραφή εκπομπών, Κύπρος, Οικιακός-Ξενοδοχειακός τομέας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αρνητικές επιδράσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στον άνθρωπο και το περιβάλλον του επιτάσσουν τον περιορισμό των εκπομπών ρύπων στην ατμόσφαιρα. Κάθε προτεινόμενη στρατηγική αντιρρύπανσης πρέπει να έχει δυναμικό χαρακτήρα, να διακρίνεται από συνέχεια και συνέπεια και να βασίζεται σε ένα πρόγραμμα συντονισμένων μέτρων των οποίων η αποτελεσματικότητα να αποτελεί γνώμονα για τη βαθμιαία βελτιστοποίησή τους. Μια τέτοια στρατηγική πρέπει να εμπεριέχει δυναμικές τράπεζες δεδομένων εκπομπών ρύπων όπως επίσης και στοιχεία τοπογραφίας, μετεωρολογίας και επιπέδων ρύπανσης. Η γνώση των

δεδομένων αυτών, ιδιαίτερα των επιπέδων των εκπομπών, αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη βέλτιστη επιλογή επεμβάσεων.

Μια επιλογή προς αυτήν την κατεύθυνση αποτελεί η χρήση των ΑΠΕ, οι οποίες έχουν αναγνωριστεί διεθνώς ως σημαντικό μέσο για την προώθηση βιώσιμης και αειφόρου ανάπτυξης, για την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος, για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και ως μέσο για απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Εξάλλου, η προώθηση των συστημάτων αξιοποίησης των ΑΠΕ στο δομημένο αστικό περιβάλλον, εκτός των προφανών πλεονεκτημάτων της καθαρής παραγωγής ενέργειας, οδηγεί και στη μεταφορά της παραγωγής όσο το δυνατό πιο κοντά στην κατανάλωση αμβλύνοντας προβλήματα μεταφοράς και διανομής ενέργειας.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται απογραφή εκπομπών αερίων ρύπων στην Κύπρο και εξετάζονται οι δυνατότητες μείωσης των εκπομπών αυτών μέσω της υποκατάστασης από ΑΠΕ συμβατικά παραγόμενου ηλεκτρισμού και ειδικότερα οι δυνατότητες εφαρμογών ΑΠΕ στον Οικιακό-Ξενοδοχειακό Τομέα που συμβάλουν στη μείωση των εκπομπών μέσω της άμεσης και έμμεσης υποκατάστασης ηλεκτρικής ή/και θερμικής ενέργειας.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η εκτίμηση των εκπομπών βασίστηκε στη γενική μεθοδολογία EMEP/CORINAIR της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος (EEA) [1]. Οι εκπεμπόμενες ποσότητες ρύπων (Q) εξαρτώνται από το μέγεθος δραστηριότητας (Δ) και από ένα συντελεστή εκπομπής (EF), ο οποίος καθορίζει τη γραμμική σχέση ανάμεσα στα Q και Δ βάσει της σχέσης:

$$Q_{s,i,j,k} = 10^{-6} \times EF_{s,i,j,k} \times \Delta_{s,i,j} \quad [t/yr]$$

s	δείκτης που αναφέρεται στη θεωρούμενη <u>πηγή ρύπανσης</u>
i	δείκτης που αναφέρεται στη θεωρούμενη <u>τεχνολογία</u> (μεγάλη βιομηχανική μονάδα, τύπος οχήματος, τύπος αεροπλάνου, κτλ.)
j	δείκτης που αναφέρεται στη <u>δραστηριότητα</u> (καύση Diesel, Μαζούτ, οχηματοχιλιόμετρα, προσγειώσεις αεροπλάνων, παραγωγή προϊόντων, κτλ.)
k	δείκτης που αναφέρεται στον εκπεμπόμενο <u>ρύπο</u>
$Q_{s,i,j,k}$	εκπεμπόμενη <u>ποσότητα του ρύπου</u> k σε t/yr, από την πηγή s, την τεχνολογία i και τη δραστηριότητα j
$EF_{s,i,j,k}$	<u>συντελεστής εκπομπής</u> για το ρύπο k, τη δραστηριότητα j και την τεχνολογία i εκφρασμένος σε g/GJ ή σε g/vehkm ή σε g/t ή g/LTO
$\Delta_{s,i,j}$	<u>μέγεθος δραστηριότητας</u> , εκφραζόμενο σε GJ/yr ή σε vehkm/yr ή σε t/yr ή σε LTO/yr για την πηγή s, την τεχνολογία i και τη δραστηριότητα j

Το μέγεθος δραστηριότητας για κάθε πηγή ρύπανσης λήφθηκε κυρίως από στατιστικές επετηρίδες των υπηρεσιών της Κύπρου και δευτερευόντως από επιστημονικές δημοσιεύσεις, έρευνα στο διαδίκτυο, προσωπική επικοινωνία με υπευθύνους εργοστασίων, κτλ. Ο Πίνακας 1 συνοψίζει τις δραστηριότητες εκπομπής αερίων ρύπων που εξετάστηκαν, τα βασικά δεδομένα για τον υπολογισμό καθώς και τις πηγές από τις οποίες αυτά αντλήθηκαν. Οι συντελεστές εκπομπής που χρησιμοποιήθηκαν λήφθηκαν από το Εγχειρίδιο Απογραφής Εκπομπών Ατμοσφαιρικών Ρύπων της EEA [1] και, όπου αυτό ήταν εφικτό, έγινε χρήση συντελεστών εκπομπής αντιπροσωπευτικών για την Κυπριακή πραγματικότητα [2].

Πίνακας 1. Βασικά δεδομένα και πηγές προέλευσης αυτών ανά δραστηριότητα εκπομπής αερίων ρύπων στην Κύπρο (2002).

Δραστηριότητα	Απαιτούμενα Δεδομένα	Πηγές Δεδομένων
Ηλεκτροπαραγωγή	Τεχνικά χαρακτηριστικά μονάδων Κατανάλωση καυσίμων	ΑΗΚ ΣΥΚ-Πωλήσεις και αποθέματα πετρελαιοειδών
Διύλιση αργού	Τεχνικά χαρακτηριστικά μονάδων Κατανάλωση καυσίμων Ισοζύγιο πετρελαίου	Διυλιστήριο* Κύπρου
Τσιμεντοπαραγωγή	Παραγωγή τσιμέντου Κατανάλωση καυσίμων	ΚΕΤ-Τσιμεντοποιείο Μονής
Καύση σε άλλες μεγάλες μονάδες	Κατανάλωση καυσίμων	ΣΥΚ-Πωλήσεις και αποθέματα πετρελαιοειδών
Καύση σε μικρές μονάδες	Κατανάλωση καυσίμων	
Θέρμανση χώρου (οικίες, γραφεία, ξενοδοχεία)	Κατανάλωση καυσίμων	
Διεργασίες παραγωγής	Παραγωγή προϊόντων	ΣΥΚ-Στατιστικές Βιομηχανίας
Διανομή βενζίνης	Κατανάλωση βενζίνης ανά δραστηριότητα (αποθήκευση, μεταφορά, διανομή)	ΣΥΚ-Πωλήσεις και αποθέματα πετρελαιοειδών
Χρήση διαλυτών	Εισαγωγές, εξαγωγές, Παραγωγή συναφών ενώσεων και προϊόντων	ΣΥΚ-Επετηρίδα Εισαγωγών & Εξαγωγών
Γεωργία - Κτηνοτροφία	Χρήση λιπασμάτων, Αριθμός ζώων	ΣΥΚ-Γεωργικές Στατιστικές
Οδικές μεταφορές	Κατανομές οχημάτων ανά ηλικία, κατηγορία, κυβισμό και επαρχία	ΣΥΚ-Στατιστικές Μεταφορών
Θαλάσσιες μεταφορές	Αφίξεις/αναχωρήσεις πλοίων	ΑΛΚ-Ετήσια αναφορά
Εναέριες μεταφορές	Αφίξεις/αναχωρήσεις αεροπλάνων	ΠΑΚ-Ετήσια αναφορά
Εκτός δρόμου οχήματα και μηχανήματα	Εισαγωγές, εξαγωγές οχημάτων & μηχανημάτων	Τελωνείο Κύπρου

ΣΥΚ: Στατιστική Υπηρεσία Κύπρου

ΑΛΚ: Αρχή Λιμένων Κύπρου

ΚΕΤ: Κυπριακή Εταιρία Τσιμέντου

* εκτός λειτουργίας από το 2004

ΑΗΚ: Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου

ΠΑΚ: Πολιτική Αεροπορία Κύπρου

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟΓΡΑΦΗΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Στον Πίνακα 2 παρατίθεται η συμβολή κάθε πηγής στις συνολικές εκπομπές κάθε ρύπου που εξετάστηκε. Οι τομείς με τη μεγαλύτερη συμμετοχή στις συνολικές εκπομπές αερίων ρύπων είναι η ηλεκτροπαραγωγή και οι οδικές μεταφορές (36% και 29% στις συνολικές εκπομπές CO₂ αντίστοιχα). Προκύπτει ακόμη ότι η συμβολή του Οικιακού-Ξενοδοχειακού τομέα (θέρμανση χώρου) στις συνολικές εκπομπές είναι σχετικά μικρή (συγκεκριμένα 7% στο CO₂, 6% στο SO₂, 1% στα NO_x και 2% στο N₂O).

Πίνακας 2. Εκπομπές αερίων ρύπων ανά πηγή στην Κύπρο (2002) [3].

Δραστηριότητα	CO ₂	SO ₂	NO _x	NM VOC	CH ₄	CO	N ₂ O
Ηλεκτροπαραγωγή	36,0%	61,6%	19,6%	1,8%	0,2%	1,4%	55,1%
Διύλιση αργού	1,2%	1,6%	0,8%	0,1%	0,1%	0,5%	0,5%
Τσιμεντοπαραγωγή	7,4%	6,9%	4,3%	0,2%	0,3%	0,6%	1,5%
Καύση σε άλλες μεγάλες μονάδες	7,6%	0,3%	0,4%	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%
Καύση σε μικρές μονάδες	6,8%	0,7%	0,3%	0,0%	0,0%	0,1%	0,6%
Θέρμανση χώρου (οικίες, γραφεία, ξενοδοχεία)	6,7%	5,5%	0,9%	0,5%	0,2%	0,9%	1,9%
Διεργασίες παραγωγής				12,7%			
Διανομή βενζίνης				4,6%			
Χρήση διαλυτών				12,5%			
Γεωργία - Κτηνοτροφία			1,9%		96,0%		23,2%
Οδικές μεταφορές	28,7%	21,9%	35,2%	47,8%	2,7%	78,8%	5,6%
Θαλάσσιες μεταφορές	0,2%	0,1%	1,0%	0,1%	0,0%	0,1%	0,0%
Εναέριες μεταφορές	0,2%	0,1%	1,0%	0,9%	0,1%	1,0%	0,1%
Εκτός δρόμου οχήματα και μηχανήματα	5,2%	1,4%	34,4%	18,8%	0,3%	16,4%	11,5%
ΣΥΝΟΛΟ [kt/yr]	8.277	50	41	21	15	55	3

Δεδομένου όμως ότι ο Οικιακός-Ξενοδοχειακός τομέας καταναλώνει σημαντικό μερίδιο (~34%) της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως φαίνεται και από τα στοιχεία του Πίνακα 3, του αναλογεί ένα επιπλέον ποσοστό 12,3%, 20,9%, 6,7% και 18,7% των συνολικών εκπομπών CO₂, SO₂, NO_x και N₂O αντίστοιχα.

Πίνακας 3. Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά τομέα χρήσης στην Κύπρο [4].

ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	3.785 GWh
ΤΕΛΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	3.401 GWh
Οικιακή χρήση – Ξενοδοχεία	34,0%
<i>εκ των οποίων Ξενοδοχεία</i>	8,0%
Εμπορική	40,6%
Βιομηχανική	20,8%
Γεωργική	3,0%
Οδικός φωτισμός	1,6%

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζεται αναλυτικά το αποτέλεσμα της αναγωγής των ρύπων της ηλεκτροπαραγωγής στο σύνολο των εκπομπών.

Πίνακας 4. Κατανομή των ρύπων της ηλεκτροπαραγωγής ανά τομέα χρήσης.

Χρήση	CO ₂	SO ₂	NO _x	NMVOC	CH ₄	CO	N ₂ O
Οικιακή	9,36%	16,02%	5,10%	0,47%	0,05%	0,36%	14,33%
Ξενοδοχεία	2,88%	4,93%	1,57%	0,14%	0,02%	0,11%	4,41%
Εμπορική	14,63%	25,04%	7,97%	0,73%	0,08%	0,57%	22,40%
Βιομηχανική	7,48%	12,81%	4,07%	0,37%	0,04%	0,29%	11,46%
Γεωργική	1,07%	1,83%	0,58%	0,05%	0,01%	0,04%	1,64%
Οδικός φωτισμός	0,57%	0,98%	0,31%	0,03%	0,00%	0,02%	0,88%

Συνεπώς, η συμμετοχή των «ολικών» (άμεσων και έμμεσων) εκπομπών αερίων ρύπων του Οικιακού-Ξενοδοχειακού τομέα στις συνολικές εκπομπές ανέρχεται τελικά στο 19,0%, 26,4%, 7,6%, 1,1%, 0,3%, 1,4% και 20,6% των εκπομπών CO₂, SO₂, NO_x, NMVOC, CH₄, CO και N₂O αντίστοιχα.

4. ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΠΕ ΣΤΟ ΚΥΠΡΙΑΚΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτουν σημαντικά περιθώρια μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και γενικά περιορισμού της συμβολής στην ατμοσφαιρική ρύπανση τομέων που καταναλώνουν ενέργεια μέσω της διείσδυσης των ΑΠΕ στο ενεργειακό σύστημα της Κύπρου. Συγκεκριμένα για ποσοστό διείσδυσης 6% ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, στόχος που έχει τεθεί για την Κύπρο από την Ευρωπαϊκή Ένωση για το 2010 [5], επιφέρει μείωση των εκπομπών κατά 2,2% για το CO₂, 3,7% για το SO₂, 1,2% για τα NO_x και 3,3% για το N₂O (Πίνακας 5).

Πίνακας 5. Μείωση εκπομπών λόγω υποκατάστασης ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ.

Ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ	CO ₂	SO ₂	NO _x	NMVOC	CO	N ₂ O
6%	2,2%	3,7%	1,2%	0,1%	0,1%	3,3%
10%	3,6%	6,2%	2,0%	0,2%	0,1%	5,5%

Οι δυνατότητες εφαρμογών ΑΠΕ ιδιαίτερα στον Οικιακό-Ξενοδοχειακό τομέα είναι πολλές και ποικίλες και για το λόγο αυτό γίνεται ιδιαίτερη μνεία σε αυτόν. Ως σημαντικότεροι τρόποι που υποκαθιστούν θερμική ενέργεια και ηλεκτρισμό και προσφέρουν δυνατότητες επιπλέον μείωσης των εκπομπών αναφέρονται οι εξής:

1) Υποκατάσταση θερμικής ενέργειας:

- Βιοκλιματικός σχεδιασμός
 - Ηλιακή
 - Γεωθερμία
 - Αβαθής Γεωθερμία
- Σχεδίαση, συστήματα, υλικά
Ηλιακά συστήματα θέρμανσης
Συμβατικά συστήματα θέρμανσης
Γεωεναλλάκτες/αντλίες θερμότητας

2) Άμεση υποκατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας:

- Αιολική
 - Ηλιακή
- Ανεμογεννήτριες
Φωτοβολταϊκά

3) Έμμεση υποκατάσταση ηλεκτρικής για θέρμανση, δροσισμό, φωτισμό:

- | | |
|----------------------------|----------------------------------|
| • Βιοκλιματικός σχεδιασμός | Σχεδίαση, συστήματα, υλικά |
| • Ηλιακή | Ηλιακά συστήματα ψύξης |
| • Αβαθής Γεωθερμία | Γεωεναλλάκτες/αντλίες θερμότητας |

Η ποσοτικοποίηση αυτών των επεμβάσεων είναι ζήτημα πολιτικών αποφάσεων με μέτρα οικονομικής ενίσχυσης, επιδοτήσεων, φορολογικών ελαφρύνσεων, κτλ.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η απογραφή εκπομπών που παρουσιάστηκε για την Κύπρο είναι «ανοικτή», δηλ. τα στοιχεία μπορούν να επικαιροποιούνται και παρέχει τη δυνατότητα παρακολούθησης της εξέλιξης των επιπέδων ρύπανσης ως συνάρτηση πιθανών διαρθρωτικών ή/και χωροταξικών μεταβολών. Παράλληλα, είναι εφικτή η εξακρίβωση της αποτελεσματικότητας συγκεκριμένων μέτρων αντιρύπανσης, ώστε να είναι εκ των προτέρων δυνατή η συνολική τους αξιολόγηση, (λ.χ. διείσδυση ΑΠΕ στον Οικιακό/Ξενοδοχειακό τομέα, αλλαγή τύπου και σύστασης καυσίμων, κτλ.).

Οι τομείς με τη μεγαλύτερη συμμετοχή στις συνολικές εκπομπές αέριων ρύπων είναι η ηλεκτροπαραγωγή και οι οδικές μεταφορές (36% και 29% στις συνολικές εκπομπές CO₂ αντίστοιχα). Η άμεση συμβολή του Οικιακού-Ξενοδοχειακού τομέα (θέρμανση χώρου) στις συνολικές εκπομπές είναι σχετικά μικρή (7% για το CO₂). Δεδομένου ότι ο Οικιακός-Ξενοδοχειακός τομέας καταναλώνει σημαντικό μερίδιο (περίπου το 1/3) της ηλεκτρικής ενέργειας, είναι υπεύθυνος για μεγαλύτερο ποσοστό των συνολικών εκπομπών, δηλ. και για το ποσοστό της ηλεκτροπαραγωγής που του αναλογεί (19% για το CO₂). Η διείσδυση των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή κατά 6% (στόχος που έχει τεθεί για την Κύπρο το 2010) ή 10% επιφέρει μείωση των συνολικών εκπομπών CO₂ της τάξης του 2,2% ή 3,6% αντίστοιχα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μέρος της εργασίας υλοποιήθηκε στα πλαίσια του διακρατικού ερευνητικού έργου «Χαρτογραφική απεικόνιση εκπομπών αέριων ρύπων στην Κύπρο», με φορείς υλοποίησης το Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΑΠΘ και το Κέντρο Περιβαλλοντικής Έρευνας και Πληροφόρησης ΟΙΚΟΓΝΩΣΙΑ της Κύπρου και χρηματοδότηση από τη ΓΓΕΤ (Ελλάδα) και το ΙΠΕ (Κύπρος) .

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. EMEP/CORINAIR, 'Atmospheric Emission Inventory Guidebook', 3rd edition Copenhagen: European Environmental Agency, 2007.
2. Υπουργείο Εργασίας και Κοινωνικών Ασφαλίσεων, Τμήμα Επιθεώρησης Εργασίας, Κατάλογος συντελεστών εκπομπής Κυπριακών μονάδων, 2006
3. ΓΓΕΤ, Τελική Έκθεση Προγράμματος Διακρατικής Συνεργασίας Ελλάδας-Κύπρου, 2006.
4. EUROSTAT, 'Energy Electricity generation data for member states', 2003.
5. Kassinis, S., 'Analysis of Cyprus success in meeting the national indicative targets for production of electricity from Renewable Energy Sources', 2007. URL: http://www.mcit.gov.cy/mcit/mcit.nsf/dmlindex_gr/dmlindex_gr?OpenDocument.

ΑΥΞΗΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΑΠΕ ΣΕ ΝΗΣΙΩΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΣΩ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ

E. Stamatakis^a, A. Tsikalakis^b, G. Tzamalis^a, E.I. Zoulias^a, E. Varkarakī^a, G. Caralis^b, P. Coroyiannakis^c, N. Chatziargiriou^b, S. Suárez García^d, D. Henriquez^d, M.-E. Delenta^e

^aCentre for Renewable Energy Sources, Pikermi, Greece

^bNational Technical University of Athens, Zografou, Athens, Greece

^cWestern Isles Council– ISLENET, Stornoway - Isle of Lewis, United-Kingdom

^dCanary Islands Institute of Technology, Las Palmas de Gran Canaria, Spain

^eCyprus Energy Regulatory Authority, Nicosia, Cyprus

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μία από τις πιο ελπιδοφόρες εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας σε συνδυασμό με τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι σε συστήματα διάσπαρτης παραγωγής ισχύος, όπως τα αυτόνομα νησιωτικά δίκτυα. Προκειμένου να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος κρίνεται απαραίτητη η εκτέλεση αναλυτικών προσομοιώσεων συγκεκριμένων περιπτώσεων χρησιμοποιώντας κάθε φορά τα κατάλληλα υπολογιστικά εργαλεία. Για το σκοπό αυτό, στα πλαίσια του έργου STORIES, το οποίο συγχρηματοδοτείται από το πρόγραμμα «Intelligent Energy – Europe» της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έχουν επιλεγεί συγκεκριμένα νησιωτικά συστήματα τα οποία θα μελετηθούν ως προς τη δυνατότητα διείσδυσης των ΑΠΕ μέσω διαφορετικών εφαρμογών αποθήκευσης ενέργειας ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε νησιού. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα πρωταρχικά αποτελέσματα από τις περιπτώσεις εκείνες που βρίσκονται στο στάδιο της ολοκλήρωσής τους και συγκεκριμένα όσον αφορά τη Μήλο και την Κύπρο.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κύριος σκοπός του έργου STORIES, το οποίο ξεκίνησε την 1^η Νοεμβρίου 2007 έχοντας συνολική διάρκεια 30 μήνες και συγχρηματοδοτείται από το πρόγραμμα «Intelligent Energy – Europe» της Ευρωπαϊκής Ένωσης, είναι να διευκολύνει τη διείσδυση των ΑΠΕ σε νησιά, μέσω τροποποιήσεων στο νομοθετικό και ρυθμιστικό πλαίσιο, οι οποίες θα προωθήσουν τις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας. Το τελικό παραδοτέο του προγράμματος θα είναι η ανάπτυξη ενός **Οδικού Χάρτη για την υιοθέτηση υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ – τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας**. Τα συμπεράσματα του STORIES θα μπορούν εύκολα να μεταφερθούν και να αναπαραχθούν σε ένα ευρύτερο πεδίο στο μέλλον. Οι αλλαγές στα εθνικά ρυθμιστικά πλαίσια σχετιζόμενες με την προώθηση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε συνδυασμό με εγκαταστάσεις ΑΠΕ, θα είναι δυνατό να αναπαραχθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να υποστηρίξουν παρόμοιες αλλαγές σχετικές με τα συστήματα παραγωγής κατανεμημένης ισχύος γενικότερα, οδηγώντας σε ακόμα μεγαλύτερη δυνατότητα εκμετάλλευσης των ΑΠΕ σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Για το σκοπό αυτό έχουν επιλεγεί συγκεκριμένα νησιωτικά συστήματα τα οποία θα μελετηθούν ως προς τη δυνατότητα διείσδυσης των ΑΠΕ μέσω διαφορετικών εφαρμογών αποθήκευσης ενέργειας ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε νησιού. Στον Πίνακα 1 αναφέρονται όλες οι περιπτώσεις (νησιά και τεχνολογίες αποθήκευσης) που πρόκειται να μελετηθούν στα πλαίσια του έργου STORIES. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα πρωταρχικά αποτελέσματα από τις περιπτώσεις εκείνες που βρίσκονται στο στάδιο της ολοκλήρωσής τους και συγκεκριμένα όσον αφορά η νήσο Μήλο (υδρογόνο, αφαλάτωση) και την Κύπρο (αφαλάτωση).

Πίνακας 1: Μελέτη Περιπτώσεων				
	Μπαταρίες	Αντλαιοσταμείωση	Υδρογόνο	Αφαλάτωση
Ισπανία	La Graciosa			
Ελλάδα		Τος	Μήλος	Μήλος
Κροατία	Mljet			Mljet
Πορτογαλία		Corvo		
Ιταλία	San Pietro		San Pietro	
Κύπρος		Κύπρος		Κύπρος

3. ΥΔΡΟΓΟΝΟ

Το Τμήμα Τεχνολογιών ΑΠΕ & Υδρογόνου του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), το οποίο είναι ο συντονιστής του έργου STORIES, έχει αναλάβει τις αναλυτικές τεchnο-οικονομικές αναλύσεις των συστημάτων ΑΠΕ & Υδρογόνου με χρήση κατάλληλων υπολογιστικών εργαλείων (HOMER). Στα πλαίσια αυτών των αναλύσεων γίνεται οικονομική βελτιστοποίηση και προσομοιώσεις του προτεινόμενου συστήματος καθώς και αναλύσεις ευαισθησίας για τους παράγοντες που επηρεάζουν την οικονομικότητα των προτεινόμενων λύσεων. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα να γίνει συγκριτική αξιολόγηση του προτεινόμενου συστήματος ΑΠΕ & Υδρογόνου και αντίστοιχων συμβατικών συστημάτων [1].

3.1. Εφαρμογή στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) της Μήλου.

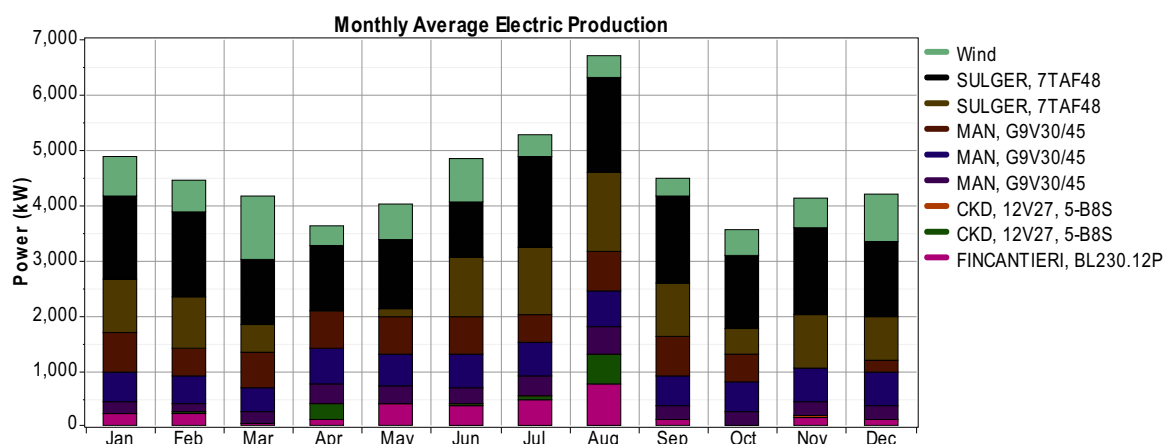
Η Μήλος είναι ένα ελληνικό νησί στο νοτιοδυτικό τμήμα της χώρας, το οποίο ανήκει στο νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων. Ο πληθυσμός του νησιού ανέρχεται περίπου στα 5000 άτομα, ενώ κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού το νούμερο αυτό σχεδόν πενταπλασιάζεται εξαιτίας του τουρισμού. Συνολικά στο νησί είναι εγκατεστημένες 13 ηλεκτρογεννήτριες, 5 από τις οποίες νοικιάζονται το καλοκαίρι. Η μια από τις ενοικιαζόμενες, συνδέεται και το 2^ο τρίμηνο του χρόνου στο σύστημα του νησιού λόγω συντήρησης των μόνιμων γεννητριών. Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των γεννητριών [2]. Θα πρέπει στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι, όπως προκύπτει από την ανάλυση του υπάρχοντος συστήματος, τα Ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη (H/Z) που νοικιάζονται τους καλοκαιρινούς μήνες έχουν μεγαλύτερο βάρος στην ένταξη τους στην παραγωγή κάθε φορά. Δηλαδή, το σύστημα επιλέγει να λειτουργήσουν αυτά πρώτα και στην συνέχεια να μουν σε λειτουργία οι μόνιμα εγκατεστημένες μηχανές. Αυτό είναι πολιτική της εταιρείας ηλεκτρισμού ώστε να μην επιβαρύνονται οι μονάδες της ενώ έχει ενοικιάσει ζεύγη. Εξάλλου, στη Μήλο λειτουργεί αιολικό πάρκο συνολικής δυναμικότητας 2015 kW αποτελούμενο από δύο ανεμογεννήτριες τύπου Vestas V-44 των 600 kW έκαστη και μία τύπου Vestas V-52 των 850kW.

Πίνακας 2: Δεδομένα εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Μήλου					
A/A	Τύπος Μονάδας	Εγκατεστημένη ισχύς (kVA)	Μέγιστη ενεργός Ι-σχύς (kW)	Τύπος καυσίμου	Τεχνικό ελάχιστο (kW)
1	SULZER,	2.224	1.750	Μαζούτ	880
2	SULZER,	2.224	1.750	Μαζούτ	880
3	MAN	965	700	Μαζούτ	350
4	MAN	965	700	Μαζούτ	350
5	MAN	965	700	Μαζούτ	350
6	CKD	2.600	2.000	Diesel	1000
7	CKD	2.600	1.900	Diesel	1000
8	FINCANTIERI	2.217	1.750	Diesel	850
	Σύνολο	14.760	11.250		

Στη συνέχεια θα γίνει μία ανάλυση του υπάρχοντος συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θα επιχειρηθεί μια εκτίμηση της επίδρασης που θα έχει η εισαγωγή υδρογόνου στο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού (η εκτίμηση αυτή θα γίνει υποθέτοντας ότι το 10% της μέγιστης ημερήσιας ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια του νησιού θα προέρχεται από την επαναχρησιμοποίηση του υδρογόνου σε κυψέλες καυσίμου), στο κόστος της παραγόμενης ενέργειας καθώς και μείωση των ατμοσφαιρικών ρύπων.

Υπάρχον ΣΗΕ – Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη Μήλο καταναμετημένη ανά μονάδα ηλεκτροπαραγωγής.



Εικόνα 1: Μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα ηλεκτροπαραγωγής

Στην παρούσα κατάσταση το κόστος ενέργειας μετά την εξομάλυνση του συστήματος ανέρχεται στα 0,157 €/kWh, με ποσοστό χρησιμοποίησης ΑΠΕ 13 %. Οι εκπομπές ρύπων από τη λειτουργία του παραπάνω συστήματος κατά τη διάρκεια του έτους φαίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Εκπομπές ρύπων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής	
Ρυπαντής	Εκπομπές (kg/yr)
Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	26.934.542
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	57.360
Άκαυτοι υδρογονάνθρακες	6.354
Αιωρούμενα σωματίδια (PM)	4.324
Διοξείδιο του θείου (SO ₂)	524.780
Οξείδια του αζώτου (NO _x)	511.827

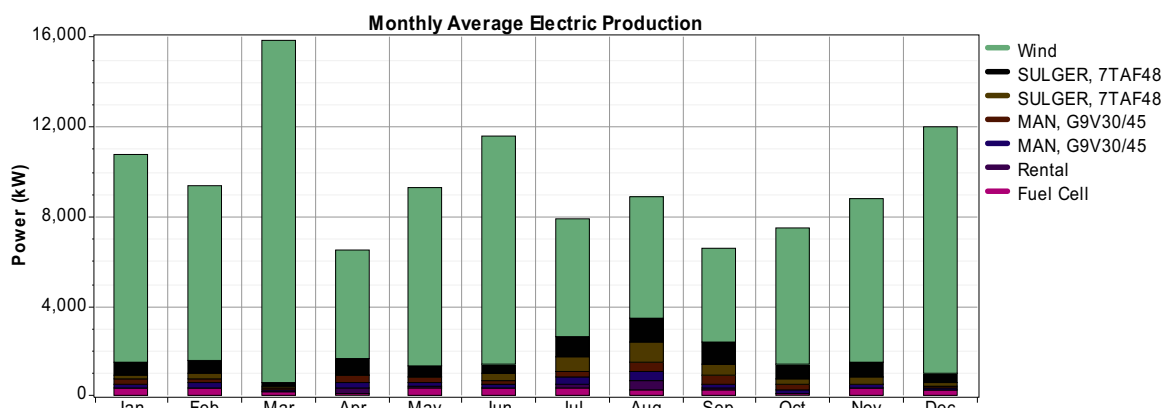
Διείσδυση 10% H₂ στο ΣΗΕ Μήλου

Υιοθετώντας τώρα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, υδρογόνο ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο της νήσου, έτσι ώστε να καλύπτει το 10% της μέγιστης ημερήσιας ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια, η αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συστήματος θα έχει ως εξής:

- 4+1 H/Z
 - 2 Μονάδες Sulzer7TAF48 (1,75 MW έκαστη, Heavy Oil)
 - 2 Μονάδες MAN G9V30/45 (0,7 MW έκαστη, Heavy Oil)
 - 1 ενοικιαζόμενη Μονάδα (1 MW, Απρίλιο - Σεπτέμβριο)
- 30 Ανεμογεννήτριες
 - 2 VestasV-44 (0,6 MW έκαστη)
 - 28 VestasV-52 (0,85 MW έκαστη)

- 1 Electrolyser (2 MW) για την παραγωγή του υδρογόνου
- 1 Κυψέλη Καυσίμου τύπου PEM (1 MW) για την επαναχρησιμοποίηση του υδρογόνου
- 1 Συμβατική δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου (3.000 kg)

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το προτεινόμενο σύστημα στη Μήλο κατανεμημένη ανά μονάδα ηλεκτροπαραγωγής η οποία εμφανίζει περίσσεια σε σχέση με τη μηνιαία ζήτηση της τάξης του 40%.



Εικόνα 2: Μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη Μήλο με αποθήκευση υδρογόνου

Στην περίπτωση αυτή το κόστος ενέργειας μετά την εξομάλυνση του συστήματος ανέρχεται στα 0,191 €/kWh, με ποσοστό χρησιμοποίησης ΑΠΕ 85 %. Οι εκπομπές ρύπων από τη λειτουργία του παραπάνω συστήματος κατά τη διάρκεια του έτους φαίνονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Εκπομπές ρύπων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής	
Ρυπαντής	Εκπομπές (kg/yr)
Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	10.095.664
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	22.269
Άκαυτοι υδρογονάνθρακες	2.467
Αιωρούμενα σωματίδια (PM)	1.679
Διοξείδιο του θείου (SO ₂)	202.328
Οξείδια του αζώτου (NO _x)	198.705

Από τα παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η χρησιμοποίηση υδρογόνου στο ενεργειακό σύστημα της Μήλου ως μέσο αποθήκευσης της ενέργειας θα επιφέρει τα εξής αποτελέσματα:

- Σχετικά μικρή αύξηση στο κόστος παραγωγή ενέργειας του νησιού (περίπου 21%)
- Τεράστια διείσδυση ΑΠΕ (από 13% στο 85%)
- Σημαντική μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων (κυρίως CO₂)

4. ΜΕΛΕΤΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Σε αντίθεση με το Υδρογόνο ως μέθοδο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, η αφαλάτωση σαν ηλεκτρικό φορτίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετατόπιση της ζήτησης ηλεκτρισμού για την παραγωγή ενός αγαθού το οποίο μπορεί πολύ εύκολα να αποθηκευτεί, το νερό, σε χρονικές στιγμές κατά τις οποίες είναι περισσότερο αποδοτικό να εξυπηρετηθεί από το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο συνδέεται. Τέτοιες στιγμές μπορεί να είναι για την περίπτωση μας η περίσσεια παραγωγής από ΑΠΕ. Για το ΣΗΕ της Μήλου μελετήθηκε η συνδυασμένη λειτουργία Α/Γ και μονάδας αφαλάτωσης για την ικανοποίηση ζήτησης ίσης με τη διπλάσια ποσότητα μεταφερόμενου νερού στο νησί. Για το ΣΗΕ της Κύπρου διερευνήθηκε η δυνατότητα για την αξιοποίηση μέρους της αποκοπτόμενης αιολικής παραγωγής αν υποτεθεί ότι όλα τα αδειοδοτημένα αιολικά πάρκα ήταν αυτή την στιγμή σε λειτουργία.

4.1. Εφαρμογή στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) της Μήλου.

Για το ΣΗΕ Μήλου θεωρήθηκε ότι κάποιος ιδιώτης επιθυμεί να εγκαταστήσει ένα εργοστάσιο αφαλάτωσης με τα χαρακτηριστικά μεγέθη που παρουσιάζει ο Πίνακας 5 και μέρος της ηλεκτρικής του κατανάλωσης θα προέρχεται από μία Α/Γ των 850kW, εγκατεστημένη στην ίδια τοποθεσία με το υπάρχον αιολικό πάρκο του νησιού των 2.05 MW. Τόσο το εργοστάσιο αφαλάτωσης, όσο και η Α/Γ θεωρούνται συνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο του νησιού.

Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά μονάδων αφαλάτωσης	
Αριθμός νησίδων αφαλάτωσης	4
Παραγωγή νερού ανά ώρα	21 m ³
Απαιτούμενη ισχύς νησίδας αφαλάτωσης (<i>un_load(t)</i>)	150kW
Συνολική χωρητικότητα δεξαμενής	3000 m ³
Άνω όριο δεξαμενής (<i>Cont^{MAX}</i>)	2800 m ³
Κάτω όριο δεξαμενής (<i>Cont^{min}</i>)	500 m ³
Απαιτούμενος χρόνος σβέσης νησίδας	60 λεπτά

Το πρόγραμμα παραγωγής του εργοστασίου αποστέλλεται, υπό τη μορφή ηλεκτρικής ζήτησης, στο διαχειριστή του νησιωτικού συστήματος με ορίζοντα μερικών ωρών, μέχρι 24 ώρες μπροστά και ανανεώνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα π.χ 4 ώρες. Ο αριθμός των μονάδων που θα λειτουργούν, *no_dis_load* θα γίνεται με βάση την εκτίμηση για την παραγόμενη ισχύ από την εγκατεστημένη μονάδα ΑΠΕ, *RES_add(t)*, και το πρόγραμμα μεταβάλλεται κατάλληλα ανάλογα με τις αλλαγές των εκτιμήσεων, ενημερώνοντας κατάλληλα τον διαχειριστή του ΣΗΕ. Η πρόβλεψη μπορεί να προέρχεται από ένα απλούστερο μοντέλο, π.χ persistence [3], σε σχέση με εκείνο που διαθέτει ένας διαχειριστής καθώς αναμένεται να ανανεώνεται για τις επόμενες λίγες, στη συγκεκριμένη περίπτωση λίγες ώρες και διότι οι τυχόν αποκλίσεις εξισορροπούνται με την ανταλλαγή ισχύος με το δίκτυο. Η περίσσεια ισχύος από ΑΠΕ λόγω της σύνδεσης των μονάδων αφαλάτωσης, *RES_sold(t)*, θα δίνεται από την (2).

$$no_dis_load(t) = \left\lfloor \frac{RES_add(t)}{un_load(t)} \right\rfloor \quad (1)$$

$$RES_sold(t) = RES_add(t) - no_dis_load(t) \cdot un_load(t) \quad (2)$$

$$Cont^{min} \leq cont(t+1) \leq Cont^{MAX} \quad (3)$$

Αν δεν υπάρχει παραβίαση της (3) σε καμία από τις χρονικές στιγμές του ορίζοντα προγραμματισμού ο αριθμός των συνδεδεμένων μονάδων θα δίνεται από την (1). Αν υπάρχει έλλειψη νερού, αγοράζεται ισχύς από το δίκτυο και αυξάνεται ο αριθμός των συνδεδεμένων μονάδων και της καταναλισκόμενης ενέργειας από το εργοστάσιο αφαλάτωσης. Ταυτόχρονα επιχειρείται αναλογικός επιμερισμός με την ποσότητα *RES_sold(t)* στις χρονικές στιγμές πριν από την εμφάνιση του ελλείμματος του αγαθού, ώστε να περιορίζεται τόσο η αγοραζόμενη ποσότητα ενέργειας από το δίκτυο, όσο και η αντίστοιχη επιβάρυνση του δικτύου. Στην περίπτωση πλεονάσματος του νερού, μειώνονται σταδιακά οι μονάδες που λειτουργούν με γνώμονα την εύρυθμη λειτουργία του φορτίου και αντιστρόφως ανάλογα με την ποσότητα *RES_sold(t)*, ώστε να περιορίζεται η ανταλλαγή μεγάλης ποσότητας ισχύος με το δίκτυο. Αφού έχουν γίνει οι κατάλληλες τροποποιήσεις στον αριθμό των νησίδων που συνδέονται, *no_dis_load(t)*, σύμφωνα με τα παραπάνω, η τελική ζήτηση για το φορτίο αφαλάτωσης, *fin_dis_load(t)*, θα δίνεται από την (4).

$$fin_dis_load(t) = no_dis_load(t) \cdot un_load(t) \quad (4)$$

Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει τα συνολικά αποτελέσματα για την παραγωγή νερού και το ισοζύγιο ενέργειας από την πλευρά του εγκαταστάτη της διάταξης αφαλάτωσης.

Πίνακας 6: Συγκεντρωτικά ετήσια αποτελέσματα από τη διαχείριση μονάδας αφαλάτωσης	
Παραγόμενο νερό (m ³)	406581
Ετήσια ζήτηση μονάδας Αφαλάτωσης (MWh)	2900
Παραγωγή Α/Γ (MWh)	2270
Αγοραζόμενη ενέργεια (MWh)	1246,4
Πωλούμενη ενέργεια (MWh)	600,4
Ιδιοπαραγόμενη ενέργεια (MWh)	1662,7
Αγοραζόμενη ενέργεια (%)	42,84
Ιδιοπαραγόμενη ενέργεια (%)	57,16

Ο Πίνακας 7 παρουσιάζει χαρακτηριστικά αποτελέσματα για την επίπτωση της αφαλάτωσης στο ΣΗΕ Μήλου. Λόγω της σημαντικής κατανάλωσης νερού τους καλοκαιρινούς μήνες η παραγωγή της Α/Γ δεν επαρκεί για την παραγωγή του απαιτούμενου νερού γι' αυτό και αυξάνεται σημαντικά η παραγωγή από τις θερμικές μονάδες και ειδικά τα ενοικιαζόμενα Η/Ζ κατά την περίοδο αυτή. Κατά τη λειτουργία χωρίς αφαλάτωση, οι μονάδες βάσης είναι περισσότερο φορτισμένες με αποτέλεσμα η αύξηση του φορτίου να γίνεται κυρίως από τις μονάδες οι οποίες καταναλώνουν diesel με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους.

Πίνακας 7: Επιπτώσεις από τη σύνδεση της αφαλάτωσης στο ΣΗΕ Μήλου.			
Ενεργειακό Ισοζύγιο			
	Χωρίς αφαλάτωση (MWh)	Με αφαλάτωση (MWh)	Μεταβολή (%)
Μαζούτ	28462.2	28529.1	0.24
Diesel	1913.6	2071.2	8.24
Ενοικιαζόμενα Η/Ζ	4639.4	5290.3	14.30
Σύνολο θερμ.σταθμού	35015.2	35890.6	2.50
Παραγωγή ΑΠΕ	4980	6563	31.7
Διείσδυση ΑΠΕ (%)	12.45	15.46	24.15
Οικονομικά αποτελέσματα			
	Χωρίς αφαλάτωση	Με αφαλάτωση	Μεταβολή (%)
Μαζούτ (tn)	7385.67	7428.30	0.57
Diesel (tn)	1444.01	1597.19	9.59
Κόστος (€)	2,746,475	2,844,064	3.55

Παρ' όλα αυτά η αιολική διείσδυση αυξάνεται σημαντικά κατά 24.15% και η αιολική παραγωγή κατά 31.7%. Είναι επίσης χαρακτηριστικό ότι για το μήνα Μάρτιο, αν δεν εγκατασταθεί η μονάδα αφαλάτωσης και εγκατασταθεί μόνο η 4^η Α/Γ, τότε θα αποκόπτονταν 60MWh αιολικής παραγωγής επιπλέον. Για το συγκεκριμένο μήνα η μέγιστη διείσδυση από ΑΠΕ αγγίζει το 14.7% με τη μονάδα αφαλάτωσης έναντι 14% μόνο με την προσθήκη της 4^{ης} Α/Γ. Περισσότερες λεπτομέρειες για αυτήν την εφαρμογή καθώς και δεδομένα για το ΣΗΕ της Μήλου το 2006 δίνονται στην [4].

4.2. Εφαρμογή στο ΣΗΕ της Κύπρου

Στο ΣΗΕ της Κύπρου αυτή τη στιγμή η διείσδυση ΑΠΕ είναι ιδιαιτέρως περιορισμένη. Υπάρχουν αιτήσεις για την αδειοδότηση κατασκευής αιολικών πάρκων που φτάνουν τα 950MW και αδειοδοτήσεις που αγγίζουν τα 289MW [5]. Η ένταξη τέτοιων μονάδων στο σύστημα θα επιφέρει σημαντικές μεταβολές στον τρόπο λειτουργίας των θερμικών μονάδων στο νησί που ως επί το πλείστον είναι μονάδες ατμο-στροβιλικές με σχετικά μεγάλο τεχνικό ελάττωστο που δεν έχουν τόσο μεγάλα περιθώρια για έναυση-σβέση ή σημαντικές μεταβολές του φορτίου τους από ώρα σε ώρα. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την εγγενή αβεβαιότητα των προβλέψεων φορτίου και ανέμου που θα μπορεί ο χειριστής του συστήματος να χρησιμοποιεί [6], είναι αρκετά συχνό να οδηγήσουν σε αποκοπή σημαντικής ποσότητας της αιολι-

κής παραγωγής προκειμένου οι ατμο-τροβιλικές μονάδες να μπορούν να διατηρηθούν σε κατάσταση λειτουργίας χωρίς απότομες μεταβολές της φόρτισής τους.

Ο Πίνακας 8 παρουσιάζει την εκτίμηση της ΡΑΕ Κύπρου, της αποκοπτόμενης αιολικής παραγωγής για το Σύστημα Παραγωγής της ΑΗΚ μετά από την εγκατάσταση της αιολικής αυτής ισχύος. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζεται η εκτίμηση για την παραγωγή νερού με μέση τιμή υποθέτοντας απόδοση της αφαλάτωσης ίση με 4.5kWh/m^3 [7].

Η αποκοπτόμενη ποσότητα αντιστοιχεί περίπου στο 5% της αναμενόμενης αιολικής διείσδυσης η οποία περιορίζεται σε λίγο μικρότερο ποσοστό από το 15% της ετήσιας ζήτησης στην Κύπρο το 2005. Ο αριθμός των ωρών κατά τις οποίες αναμένεται να υπάρξει αποκοπή αιολικής παραγωγής είναι ετησίως 900 με την συντριπτική τους πλειονότητα κατά τους μήνες χαμηλής ζήτησης, Μάρτιο-Απρίλιο και Νοέμβριο. Ο αριθμός των ωρών αποτελεί το 10% του έτους και θα απαιτούνταν συνολικά σημαντική ισχύς μονάδων αφαλάτωσης για να απορροφηθεί η μέση αποκοπτόμενη ισχύ για τα συγκεκριμένες ώρες.

Πίνακας 8: Εκτίμηση Αποκοπτόμενης Αιολικής παραγωγής και δυνατότητας παραγόμενου νερού.		
Μήνας	Εκτίμηση αποκοπτόμενης Αιολικής Παραγωγής (MWh)	Εκτίμηση Δυνατότητας Παραγόμενου νερού (m^3)
Ιανουάριος	2007.4	446088.9
Φεβρουάριος	2358.6	524133.3
Μάρτιος	4402.2	978266.7
Απρίλιος	5459.6	1213244
Μάιος	5233.4	1162978
Ιούνιος	2155.3	478955.6
Ιούλιος	234.8	52177.78
Αύγουστος	438.3	97400
Σεπτέμβριος	1444.8	321066.7
Οκτώβριος	3328.5	739666.7
Νοέμβριος	5209.1	1157578
Δεκέμβριος	3626.1	805800
Σύνολο	35898.1	7977356

Γι' αυτό το σκοπό, ακολουθήθηκε η προσέγγιση της εγκατάστασης 14 μονάδων αφαλάτωσης με ισχύ 1MW έκαστη για την απορρόφηση τμήματος της αποκοπτόμενης αιολικής παραγωγής. Κάποιες από αυτές θα λειτουργούν υπό συνεχή λειτουργία ενώ οι υπόλοιπες κατά τις ώρες κατά τις οποίες αναμένεται αποκοπή αιολικής παραγωγής. Ο στόχος είναι να ικανοποιείται τουλάχιστον η μηνιαία δυνατότητα παραγωγής νερού – Πίνακας 8.

Ο αριθμός των μονάδων που θα λειτουργούν συνεχώς θα μεταβάλλεται από μήνα σε μήνα με τη δυνατότητα ικανοποίησης του 75% της μηνιαίας ζήτησης νερού. Λόγω του διακριτού χαρακτήρα του φορτίου, χρησιμοποιείται η ισχύς που αντιστοιχεί στον επόμενο ακέραιο αριθμό. Αν π.χ με 1.3 MW ικανοποιείται το 75% της ζήτησης κάποιου μήνα, τότε συνεχώς θα λειτουργούν 2 μονάδες.

Ενδεικτικά για το μήνα Μάρτιο, για το 75% της ζήτησης νερού απαιτείται να λειτουργούν 5 μονάδες συνεχώς. Όποτε προβλέπεται βάσει των συνθηκών φορτίου και αιολικής παραγωγής να αποκοπεί αιολική παραγωγή και οι υπόλοιπες 9 τίθενται σε λειτουργία για να μειώσουν την αποκοπτόμενη αυτή ποσότητα. Ο Πίνακας 9 συνοψίζει τα σχετικά αποτελέσματα από την εφαρμογή αυτής της πολιτικής για το μήνα Μάρτιο.

Πίνακας 9 Αποτελέσματα μετά την εφαρμογή του Σεναρίου για το μήνα Μάρτιο			
Παραγόμενο νερό ($\times 1000 \text{ m}^3$)	Κατανάλωση Αφαλάτωσης (MWh)	Αποκοπτόμενη Αιολική παραγωγή (MWh)	Ποσοστό ικανοποίησης φορτίου αφαλάτωσης από ΑΠΕ
1022.6	4602	3254	24.94%

Το παραγόμενο νερό είναι παραπάνω κατά 44400m³ για το μήνα αυτό, ενώ η αποκοπτόμενη αιολική παραγωγή για το συγκεκριμένο μήνα μειώνεται κατά 35.3% με σημαντικά οφέλη για τους επενδυτές σε αιολική ενέργεια. Η διείσδυση αιολικής παραγωγής αυξάνεται κατά 0.3% για αυτόν το μήνα, μικρό ποσοστό, που οφείλεται κυρίως στην αύξηση του συνολικού φορτίου του νησιού.

Από τις παραπάνω εφαρμογές ενός σχετικά ελεγχόμενου φορτίου το οποίο μπορεί να αποθηκεύσει το αγαθό που παράγει, όπως είναι η αφαλάτωση, βγαίνουν χρήσιμα συμπεράσματα για την επίπτωση τέτοιων φορτίων σε ένα ΣΗΕ στο οποίο αναμένεται σημαντική διείσδυση από ΑΠΕ και ειδικά αιολικά. Αν συνεργάζονται οι μονάδες αφαλάτωσης με τις μονάδες ΑΠΕ, όσον αφορά τον προγραμματισμό λειτουργίας τους, τότε η επίδραση της αύξησης του φορτίου από την προσθήκη της αφαλάτωσης ελαττώνεται καθώς επιλέγονται κατά το δυνατόν συχνότερα οι περίοδοι κατά τις οποίες υπάρχει αφθονία παραγωγής από ΑΠΕ. Επίσης μειώνεται η ποσότητα της αποκοπτόμενη ενέργεια σε σχέση με την περίπτωση που δεν υπήρχε η δυνατότητα εγκατάστασης και εκμετάλλευσης της λειτουργίας τέτοιων φορτίων και απλά αυξανόταν η εγκατεστημένη ισχύς. Το πρόβλημα της αποκοπής αιολικής παραγωγής αντιμετωπίζεται αρκετά ικανοποιητικά από μονάδες αφαλάτωσης, όπως φανερώνει η εφαρμογή του δικτύου της Κύπρου, παράγοντας ημερησίως σημαντικές ποσότητες νερού κατά τις περιόδους χαμηλής φόρτισης του συστήματος, μειώνοντας σημαντικά την μηνιαία αποκοπτόμενη ενέργεια.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Είναι φανερό από τις παραπάνω εφαρμογές ότι σημαντική συμβολή στην αύξηση της διείσδυσης παραγωγής από ΑΠΕ στα αυτόνομα νησιωτικά δίκτυα, αναμένεται να διαδραματίσει η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας. Επομένως η δημιουργία ενός δρόμου προσέγγισης (roadmap) για την επίλυση των προβλημάτων που οδηγούν στην ανάσχεση της διείσδυσης των διατάξεων αυτών στα ηλεκτρικά δίκτυα κρίνεται αναγκαία για να αυξηθεί η διείσδυση παραγωγής από ΑΠΕ στα ευαίσθητα περιβαλλοντικά νησιωτικά συστήματα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν την Ευρωπαϊκή Επιτροπή για τη χρηματοδότηση του έργου STORIES.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1.Ιστοσελίδα Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), <http://www.cres.gr/>
- 2.Ιστοσελίδα Προγράμματος STORIES, <http://www.storiesproject.eu>
- 3.Giebel G, Brownsword R, Kariniotakis G. The state-of-the-art in short-term prediction of wind power: a literature overview. Διαθέσιμο: http://anemos.cma.fr/download/ANEMOS_D1.1_StateOfTheArt_v1.1.pdf (27/11/08)
- 4.Παναγιώτης Α. Κουκουτσάκης, «Επίδραση Φορτίου Αφαλάτωσης Σε Νησιωτικό Σύστημα Ενέργειας», Διπλωματική Εργασία, Σχολή ΗΜΜΥ ΕΜΠ, Σεπτέμβριος 2007, Επίβλεψη Ν.Χατζηαργυρίου,Α.Τσικαλάκης.
- 5.Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας Κυπριακής Δημοκρατίας (ΠΑΕΚ), <http://www.cera.org.cy>
- 6.Antonis G. Tsikalakis, Nikos D. Hatziargyriou, Yiannis A. Katsigiannis, Pavlos S. Georgi-lakis, Impact of wind power forecasting error bias on the economic operation of autonomous power systems, J. Wind Energy Published Online: 29 Sep 2008 (Early view)
- 7.Dubravko Sambrailo, Jure Ivić, Ante Krstulović, Economic evaluation of the first desalination plant in Croatia Desalination, Vol. 179, Issues 1-3, 10 July 2005, pp 339-344

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΜΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΝΗΣΙΑ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ. ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Δ. Α. Παπαχρήστου, Κ. Παπασταμούλος

Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, Πανεπιστημίου 69, 106 54, Αθήνα, e-mail: papachristou@rae.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα ανακοίνωση γίνεται μία σύντομη παρουσίαση της εξέλιξης και του ισχύοντος θεσμικού πλαισίου, σχετικά με την αδειοδότηση σταθμών ΑΠΕ στην Ελλάδα καθώς επίσης και τα μέτρα πολιτικής που εφαρμόζονται για την ανάπτυξή τους. Στη συνέχεια περιγράφεται η υφιστάμενη κατάσταση και η πορεία υλοποίησης των ΑΠΕ στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ) και παρουσιάζονται στοιχεία από τη λειτουργία τους. Ακολουθεί η αναφορά στο θέμα της ηλεκτροδότησης των ΜΔΝ και της διασύνδεσής τους με την Ηπειρωτική Ελλάδα και παρουσιάζονται συγκεκριμένα συμπεράσματα.*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάπτυξη των ΑΠΕ σε όλη την Ελληνική Επικράτεια αποτελεί πλέον μονόδρομο. Οι κλιματικές αλλαγές και οι διεθνείς υποχρεώσεις και δεσμεύσεις της Ελλάδας δεν αφήνουν κανένα περιθώριο. Υπάρχουν ήδη σημαντικά μέτρα πολιτικής στήριξης των ΑΠΕ. Η εκμετάλλευση του υψηλού αιολικού δυναμικού των νησιών αλλά και των λοιπών μορφών ΑΠΕ με τη μεγιστοποίηση της διείσδυσής τους στο ενεργειακό ισοζύγιο είναι πλέον επιτακτική ανάγκη.

2. ΟΙ ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΔΕΣΜΕΥΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ ΚΑΙ ΤΟ ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΙΣ ΑΠΕ

2.1. Οι Διεθνείς δεσμεύσεις της Ελλάδας

Σύμφωνα με την Οδηγία 2001/77/ΕΚ που υιοθετήθηκε και από την Ελλάδα, τα κράτη-μέλη καλούνται να λάβουν τα κατάλληλα μέτρα (τιμολογιακή πολιτική, διοικητικές διαδικασίες, διευκόλυνση σύνδεσης στο ηλεκτρικό δίκτυο κ.ά.), ώστε μέχρι το 2010 το 12% της συνολικά παραγόμενης από τα κράτη-μέλη ηλεκτρικής ενέργειας, περιλαμβανομένης και αυτής που παράγεται από Μεγάλα Υδροηλεκτρικά, να προέρχεται από ΑΠΕ. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτός ο στόχος του 12% η Οδηγία ορίζει, για κάθε χώρα, ανάλογα με τις δυνατότητες των διατιθέμενων πρωτογενών πηγών της, έναν «ενδεικτικό» στόχο που για την Ελλάδα ορίστηκε το 20,1%.

Πρόσφατα η Ε.Ε. δρομολογεί νέους «δεσμευτικούς» πλέον στόχους για το έτος 2020 που είναι γνωστοί ως «20-20-20», δηλαδή, 20% συμμετοχή των ΑΠΕ στο ευρωπαϊκό ενεργειακό ισοζύγιο, 20% μείωση των εκπομπών αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου (ΑΦΘ) σε σχέση με το 1990, 20% εξοικονόμηση ενέργειας και 10% συμμετοχή των βιοκαυσίμων στις μεταφορές. Οι στόχοι αυτοί εξειδικεύονται για κάθε χώρα-μέλος της ΕΕ και για την Ελλάδα το ποσοστό σχετικά με τις ΑΠΕ ανέρχεται σε 18% το οποίο μεταφράζεται σε «ποσοστό 30-35% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας να προέρχεται από ΑΠΕ».

2.2. Το σημερινό καθεστώς

Μετά τα πρώτα δειλά βήματα για την ανάπτυξη των ΑΠΕ με τους νόμους Ν.1559/1985 και Ν.2244/94 τέθηκε σε ισχύ ο Ν.2773/99 που προβλέπει την απελευθέρωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, δηλ. την λειτουργία της σχετικής αγοράς βάσει κανόνων ελεύθερης α-

* Οι θέσεις που διατυπώνονται στην εργασία αποτελούν προσωπικές απόψεις των συγγραφέων και δεν εκφράζουν κατ' ανάγκην τους οργανισμούς στους οποίους εργάζονται

γοράς και ανταγωνισμού και τροποποιήθηκε η διαδικασία αδειοδότησης των σταθμών ΑΠΕ με την συμμετοχή κατά το πρώτο στάδιο της διαδικασίας της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας η οποία γνωμοδοτεί σχετικά προς τον Υπουργό Ανάπτυξης. Με τον νόμο αυτό υπάρχουν ειδικές «ευνοϊκές» ρυθμίσεις όπως η προτεραιότητα ένταξης των σταθμών ΑΠΕ στο Σύστημα και η τιμή αγοράς της ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ είναι προκαθορισμένη δηλ. δεν τίθεται σε βάση ανταγωνισμού με την προερχόμενη από συμβατικές πηγές. Επίσης προβλέφθηκε για πρώτη φορά και η επιβολή τέλους υπέρ των Οργανισμών Τοπικής Αυτοδιοίκησης (ΟΤΑ), το οποίο ορίστηκε στο 2% των ακαθαρίστων εσόδων από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ευνοϊκές ρυθμίσεις του Ν. 2773/99, διατηρήθηκαν στον Ν.3468/2006 που προβλέπει νέες ειδικές ρυθμίσεις για την ανάπτυξη των σταθμών ΑΠΕ και ειδικότερα για τους Υβριδικούς σταθμούς, τους Φ/Β σταθμούς αλλά και τους σταθμούς που εκμεταλλεύονται την κυματική, ηλιακή, γεωθερμική ενέργεια. Επίσης τροποποιείται η αδειοδοτική διαδικασία και αναπροσαρμόζεται το τέλος υπέρ ΟΤΑ σε 3%.

Σύμφωνα με τον Ν.3468/2006, η αίτηση υποβάλλεται μαζί με δύο Προμελέτες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΠΠΕ) στη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) η οποία τις αξιολογεί αρχικά με βάση τα κριτήρια α). έως και η) του άρθρου 9 του «Κανονισμού Αδειών Παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και μέσω Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης» [2], όπως εξειδικεύονται στον «Οδηγό Αξιολόγησης αιτήσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και μικρή ΣΗΘ» [2]. Στο πλαίσιο αυτό εξετάζεται η εν γένει ασφάλεια των εγκαταστάσεων και του σχετικού εξοπλισμού του Συστήματος και του Δικτύου, η ενεργειακή αποδοτικότητα του έργου, η οικονομική, επιστημονική και τεχνική επάρκεια του αιτούντος, κ.τ.λ. Εφόσον η αίτηση ικανοποιεί τα κριτήρια αυτά η ΡΑΕ διαβιβάζει την ΠΠΕ στην αρμόδια περιβαλλοντική υπηρεσία του Υπουργείου ΠΕΧΩΔΕ προκειμένου να γνωμοδοτήσει επί της Προκαταρκτικής Περιβαλλοντικής Εκτίμησης και Αξιολόγησης (ΠΠΕΑ). Στη συνέχεια η ΡΑΕ λαμβάνοντας υπόψη τη γνώμη επί της ΠΠΕΑ γνωμοδοτεί σχετικά προς τον Υπουργό Ανάπτυξης ο οποίος και χορηγεί την Άδεια Παραγωγής. Μετά την Άδεια Παραγωγής απαιτείται η λήψη Άδειας Εγκατάστασης και στη συνέχεια Άδειας Λειτουργίας, οι οποίες χορηγούνται από την Περιφέρεια ή τον Υπουργό Ανάπτυξης, ανάλογα με το έργο, μετά από γνωμοδοτήσεις και εγκρίσεις πλήθους Υπηρεσιών και φορέων.

Ειδικότερα για περιοχές με κορεσμένα δίκτυα που διαπιστώνονται με απόφαση της ΡΑΕ, η αδειοδότηση σταθμών ΑΠΕ απαιτεί πρόσκληση με συγκεκριμένους όρους και προϋποθέσεις στο πλαίσιο της οποίας υποβάλλονται αιτήσεις για τη χορήγηση είτε αδειών παραγωγής είτε αποφάσεων εξαίρεσης από την υποχρέωση λήψης άδειας παραγωγής. Η πρόσκληση διενεργείται από τη ΡΑΕ όπως και η εξέταση/αξιολόγηση των αιτήσεων σύμφωνα με τα οριζόμενα στον Κανονισμό Αδειών.

2.3. Εφαρμοζόμενα μέτρα πολιτικής

Τα σημαντικότερα μέτρα πολιτικής που εφαρμόζονται στην Ελλάδα σήμερα για την ανάπτυξη των ΑΠΕ είναι τα ακόλουθα:

Εγγυημένη τιμή αγοράς της παραγόμενης ενέργειας ανάλογα με το αν ο σταθμός έχει εγκατασταθεί στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα ή σε Μη Διασυνδεδεμένο Νησί και ανάλογα με την τεχνολογία (διαφορετικές τιμές για Αιολικούς, Φ/Β σταθμούς, Ηλιοθερμικούς, κ.τ.λ.). Σημειώνεται ότι η διαφορά κόστους καλύπτεται μέσω ειδικού τέλους που καταβάλουν οι καταναλωτές και η οποία υπολογίζεται για το Σύστημα, βάσει της απόκλισης από την Οριακή Τιμή Συστήματος ενώ για τα νησιά, βάσει του μέσου μεταβλητού κόστους παραγωγής (κυρίως κόστος καυσίμου που σε ορισμένα νησιά η διαφορά είναι αμελητέα έως και αρνητική).

Επιχορηγήσεις για έργα ΑΠΕ είναι διαθέσιμες από το σχετικό Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης (ΚΠΣ) είτε από τον Αναπτυξιακό Νόμο συμπεριλαμβανομένων ειδικών επιχορηγήσεων για τα δίκτυα σύνδεσης.

Η Σύμβαση αγοροπωλησίας μεταξύ Παραγωγού-Διαχειριστή έχει 10ετή διάρκεια με δυνατότητα μονομερούς ανανέωσης από την πλευρά του παραγωγού για άλλα 10 χρόνια δημιουργώντας έτσι ένα ασφαλές επενδυτικό περιβάλλον 20ετίας.

Εκτός από την προτεραιότητα ένταξης των σταθμών ΑΠΕ στο Σύστημα και στο Δίκτυο σημαντικό κίνητρο ανάπτυξης είναι και η απαλλαγή τους από την υποχρέωση πληρωμής τελών χρήσης τους (Ν.2773/99).

3. ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΣΕΙΣ ΕΡΓΩΝ ΑΠΕ ΣΤΑ ΜΔΝ

Η ΡΑΕ έχει εκδώσει την υπ' αρ. 96/2007 Απόφαση «Καθορισμός περιοχών με κορεσμένα δίκτυα, προσδιορισμός περιθωρίων ανάπτυξης σταθμών ΑΠΕ σε αυτές, καθορισμός μεθοδολογίας επιμερισμού της ισχύος και πρόσκληση για υποβολή αιτήσεων για χορήγηση απόφασης εξαίρεσης, σύμφωνα με τα οριζόμενα στις διατάξεις των παρ. 1 και 2 του άρθρου 4 και της παρ. 1 του άρθρου 23 του Κανονισμού Αδειών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ» (ΦΕΚ Β' 448/2007)»[2] σύμφωνα με την οποία όλα τα Νησιά (Διασυνδεδεμένα και Μη) συμπεριλαμβανομένης και της Εύβοιας έχουν χαρακτηριστεί ως κορεσμένα δίκτυα ως προς τις τεχνολογίες των Αιολικών και των Φ/Β σταθμών. Για το λόγο αυτό οποιαδήποτε αδειοδότηση των εν λόγω τεχνολογιών απαιτεί πρόσκληση που διενεργεί η ίδια η ΡΑΕ με συγκεκριμένους όρους και προϋποθέσεις.

Ως προς τους Αιολικούς σταθμούς σημειώνεται ότι η ΡΑΕ για πρώτη φορά προχώρησε σε αδειοδότηση τους και εξέδωσε τις σχετικές άδειες παραγωγής το έτος 2003 (για όλα τα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά). Τον Νοέμβριο του 2007, έθεσε σε δημόσια διαβούλευση τις απόψεις της σχετικά με την αδειοδότηση νέων αιολικών σταθμών συνολικής ισχύος 50MW περίπου στη νήσο Κρήτη και προτίθεται το επόμενο χρονικό διάστημα να διερευνήσει σε κάθε νησί εάν υπάρχει επαρκές περιθώριο, επιπλέον του αδειοδοτημένου, προκειμένου να προβεί σε σχετική πρόσκληση [2].

Ως προς την τεχνολογία των Φ/Β σταθμών η ΡΑΕ προχώρησε σε σχετική πρόσκληση για υποβολή αιτήσεων που αφορούν Φ/Β σταθμούς μέχρι 150kW και μικρούς αιολικούς σταθμούς μέχρι 40kW στη νήσο Κρήτη και μέχρι 20kW στα λοιπά Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά με καταληκτικές ημερομηνίες για την Κρήτη την 31.8.2007 και για τα λοιπά ΜΔΝ την 28.09.2007 [2].

Ως προς τις λοιπές τεχνολογίες των σταθμών ΑΠΕ (κυρίως Υβριδικών και Ηλιοθερμικών) τα νησιά δεν έχουν χαρακτηριστεί ως κορεσμένα και ως εκ τούτου οι αιτήσεις υποβάλλονται σύμφωνα με τα οριζόμενα στον Ν. 3468/2006 και τον Κανονισμό Αδειών [2].

4. Η ΠΟΡΕΙΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΕΡΓΩΝ ΑΠΕ ΣΤΑ ΜΔΝ.

4.1 Πορεία υλοποίησης των Αιολικών σταθμών

Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί προκύπτει ότι σήμερα λειτουργούν 75 έργα συνολικής ισχύος 225,09MW, ενώ υπάρχουν άλλα 128 έργα συνολικής ισχύος 373,15MW που διαθέτουν άδεια παραγωγής και βρίσκονται στο στάδιο ωρίμανσης προκειμένου να υλοποιηθούν.

Πίνακας 1: Αιολικοί σταθμοί στα ΜΔΝ

	ΜΕ ΑΔ. ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ		ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	
	ΑΡ.ΕΡΓΩΝ	ΙΣΧΥΣ (MW)	ΑΡ.ΕΡΓΩΝ	ΙΣΧΥΣ (MW)
Ν.ΛΕΣΒΟΥ	10	20,09	6	12,99
Ν.ΣΑΜΟΥ	11	10,81	8	8,66
Ν.ΧΙΟΥ	15	11,35	11	8,55
Ν.ΚΥΚΛΑΔΩΝ	23	32,30	11	8,82
Ν.ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΟΥ	22	76,10	11	30,18
Ν.ΚΕΡΚΥΡΑΣ (ΟΘΩΝΟΙ-ΕΡΕΙΚΟΥΣΑ)	0	0,00	0	0,00
Ν.ΠΕΙΡΑΙΑ (ΑΝΤΙΚΥΘΗΡΑ)	0	0,00	0	0,00
Ν.ΕΥΒΟΙΑΣ (ΣΚΥΡΟΣ)	2	0,94	1	0,14
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΚΡΗΤΗΣ	45	221,57	27	155,75
ΣΥΝΟΛΟ	128	373,15	75	225,09

4.2 Πορείας υλοποίησης Φ/Β σταθμών

Το έτος 2007, όπως φαίνεται από τα στοιχεία του Πίνακα 2, υποβλήθηκαν 2.977 αιτήσεις συνολικής ισχύος 326,16MW για Φ/Β σταθμούς ισχύος έως 150kW έκαστος. Η ΡΑΕ έχει μέχρι σήμερα ολοκληρώσει την εξέταση των 1623 αιτήσεων της Κρήτης και έχει εκδώσει Αποφάσεις για Φ/Β σταθμούς συνολικής ισχύος 87,064MW ενώ βρίσκεται στο στάδιο εξέτασης των 1354 αιτήσεων που υποβλήθηκαν στα λοιπά ΜΔΝ.

Πίνακας 2: Αιτήσεις για Φ/Β σταθμούς στα ΜΔΝ

	ΑΙΤΗΣΕΙΣ		ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΑ (MW)	ΗΔΗ ΕΓΚΑΤΕ- ΣΤΗΜΕΝΑ (MW)	ΥΠΟ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΣΗ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟ (MW)
	ΑΡ.ΕΡΓΩΝ	ΙΣΧΥΣ (MW)			
Ν.ΛΕΣΒΟΥ	355	39,758	0,022	0,001	12,771
Ν.ΣΑΜΟΥ	156	17,176	0,015	0,000	6,348
Ν.ΧΙΟΥ	120	13,669	0,067	0,000	7,396
Ν.ΚΥΚΛΑΔΩΝ	204	21,409	0,461	0,160	21,552
Ν.ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΟΥ	519	53,443	0,262	0,000	39,396
Ν.ΚΕΡΚΥΡΑΣ (ΟΘΩΝΟΙ-ΕΡΕΙΚΟΥΣΑ)	0	0,000	0,000	0,000	0,074
Ν.ΠΕΙΡΑΙΑ (ΑΝΤΙΚΥΘΗΡΑ)	0	0,000	0,034	0,025	0,000
Ν.ΕΥΒΟΙΑΣ (ΣΚΥΡΟΣ)	0	0,000	0,006	0,000	0,518
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΚΡΗΤΗΣ	1623	180,711	87,064	0,703	15,013
ΣΥΝΟΛΟ	2977	326,166	87,931	0,889	103,067

4.3 Λοιπά έργα ΑΠΕ στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά

Υβριδικοί σταθμοί: Πρόσφατα έχει υπάρξει έντονο επενδυτικό ενδιαφέρον κυρίως για τη νήσο Κρήτη. Από τα στοιχεία του Πίνακα 3 προκύπτει ότι έχουν υποβληθεί συνολικά 12 αιτήσεις για τη νήσο Κρήτη για συνολική εγγυημένη ισχύ 166MW και ισχύ Αιολικών σταθμών 211,8MW. Η ΔΕΗ ΑΕ διαθέτει ήδη άδεια παραγωγής για Υβριδικό σταθμό εγγυημένης ισχύος 3,8MW και αιολικής 2,4MW, ενώ η ΡΑΕ έχει ήδη αξιολογήσει 2 αιτήσεις και έχει διαβιβάσει τις σχετικές ΠΠΕ στις αρμόδιες περιβαλλοντικές υπηρεσίες. Οι υπόλοιπες αιτήσεις βρίσκονται στο στάδιο Αξιολόγησης. Τονίζεται ιδιαίτερα το γεγονός ότι η ΡΑΕ έθεσε σε δημόσια διαβούλευση το 2008 κείμενο με τις βασικές αρχές λειτουργίας των Υβριδικών σταθμών και επεξεργάζεται τις απόψεις των φορέων και σύντομα θα ανακοινώσει τα σχετικά αποτελέσματα.

Ηλιοθερμικοί σταθμοί: Μέχρι σήμερα (Πίνακας 3) έχουν υποβληθεί 5 αιτήσεις συνολικής ισχύος 233MW στη νήσο Κρήτη. Η ΡΑΕ βρίσκεται στο στάδιο επεξεργασίας των βασικών αρχών λειτουργίας των ηλιοθερμικών σταθμών που πρέπει να λάβει υπόψη της. Όλες οι αιτήσεις βρίσκονται στο στάδιο αξιολόγησης.

Πίνακας 3: Αιτήσεις για Υβριδικούς και Ηλιοθερμικούς σταθμούς στα ΜΔΝ

	ΥΒΡΙΔΙΚΑ						ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΑ	
	ΑΙΤΗΣΕΙΣ ΥΠΟ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ			ΑΔ. ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ / ΠΠΕΑ			ΑΙΤΗΣΕΙΣ	
	ΑΡ. ΕΡΓ.	ΙΣΧΥΣ ΑΠΕ (MW)	ΕΓΓΥΗΜΕΝΗ (MW)	ΑΡ. ΕΡΓ.	ΙΣΧΥΣ ΑΠΕ (MW)	ΕΓΓΥΗΜΕΝΗ (MW)	ΑΡ. ΕΡΓ.	ΙΣΧΥΣ (MW)
Ν.ΛΕΣΒΟΥ	1	18,00	15					
Ν.ΣΑΜΟΥ				1	2,40	3,80		
Ν.ΧΙΟΥ								
Ν.ΚΥΚΛΑΔΩΝ	1	12,60	5,60					
Ν.ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΟΥ	3	48,45	36					
Ν.ΚΕΡΚΥΡΑΣ (ΟΘΩΝΟΙ-ΕΡΕΙΚΟΥΣΑ)								
Ν.ΠΕΙΡΑΙΑ (ΑΝΤΙΚΥΘΗΡΑ)								
Ν.ΕΥΒΟΙΑΣ (ΣΚΥΡΟΣ)								
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΚΡΗΤΗΣ	11	121,7	91	1	90,1	75	5	233
ΣΥΝΟΛΟ	16	200,75	147,6	2	92,50	78,80	5	233

Γεωθερμικοί σταθμοί: Ο μοναδικός αδειοδοτημένος γεωθερμικός σταθμός είναι της ΔΕΗ ΑΕ, ισχύος 8 MW στη Λέσβο (Στύψη Δήμου Πέτρας). Υπάρχει σημαντικό δυναμικό για ηλεκτροπαραγωγή στη Μήλο (της τάξης των 120 MW) και στη Νίσυρο (τάξης 30 MW). Απαιτούνται όμως διασυνδέσεις προκειμένου να είναι δυνατή η εκμετάλλευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Σημειώνεται ότι υπάρχουν έντονες επιφυλάξεις διότι στο παρελθόν υπήρξε η γνωστή μη επιτυχημένη προσπάθεια αξιοποίησης του γεωθερμικού πεδίου στη Μήλο (από τη ΔΕΗ ΑΕ). Τα δικαιώματα για τα γεωθερμικά πεδία της Μήλου και της Νισύρου κατέχει η ΔΕΗ. Ωστόσο σημειώνεται ότι απαιτείται διαγωνισμός για τη διαχείριση του πεδίου, ενώ μέχρι το 2010 δεν αναμένεται να έχει τεθεί σε λειτουργία κάποιος γεωθερμικός σταθμός

Σταθμοί Βιομάζας: Στην Κρήτη λειτουργεί ένας σταθμός Βιομάζας ισχύος 0,166MW ενώ έχει υποβληθεί μία αίτηση για χορήγηση άδειας παραγωγής στη νήσο Λέσβο ισχύος 25 MW η οποία βρίσκεται στο στάδιο αξιολόγησης.

5. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΡΓΩΝ ΑΠΕ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

5.1 Η συμμετοχή των ΑΠΕ στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ηπειρωτική Ελλάδα και τα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά

Στον παρακάτω Πίνακα 4 αναλύεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από όλους τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα συμπλεριλαμβανομένων των σταθμών ΑΠΕ. Παρατηρείται ότι υπάρχει μία σημαντική διακύμανση στη συμμετοχή των ΑΠΕ στην συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από χρονιά σε χρονιά. Ενώ το έτος 2006 η συμμετοχή των ΑΠΕ άγγιζε το 14% το 2007 έφτασε μόλις το 7%. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην παραγωγή των Μεγάλων Υδροηλεκτρικών σταθμών που το έτος 2006 έφτασε τις 5.620 GWh, ενώ το 2007 μόλις τις 2.020 GWh λόγω της έντονης ξηρασίας που παρατηρήθηκε.

Πίνακας 4: Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο Ηπειρωτικό σύστημα ανά τεχνολογία για τα έτη 2004-2007 και το ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ.

	2004		2005		2006		2007	
ΠΑΡΑΓΩΓΗ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (MWH)	(%)	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (MWH)	(%)	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (MWH)	(%)	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (MWH)	(%)
ΛΙΓΝΙΤΙΚΗ	32,491,449	63	32,056,619	61	29,165,171	54	31,092,884	56
ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΗ	2,687,470	5	3,302,152	6	3,309,058	6	3,261,988	6
Φ.Α	8,037,615	16	7,944,623	15	10,169,096	19	13,211,449	24
ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ	4,926,613		5,420,553		6,229,431		3,142,664	
ΑΝΤΛΗΣΗ	767,688		846,806		609,768		1,121,893	
Συνολική Υδροηλεκτρική	4,158,925	8	4,573,747	9	5,619,663	10	2,020,771	4
ΑΙΟΛΙΚΑ	778,632	2	943,786	1.78	1,199,377	2.22	1,333,059	2
ΜΙΚΡΑ Υ/Η	138,382	0.27	164,183	0.31	220,402	0.41	223,198	0
ΒΙΟΑΕΡΙΟ-ΒΙΟΜΑΖΑ	100,176	0.20	98,129	0.19	91,937	0.17	155,901	0
ΣΗΘ	10,317	0.02	14,395	0.03	9,114	0.02	34,028	0
ΕΙΣΑΓΩΓΕΣ – ΕΞΑΓΩΓΕΣ	2,820,579	5.51	3,780,910	7.15	4,202,388	7.78	4,354,191	8
ΑΠΕ Διασυνδ.	1,027,507	2	1,220,493	2	1,520,830	3	1,746,186	3
Σύνολο ΑΠΕ	5,186,432	10	5,794,240	11	7,140,493	14	3,766,957	7
ΣΥΝΟΛΟ	51,223,545		52,878,544		53,986,206		55,687,469	

Στον Πίνακα 5 που ακολουθεί παρουσιάζονται στοιχεία της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Πετρελαϊκούς σταθμούς και από σταθμούς ΑΠΕ για τα έτη 2004, 2005, 2006 και 2007 για το σύνολο των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών. Όπως προκύπτει από τον πίνακα η διείσδυση των ΑΠΕ στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά αυξάνει συνεχώς (από ποσοστό 7,077 % το

2004 σε 9,733% το 2007) καθώς δεν εξαρτάται από τους Μεγάλους Υδροηλεκτρικούς σταθμούς όπως συμβαίνει στην Ηπειρωτική Ελλάδα υφίσταται υδροηλεκτρική παραγωγή.

Πίνακας 5: Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά για τα έτη 2004-2007 και το ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ.

	ΕΤΟΣ 2004		ΕΤΟΣ 2005		ΕΤΟΣ 2006		ΕΤΟΣ 2007	
	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (MWH)	(%)	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (MWH)	(%)	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (MWH)	(%)	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (MWH)	(%)
ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΗ	4,447,495	92.923	4,612,884	92.377	4,794,983	90.697	5,004,946	90.27
ΑΠΕ	338,723	7.077	380,660	7.623	491,857	9.303	539,330	9.73
ΣΥΝΟΛΟ	4,786,218		4,993,544		5,286,840		5,544,276	

5.2 Στοιχεία λειτουργίας των σταθμών ΑΠΕ στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά για το έτος 2007

Στον Πίνακα 6 που ακολουθεί παρουσιάζονται για το έτος 2007 και για κάθε ένα Μη Διασυνδεδεμένο Νησί η αιχμή, η παραγωγή των συμβατικών μονάδων και η συνολική παραγωγή των σταθμών ΑΠΕ. Από τα στοιχεία του πίνακα προκύπτει ότι η συμμετοχή των ΑΠΕ στη συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνεται από 0% (νησιά στα οποία δεν λειτουργούν σταθμοί ΑΠΕ) έως 13,22% στη νήσο Κρήτη. Ο μέσος όρος της συμμετοχής των ΑΠΕ στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά για το έτος 2007 ανήλθε σε 9,73%.

Πίνακας 6: Η αιχμή και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά ΜΔΝ για το έτος 2007.

	ΑΙΧΜΗ 2007 (KW)	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ (KWH)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΕ (KWH)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ (KWH)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΠΕ ΕΠΙ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (%)
ΑΓΑΘΟΝΗΣΙ	150	451,097	0	451,097	0.00
ΑΓ. ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ	360	1,075,940	0	1,075,940	0.00
ΑΜΟΡΓΟΣ	3,150	9,394,690	0	9,394,690	0.00
ΑΝΑΦΗ	420	1,071,008	0	1,071,008	0.00
ΑΝΤΙΚΥΘΗΡΑ	72	206,736	0	206,736	0.00
ΑΣΤΥΠΑΛΛΙΑ	2,150	6,417,760	0	6,417,760	0.00
ΔΟΝΟΥΣΑ	234	551,070	0	551,070	0.00
ΕΡΕΙΚΟΥΣΑ	255	585,710	0	585,710	0.00
ΘΗΡΑ	33,000	115,052,080	0	115,052,080	0.00
ΙΚΑΡΙΑ	7,500	26,963,237	2,327,940	29,291,177	7.95
ΚΑΡΠΑΘΟΣ	9,150	33,855,973	3,392,614	37,248,587	9.11
ΚΥΘΝΟΣ	2,660	7,980,712	0	7,980,712	0.00
ΚΩΣ-ΚΑΛΥΜΝΟΣ	94,600	325,994,395	24,883,600	350,877,995	7.09
ΛΕΣΒΟΣ	71,000	274,710,684	33,264,206	307,974,890	10.80
ΛΗΜΝΟΣ	15,000	63,886,280	724,350	64,610,630	1.12
ΜΕΓΙΣΤΗ	650	2,355,109	0	2,355,109	0.00
ΜΗΛΟΣ	10,390	35,638,088	5,411,400	41,049,488	13.18
ΜΥΚΟΝΟΣ	32,600	105,153,866	1,105,800	106,259,666	1.04
ΟΘΩΝΟΙ	300	694,246	0	694,246	0.00
ΠΑΡΟΣ	61,500	201,382,757	4,352,040	205,734,797	2.12
ΠΑΤΜΟΣ	4,950	15,423,490	1,512,400	16,935,890	8.93
ΣΑΜΟΣ	35,050	138,878,223	18,126,730	157,004,953	11.55
ΣΕΡΙΦΟΣ	3,020	7,888,437	0	7,888,437	0.00
ΣΙΦΝΟΣ	5,490	16,649,670	75,520	16,725,190	0.45

ΣΚΥΡΟΣ	4,360	15,497,096	0	15,497,096	0.00
ΣΥΜΗ	3,350	12,751,858	0	12,751,858	0.00
ΣΥΡΟΣ	25,400	106,739,218	7,678,860	114,418,078	6.71
ΧΙΟΣ	56,300	201,475,415	14,239,499	215,714,914	6.60
ΡΟΔΟΣ	186,500	710,268,730	31,415,200	741,683,930	4.24
ΚΡΗΤΗ	650,300	2,565,952,820	390,820,109	2,956,772,929	13.22
ΣΥΝΟΛΟ	1,319,861	5,004,946,395	539,330,268	5,544,276,663	9.73

6. ΗΛΕΚΤΡΟΔΟΤΗΣΗ ΤΩΝ ΜΔΝ

Η ηλεκτροδότηση των ΜΔΝ στηρίζεται κατά κύριο λόγο στους αυτόνομους πετρελαϊκούς σταθμούς και στις ΑΠΕ. Υπάρχουν 18 «μικρά» αυτόνομα συστήματα με αιχμή ζήτησης έως 10 MW, 10 «μέσου μεγέθους» αυτόνομα συστήματα με αιχμή ζήτησης από 10 MW έως 100 MW και 2 «μεγάλα» αυτόνομα συστήματα με αιχμή ζήτησης άνω των 100 MW (Κρήτη, Ρόδος).

Το μέσο μεταβλητό κόστος παραγωγής πετρελαϊκών μονάδων το 2007 (δεν περιλαμβάνεται κόστος δικαιωμάτων CO₂) κυμαίνεται: για τα **μικρά συστήματα** από 140 €/MWh (Κάρπαθος) έως και 270 €/MWh (Αντικύθηρα), για τα **μέσου μεγέθους συστήματα** από 66 €/MWh (Κως-Κάλυμνος) έως και 162 €/MWh (Μύκονος), ενώ για τα **μεγάλα συστήματα Κρήτης και Ρόδου** ανήλθε σε 124 €/MWh για την Κρήτη και 93 €/MWh για τη Ρόδο. Σημειώνεται ότι για όλα τα μη διασυνδεδεμένα νησιά το μέσο μεταβλητό κόστος παραγωγής ανήλθε στα επίπεδα των 110 €/MWh.

Σχετικά με τις Υπηρεσίες Κοινής Ωφελείας (ΥΚΩ) για τα νησιά σημειώνεται ότι για το 2007 η ΔΕΗ ΑΕ εκτίμησε το πρόσθετο (σε σχέση με το κόστος παραγωγής του διασυνδεδεμένου συστήματος) κόστος ηλεκτροδότησης των νησιών σε 442 εκ. € γεγονός που οφείλεται στη διαφορά του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των νησιών και της ηπειρωτικής χώρας. Η ΔΕΗ για να εκτιμήσει τις ΥΚΩ του 2007 βασίστηκε στο κόστος παραγωγής του 2006 που ήταν 145 €/MWh για τα νησιά και 6€/MWh για το διασυνδεδεμένο σύστημα.

Η παρατηρούμενη μεταβολή των τιμών του πετρελαίου (αύξηση της τιμής του πετρελαίου από τα ~75 \$/b κατά μέσο όρο το 2007, σε περίπου ~110 \$/b κατά μέσο όρο το α' εξάμηνο του 2008 και στη συνέχεια διαρκής μείωση), σε συνδυασμό με την εξέλιξη της ισοτιμίας €/€, εκτιμάται ότι επιφέρει μια αύξηση στο μέσο μεταβλητό κόστος παραγωγής στα νησιά της τάξης του 20-25%. Κατ' επέκταση, το μέσο μεταβλητό κόστος παραγωγής σε όλα τα μη διασυνδεδεμένα νησιά εκτιμάται ότι θα υπερβεί τα 135 €/MWh το 2008 και το μέσο πλήρες κόστος παραγωγής τα 170 €/MWh και επειδή η Οριακή Τιμή του Συστήματος (ΟΤΣ) δεν αυξάνεται κατά τον ίδιο τρόπο με την αύξηση της τιμής του πετρελαίου, οι ΥΚΩ θα αυξηθούν σημαντικά (άνω των 500 εκ. € ετησίως). Με εξαίρεση την τεχνολογία των φωτοβολταϊκών και ηλιοθερμικών σταθμών, η τιμή αγοράς ενέργειας ΑΠΕ στα νησιά (~90 €/MWh) είναι σημαντικά χαμηλότερη από το μέσο μεταβλητό κόστος παραγωγής στα νησιά (~110 €/MWh το 2007 με προοπτική σημαντικής αύξησης το 2008) και **επομένως όχι μόνο δεν υπάρχει επιβάρυνση αλλά ελάφρυνση των καταναλωτών από τις ΑΠΕ στα νησιά.**

7. ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΤΩΝ ΜΔΝ

Η ΡΑΕ για πρώτη φορά ανέλαβε την πρωτοβουλία το 2003 σε συνεργασία με τη ΔΕΣΜΗΕ ΑΕ και τη ΔΕΗ ΑΕ να διερευνήσει τις προοπτικές και τις δυνατότητες διασύνδεσης των νησιών με το διασυνδεδεμένο σύστημα. Τα αποτελέσματα αυτής της πρωτοβουλίας οδήγησαν στο να συμπεριληφθεί στη Μελέτη Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς (ΜΑΣΜ) το έργο διασύνδεσης των Κυκλάδων. Το εν λόγω έργο έχει ήδη ανατεθεί στη ΔΕΗ ΑΕ από το 2006, έχει ήδη λάβει θετική γνώμη επί της Προκαταρκτικής Περιβαλλοντικής Εκτίμησης και Αξιολόγησης και αναμένεται να ολοκληρωθεί το 2010-2012.

Σημειώνεται ότι η ΡΑΕ προ διετίας είχε αναθέσει στο ΕΜΠ την εκπόνηση προκαταρκτικής μελέτης για τη διασύνδεση του συνόλου των νησιών και πρόσφατα την επικαιροποίηση αυ-

τής, τα αποτελέσματα της οποίας θα βοηθήσουν σημαντικά τη στρατηγική επιλογή της ΡΑΕ για τη διασύνδεση όλων των νησιών με το Ηπειρωτικό σύστημα.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για οικονομικούς και μόνο λόγους (αποφυγή πρόσθετων επιβαρύνσεων στους καταναλωτές) επιβάλλεται η μεγιστοποίηση του μεριδίου των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο των νησιών και ιδίως αιολικών, γεωθερμίας βιομάζας/βιοαερίου άμεσα και ίσως ηλιακών και Φ/Β στη συνέχεια, όσο τα νησιά εξυπηρετούνται από αυτόνομους πετρελαϊκούς σταθμούς

Προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι του 2020 για τις ΑΠΕ και τις εκπομπές Αερίων του Θερμοκηπίου (ΑτΘ) απαιτείται η εγκατάσταση 8.000-10.000 MW αιολικών σταθμών σε όλη την Ελληνική επικράτεια. Έτσι είναι απολύτως αναγκαία η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού των νησιών αλλά και κάθε άλλης ανανεώσιμης πηγής ενέργειας που διατίθεται στα νησιά, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα και τη μείωση της ενεργειακής εξάρτησης της χώρας.

Είναι επίσης επιβεβλημένη η διασφάλιση της απρόσκοπτης ηλεκτροδότησης των νησιών μακροπρόθεσμα και απαραίτητη η βελτίωση της παρεχόμενης τάσης στους καταναλωτές, η αλλαγή των νησιών από τους πετρελαϊκούς σταθμούς με σταδιακή αποξήλωσή τους, καθώς και η απόλαυση των ωφελειών της αγοράς.

Τα νησιά μπορούν να εξασφαλίσουν την ενεργειακή τους αυτάρκεια, εξαλείφοντας την εξάρτησή τους από το πετρέλαιο και τις εκπομπές ρύπων χωρίς να επιβαρύνουν άλλες περιοχές της χώρας. Η ήπια ανάπτυξη σταθμών ΑΠΕ στα νησιά όχι μόνο δεν βλάπτει την τουριστική ή άλλη δραστηριότητά τους αλλά αντίθετα, προσελκύει περισσότερο περιβαλλοντικά συνειδητοποιημένους πολίτες σε διεθνές επίπεδο. Η «ενεργειακή κουλτούρα» και η «ενεργειακή συνείδηση» επεκτείνεται σε ολόένα και μεγαλύτερο τμήμα του πληθυσμού της γης, καθώς οι επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών κάνουν ολόένα και περισσότερο αισθητή την παρουσία τους.

Προκειμένου να επιτευχθούν όλα τα παραπάνω η διασύνδεση των νησιών με το Ηπειρωτικό Σύστημα αποτελεί πλέον μονόδρομο.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε θερμά τον Συντονιστή την Ομάδας Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών Δρ. Ν. Μπουλαξή για τις εύστοχες παρατηρήσεις και συμβουλές του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Δ. Παπαχρήστου, Ν. Μπουλαξής, «Προοπτικές ανάπτυξης ΑΠΕ στα μη διασυνδεδεμένα νησιά», Ενσωμάτωση έργων ΑΠΕ μεγάλης κλίμακας στο Σύστημα Ηλεκτρισμού Εμπειρία και προοπτικές για την Ελλάδα, Αθήνα 6-7 Μάιου 2008.
2. Γ. Γληνού, Δ. Παπαχρήστου και Α. Παπαδόπουλος, « Η εκμετάλλευση των Αιολικής Ενέργειας στην Ελλάδα: Αναδρομή, Παρούσα κατάσταση και προοπτικές», 8^ο Εθνικό συνέδριο για τις ήπιες μορφές ενέργειας, Θεσ/νίκη 2006.
3. Ιστοσελίδα της ΡΑΕ: www.rae.gr.
4. Υπουργείο Ανάπτυξης, «3η Εθνική έκθεση για το επίπεδο διείδυσης της Ανανεώσιμης Ενέργειας το έτος 2010 (άρθρο 3 Οδηγίας 2001/77/ΕΚ), 10/2005, www.ypan.gr
5. Ν. Μπουλαξής, Γ. Γληνού, Δ. Παπαχρήστου, Μ. Παπαδόπουλος, «Προοπτικές Ανάπτυξης των ΑΠΕ στην Ελλάδα», Πρακτικά Συνεδρίου RENES, Αθήνα, 2005, σ.13.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ-ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΑ ΣΥ- ΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Α. Αγγελής-Δημάκης, Γ. Αραμπατζής και Δ. Ασημακόπουλος

Μονάδα Διαχείρισης Ενεργειακών και Περιβαλλοντικών Συστημάτων,
Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Πολυτεχνειού-
πολη Ζωγράφου, 15780, Αθήνα, e-mail: assim@chemeng.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) σε απομονωμένα ενεργειακά συστήματα θα μπορούσε να οδηγήσει σε ενεργειακή αυτονομία, χαμηλότερες τιμές καυσίμων και μεγαλύτερες προοπτικές για τη βιώσιμη ανάπτυξη της περιοχής. Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται μια μεθοδολογική προσέγγιση προγραμματισμού της ένταξης των ΑΠΕ σε ένα απομονωμένο ενεργειακό σύστημα, υπό συνθήκες αβεβαιότητας. Αρχικά, μελετάται το ενεργειακό σύστημα και εντοπίζονται όλες οι πιθανές εναλλακτικές δράσεις (μέτρα). Στη συνέχεια, με τη χρήση της Ανάλυσης Κόστους-Αποδοτικότητα και της Ανάλυσης Αυξητικού Κόστους καθορίζεται το οικονομικά αποδοτικότερο και αποτελεσματικότερο σχέδιο για την εφαρμογή τους. Τέλος, πραγματοποιείται Ανάλυση Επικινδυνότητας ώστε να προσδιοριστούν οι παράμετροι που εισάγουν αβεβαιότητα στο μοντέλο και να ελεγχθεί η επίδραση τους στον καθορισμό του τελικού σχεδίου δράσης. Η προτεινόμενη προσέγγιση εφαρμόζεται στο νησί της Λήμνου, με στόχο την ανάπτυξη ενός σχεδίου δράσης για την κάλυψη των επιπλέον ηλεκτρικών αναγκών του νησιού, σε σχέση με το 2007, με χρήση αποκλειστικά τεχνολογιών ΑΠΕ. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι επιπλέον ηλεκτρικές ανάγκες του νησιού μπορούν να καλυφθούν με χρήση τεχνολογιών ΑΠΕ, ενώ υπάρχουν περιθώρια για περαιτέρω διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό σύστημα της περιοχής.

Λέξεις-Κλειδιά: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Ανάλυση Επικινδυνότητας, Ανάλυση Κόστους-Αποδοτικότητα, Ανάλυση Αυξητικού Κόστους.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα απομονωμένα ενεργειακά συστήματα χαρακτηρίζονται από γεωγραφική ασυνέχεια, γεγονός που προκαλεί δυσκολίες στη διασύνδεση με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο και αυξάνει το κόστος της ενέργειας. Επιπλέον, οι περιορισμένοι ενεργειακοί ορυκτοί πόροι σε μια περιοχή, σε συνδυασμό με τη συνεχώς αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση, επηρεάζουν σημαντικά τη βιώσιμη ενεργειακή προοπτική της περιοχής. Η ένταξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε απομονωμένα ενεργειακά συστήματα μπορεί να αποτελέσει μια λύση για τα προβλήματα αυτά.

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται μια μέθοδος προγραμματισμού της ένταξης των ΑΠΕ σε ένα απομονωμένο ενεργειακό σύστημα, υπό συνθήκες αβεβαιότητας. Η προσέγγιση αυτή περιλαμβάνει την εφαρμογή της Ανάλυσης Κόστους-Αποδοτικότητα και της Ανάλυσης Αυξητικού Κόστους για την εύρεση των πιθανών εναλλακτικών δράσεων (μέτρων) και τον προσδιορισμό του οικονομικά αποδοτικότερου και αποτελεσματικότερου σχεδίου για την εφαρμογή τους. Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης προσέγγισης, συγκριτικά με τις παραδοσιακές τεχνικές οικονομικής αξιολόγησης, είναι η ευκολία εφαρμογής της και η ικανότητα να καθορίζει τις καταλληλότερες δράσεις μέσα από μια σύντομη και απλή διαδικασία. Πρέπει

να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη μεθοδολογία δεν προτείνει μια «άριστη» ή «ιδανική» λύση αλλά μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη επιλογή μεταξύ εναλλακτικών λύσεων, παρέχοντας μια βάση σύγκρισης των σχετικών μεταβολών κόστους και αποδοτικότητας, [1].

Ως κόστος συνήθως ορίζεται το άμεσο κόστος εφαρμογής ενός τέτοιου μέτρου, ενώ η αποδοτικότητα εκφράζεται σε όρους κάποιου φυσικού μεγέθους (π.χ. παραγόμενη ενέργεια, εκπομπές ρύπων) που σχετίζεται με την εφαρμογή του μέτρου, [2]. Ο προσδιορισμός της αποδοτικότητας αλλά και του κόστους των διαφόρων τεχνολογιών ΑΠΕ, εμπεριέχει το στοιχείο της αβεβαιότητας, η οποία οφείλεται τόσο στη φύση των πηγών αυτών όσο και στα μεταβαλλόμενα, οικονομικά κυρίως, μεγέθη. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί Ανάλυση Επικινδυνότητας, δηλαδή να προσδιοριστούν οι παράμετροι που εισάγουν αβεβαιότητα και να καθοριστεί η επίδραση τους στη βιωσιμότητα του σχεδίου.

Στη συνέχεια και στη δεύτερη ενότητα παρουσιάζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία ενώ στην τρίτη ενότητα η μεθοδολογία αυτή εφαρμόζεται στο νησί της Λήμνου και αναλύονται τα αποτελέσματα. Τέλος, στην τέταρτη ενότητα συνοψίζονται τα συμπεράσματα και διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

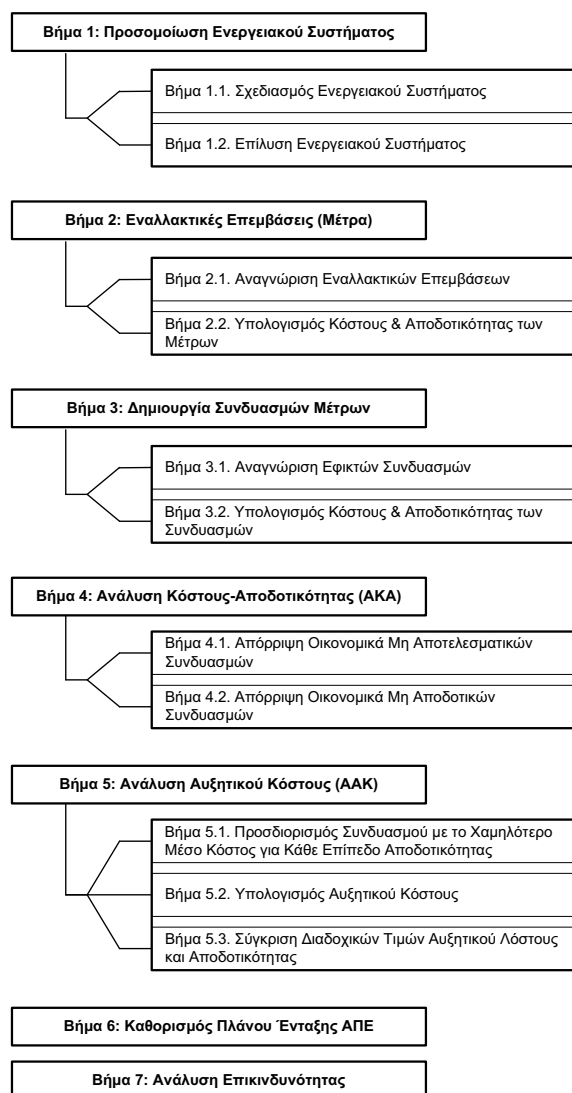
Η προτεινόμενη μέθοδος αποτελείται από μια απλή διαδικασία 7 βημάτων (Εικόνα 1), μέσα από την οποία καθορίζεται το σχέδιο ένταξης των ΑΠΕ στην περιοχή μελέτης, με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Αρχικά, σχεδιάζεται και επιλύεται το ενεργειακό σύστημα της περιοχής, με στόχο την εκτίμηση της παρούσας και της μελλοντικής ενεργειακής ζήτησης.

Στη συνέχεια, εξετάζονται όλες οι πιθανές εναλλακτικές επεμβάσεις (μέτρα), λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής (γεωγραφικοί περιορισμοί, δυναμικό ΑΠΕ), και εκτιμάται το κόστος και η αποδοτικότητά τους.

Το 3^ο Βήμα έχει ως στόχο τη δημιουργία όλων των εφικτών λύσεων (συνδυασμών μέτρων), και τον υπολογισμό του κόστους και της αποδοτικότητας όλων των συνδυασμών.

Στο 4^ο Βήμα πραγματοποιείται η Ανάλυση Κόστους Αποδοτικότητας, με στόχο την απόρριψη των οικονομικά μη αποτελεσματικών και μη αποδοτικών λύσεων. Ως οικονομικά μη αποτελεσματικές ορίζονται οι λύσεις που, για την ίδια αποδοτικότητα, έχουν μεγαλύτερο κόστος, ενώ οικονομικά μη αποδοτικές είναι οι λύσεις που για το ίδιο κόστος, εμφανίζουν μικρότερη αποδοτικότητα [3].



Εικόνα 1. Προτεινόμενη Μέθοδος

Στο 5^ο Βήμα, αρχικά υπολογίζεται το μέσο κόστος των οικονομικά αποδοτικών και αποτελεσματικών λύσεων, με στόχο την απόρριψη των λύσεων που έχουν χαμηλότερο συνολικό κόστος αλλά είναι οικονομικά μη αποδοτικές. και στη συνέχεια, οι λύσεις που έχουν προκύψει συγκρίνονται με βάση το αυξητικό κόστος, ώστε να προσδιοριστεί αν το επόμενο επίπεδο αποδοτικότητας δικαιολογεί το επιπλέον οικονομικό κόστος. Ως αυξητικό κόστος ορίζεται το πηλίκο της διαφοράς στο κόστος δύο διαδοχικών λύσεων προς τη διαφορά τους σε αποδοτικότητα. Το τελικό αποτέλεσμα μπορεί να παρουσιαστεί σχηματικά μέσα από την καμπύλη αυξητικού κόστους, η οποία εκφράζει παραστατικότερα τη σχέση μεταξύ κόστους και αποδοτικότητας. Μια ανωμαλία (απότομη κορυφή) στην καμπύλη υποδεικνύει λύση, για την οποία δεν δικαιολογείται το επιπλέον κόστος, [3, 4].

Συγκρίνοντας τις λύσεις που προέκυψαν από το 5^ο Βήμα με την εκτίμηση της μελλοντικής ζήτησης, διαμορφώνεται το προτεινόμενο πλάνο ένταξης των ΑΠΕ στο ενεργειακό σύστημα της περιοχής (6^ο Βήμα). Τέλος, στο 7^ο Βήμα (Ανάλυση Επικινδυνότητας) προσδιορίζονται οι παράμετροι του μοντέλου που εισάγουν αβεβαιότητα κατά την εκτίμηση του κόστους, καθορίζεται το εύρος τιμών τους και ελέγχεται η επίδραση τους στον καθορισμό του τελικού σχεδίου δράσης με τη βοήθεια προσομοίωσης Monte Carlo.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται στο νησί της Λήμνου, με τη χρήση λογισμικού που έχει αναπτυχθεί από την Μονάδα Διαχείρισης Ενεργειακών και Περιβαλλοντικών Συστημάτων (ΜΔΕΠΣ), της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

3. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Η Λήμνος βρίσκεται στο Βορειοανατολικό Αιγαίο, έχει συνολική έκταση 478 km² και πληθυσμό 18104 κατοίκους, σύμφωνα με την απογραφή του 2001. Το νησί δεν είναι διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό σύστημα της ηπειρωτικής Ελλάδας, αλλά διαθέτει αυτόνομο ηλεκτρικό σύστημα, το οποίο αποτελείται από ένα θερμικό σταθμό (συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 21140 kW) και ένα αιολικό πάρκο (συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1140 kW). Όλες οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εισάγονται από την ηπειρωτική Ελλάδα και από τα γύρω νησιά. Η ένταξη των ΑΠΕ στο νησί θα βοηθούσε σημαντικά στη διασφάλιση ενεργειακής ασφάλειας και αυτονομίας.



Εικόνα 2: Θέση της Λήμνου

Μια εκτίμηση του εκμεταλλεύσιμου ανανεώσιμου δυναμικού του νησιού αποκαλύπτει σημαντικές δυνατότητες ένταξης των ΑΠΕ στο ενεργειακό του σύστημα. Αναλυτικότερα, στην περιοχή πνέουν σχετικά ισχυροί άνεμοι (μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου ≈ 5 m/s) και επικρατεί ηλιοφάνεια (μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια ≈ 4.8 kWh/m²d) σε όλη της διάρκεια του έτους. Στη βορειοδυτική πλευρά του νησιού υπάρχουν γεωθερμικά πεδία, χαμηλής ενθαλπίας, με τη θερμοκρασία των υδάτων να φτάνει τους 50°C. Η κυριότερη γεωργική δραστηριότητα είναι η καλλιέργεια των σιτηρών, που αφήνει μια σημαντική ποσότητα γεωργικών υπολειμμάτων ετησίως, ενώ η σημαντικότερη κτηνοτροφική δραστηριότητα στην περιοχή είναι η εκτροφή προβάτων (Πίνακας 1), [5,6].

Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στο νησί της Λήμνου για το έτος 2007 έχει εκτιμηθεί, σε προηγούμενες μελέτες, ίση με 53530 MWh, [7]. Ο στόχος που τίθεται είναι η κάλυψη των επιπλέον ηλεκτρικών αναγκών του νησιού, σε σχέση με το 2007, αποκλειστικά με τη χρήση τεχνολογιών ΑΠΕ. Για την εκτίμηση της εξέλιξης της ενεργειακής ζήτησης εξετάζονται δυο εναλλακτικά σενάρια. Το πρώτο (Σενάριο Βάσης) βασίζεται σε ιστορικά στοιχεία, υποθέτο-

ντας διαφορετικούς ρυθμούς ανάπτυξης για κάθε τομέα, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις της ΔΕΗ, [8]. Το δεύτερο (Σενάριο Υψηλής Ζήτησης) λαμβάνει επιπλέον υπόψη την επικείμενη έναρξη λειτουργίας πανεπιστημιακού ιδρύματος στο νησί και την επακόλουθη αύξηση του πληθυσμού και της ενεργειακής ζήτησης, [7].

Πίνακας 1: Γεωργικά υπολείμματα και ζωικό κεφάλαιο ανά Δημοτικό Διαμέρισμα				
Δ/Δ	Γεωργικά Υπολείμματα (σε τόνους)		Ζωικό Κεφάλαιο	
	Σιτηρά	Κριθάρι	Πρόβατα	Αίγες
Αττικής	4783	3577	21159	3387
Μούδρου	3518	10146	12044	843
Μύρινας	389	1025	16581	5077
Ν. Κούταλης	1469	2185	17131	2975

Οι τεχνολογίες ΑΠΕ που εξετάζονται είναι ανεμογεννήτριες (Α/Γ), φωτοβολταϊκά (Φ/Β), θερμικός σταθμός καύσης βιομάζας και μονάδα συμπαραγωγής που λειτουργεί με βιοαέριο. Η χρήση γεωθερμίας δεν προτείνεται, καθώς τα γεωθερμικά πεδία της Λήμνου έχουν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και άρα είναι ακατάλληλα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πιθανά εφικτά εναλλακτικά μέτρα επιλέγονται μετά από επιτόπια έρευνα και διαβούλευση με τοπικούς φορείς, λαμβάνοντας υπόψη το διαθέσιμο δυναμικό ΑΠΕ (Πίνακας 2).

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να εγκατασταθούν στο υπάρχον αιολικό πάρκο και η εγκατεστημένη ισχύς επιλέγεται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας μεγαλύτερος του 25 %. Ο θερμικός σταθμός βιομάζας επιλέγεται να εγκατασταθεί στον ίδιο χώρο με το υπάρχον εργοστάσιο της ΔΕΗ, ώστε να εκμεταλλευτεί το υφιστάμενο δίκτυο μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Εξετάζονται δυο διαφορετικές εναλλακτικές περιπτώσεις: (α) Μονάδα 1 MW με εκμετάλλευση των γεωργικών υπολειμμάτων από τα Δ/Δ Αττικής, Μύρινας και Ν. Κούταλης και ακτίνα συγκομιδής καύσιμων υλών 30 km και (β) Μονάδα 2 MW με εκμετάλλευση των γεωργικών υπολειμμάτων όλου του νησιού και ακτίνα συγκομιδής 45 km. Αντίστοιχα, καταστρώνονται και εξετάζονται δύο εναλλακτικά μέτρα που αφορούν το βιοαέριο: (α) Μονάδα 300 kW, που επεξεργάζεται τα ζωικά υπολείμματα των Δ/Δ Μύρινας και Ν. Κούταλης, με ακτίνα συγκομιδής 20 km και (β) Μονάδα 630 kW που επεξεργάζεται τα ζωικά υπολείμματα όλου του νησιού, με ακτίνα συγκομιδής 45 km.

Οι εκτιμήσεις του κόστους, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2, αντιπροσωπεύουν το συνολικό ετήσιο κόστος για την εφαρμογή κάθε μέτρου. Αποτελούν το άθροισμα: (α) του τοκοχρεολυσίου του αρχικού κόστους επένδυσης, (β) του ετήσιου κόστους λειτουργίας και συντήρησης της εγκατάστασης, (γ) του κόστους αγοράς και μεταφοράς του καυσίμου και (δ) του κόστους των εκπεμπόμενων ρύπων, όπου απαιτείται. Για την εκτίμηση του κόστους κάθε μέτρου γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

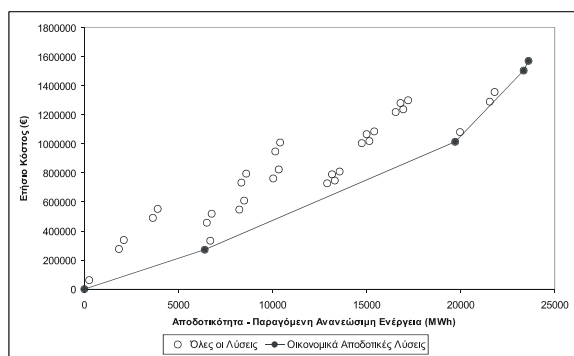
- Το κόστος επένδυσης (C_{WT}) για τις Α/Γ κυμαίνεται μεταξύ 1050 και 1250 €/kW, με μέση τιμή 1150 €/kW, ενώ το ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας (OM_{WT}) από 4.5 έως 7.5 €/kW, με μέση τιμή 6 €/kW. Ο χρόνος ζωής των ανεμογεννητριών θεωρείται ίσος με 20 χρόνια, [9].
- Το κόστος επένδυσης για τα Φ/Β θεωρείται ίσο με 5000 €/kW, το ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας 6 €/kW και η διάρκεια ζωής ίση με 25 χρόνια, [10].
- Το κόστος επένδυσης για τους καυστήρες βιομάζας υπολογίζεται με βάση οικονομίες κλίμακας, θεωρώντας ότι για 3 MW το κόστος είναι 2600000 € και ο συντελεστής αναγωγής ισούται με 0.65. Το σταθερό ετήσιο κόστος (OM_{BM}) κυμαίνεται μεταξύ 15 και 25 €/kW, με μέση τιμή 20 €/kW, ενώ το μεταβλητό ετήσιο κόστος ισούται με

1.2 €/kWh. Το κόστος αγοράς της βιομάζας (PUR_{BM}) κυμαίνεται από 8-20 €/tn, με επικρατέστερη τιμή τα 10 €/tn, ενώ το κόστος μεταφοράς του καυσίμου (TR_{BM}) ισούται με 3 €/tn στην πρώτη περίπτωση (με τη μικρή ακτίνα) και 5 €/tn στη δεύτερη, με απόκλιση ± 1 €/tn. Η διάρκεια ζωής της επένδυσης ισούται με 35 χρόνια, [11].

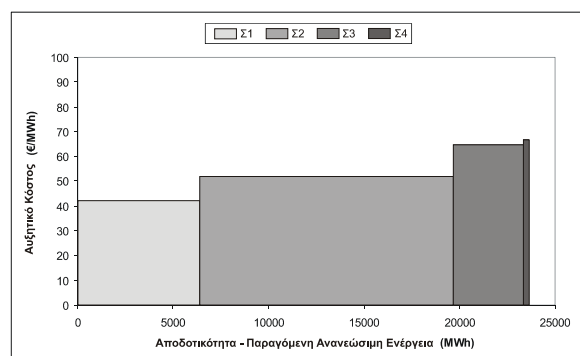
- Αντίστοιχα, για το βιοαέριο, το κόστος επένδυσης υπολογίζεται με βάση οικονομίες κλίμακας, θεωρώντας ότι για 1 MW το κόστος είναι 6000000 € και ο συντελεστής αναγωγής ισούται με 0.7. Το σταθερό ετήσιο κόστος (OMF_{BG}) κυμαίνεται μεταξύ 15 και 25 €/kW, με μέση τιμή 20 €/kW, ενώ το μεταβλητό ετήσιο κόστος (OMV_{BG}) από 23 έως 37 €/kWh με επικρατέστερη τιμή 30 €/kWh. Τέλος, το κόστος μεταφοράς του καυσίμου (TR_{BG}) ισούται με 4.2 €/tn στην πρώτη περίπτωση και 6.2 €/tn στη δεύτερη, με απόκλιση ± 1 €/tn. Η διάρκεια ζωής της επένδυσης ισούται με 20 χρόνια, [12].
- Τέλος, το επιτόκιο αναγωγής ισούται με 6% και το κόστος των εκπεμπόμενων ρύπων ισούται με 30 €/tnCO₂.

Για να ληφθούν υπόψη όλα τα δυνατά οφέλη από τη χρήση των ΑΠΕ, η αποδοτικότητα κάθε εναλλακτικής δράσης εκφράζεται σε όρους ετήσιας ανανεώσιμης παραγόμενης ενέργειας.

Πίνακας 2: Εναλλακτικά μέτρα που εξετάστηκαν				
ΑΠΕ	Μέτρο	Περιγραφή	Ετήσιο Κόστος	Αποδοτικότητα
Αιολική Ενέργεια	WT1	3 Α/Γ × 850 kW	270428 €	6400 MWh
Βιομάζα	BM1	Μονάδα Ισχύος 1MW	456780 €	6500 MWh
	BM2	Μονάδα Ισχύος 2MW	745558 €	13300 MWh
Ηλιακή Ενέργεια	PV1	Συστοιχία Φ/Β 160 kW	63360 €	275 MWh
Βιοαέριο	BG1	Μονάδα Ισχύος 300kW	272453 €	1835 MWh
	BG2	Μονάδα Ισχύος 630kW	484539 €	3640 MWh



Εικόνα 3: Αποτελέσματα ΑΚΑ



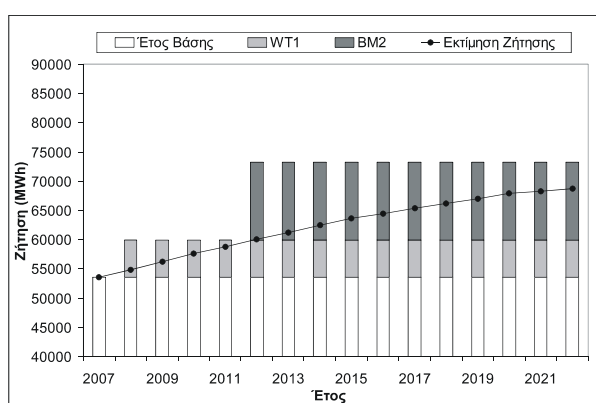
Εικόνα 4: Καμπύλη Αυξητικού Κόστους

Πίνακας 3: Οικονομικά αποδοτικές και αποτελεσματικές λύσεις	
Σ1	3 Ανεμογεννήτριες Ισχύος 850 kW
Σ2	Σ1 + Καυστήρας Βιομάζας Ισχύος 2 MW
Σ3	Σ2 + Μονάδα Βιοαερίου Ισχύος 630 kW
Σ4	Σ3 + Συστοιχία Φ/Β (160 kW)

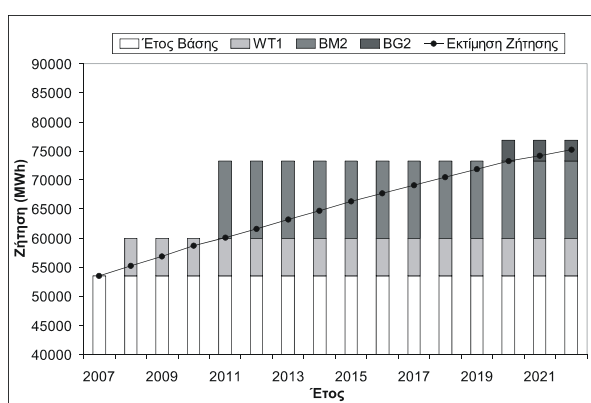
Η Εικόνα 3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κόστους-Αποδοτικότητα. Από τις 35 πιθανές και αποδεκτές λύσεις (συνδυασμούς μέτρων) που προέκυψαν από το 3^ο Βήμα, οι

τέσσερις αναγνωρίζονται ως οικονομικά αποδοτικές και αποτελεσματικές (4^ο Βήμα) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Κάθε σημείο της Εικόνας 3 εκφράζει το κόστος και την αποδοτικότητα της αντίστοιχης λύσης. Η καμπύλη που ενώνει τις οικονομικά αποδοτικές και αποτελεσματικές λύσεις ονομάζεται Όριο Κόστους-Αποδοτικότητας (Cost-Effectiveness Frontier). Όλες οι λύσεις που βρίσκονται επάνω και αριστερά του ορίου είναι οικονομικά μη αποδοτικές ή μη αποτελεσματικές

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Αυξητικού Κόστους (5^ο Βήμα). Κάθε στήλη στο γράφημα εκφράζει το αυξητικό κόστος και την αποδοτικότητα της αντίστοιχης λύσης. Η διαφορά ύψους μεταξύ δυο διαδοχικών στηλών υποδηλώνει το επιπλέον κόστος που πρέπει να καταβληθεί ώστε να επιτευχθεί το επόμενο επίπεδο αποδοτικότητας. Τα αποτελέσματα από την Ανάλυση Αυξητικού Κόστους υποδεικνύουν ομαλή μετάβαση από τον ένα επίπεδο αποδοτικότητας στο επόμενο, και κατά συνέπεια καμία λύση δεν μπορεί να αποκλειστεί σε αυτό το βήμα ως οικονομικά ασύμφορη.



Εικόνα 5: Πλάνο Ένταξης-Σενάριο Βάσης

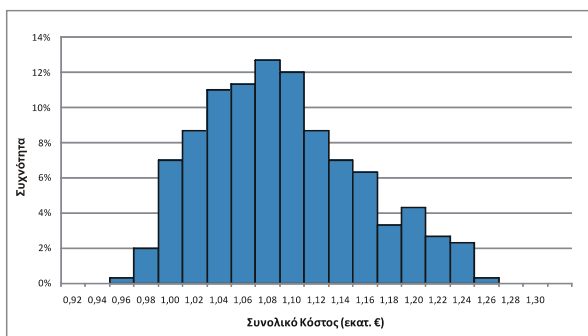


Εικόνα 6: Πλάνο Ένταξης-Σενάριο Υψηλής Ζήτησης

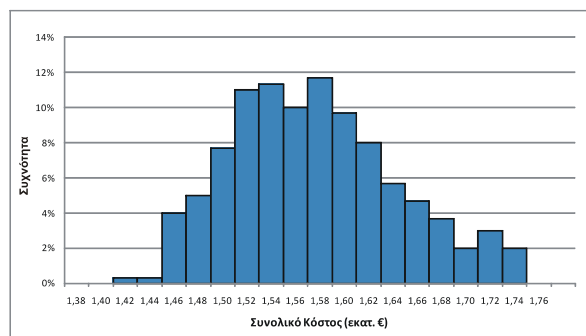
Για τον καθορισμό του τελικού πλάνου εφαρμογής των λύσεων, ελέγχεται αν ικανοποιείται ο στόχος που έχει τεθεί, δηλαδή η κάλυψη των επιπλέον ηλεκτρικών αναγκών του νησιού, σε σχέση με το 2007. Η ικανοποίηση της επιπλέον ζήτησης, για κάθε σενάριο, παρουσιάζεται στις Εικόνες 5 και 6. Η καμπύλη εκφράζει την εκτιμώμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Οι στήλες αντιπροσωπεύουν τη συνολική ετήσια παροχή ενέργειας, δηλαδή το άθροισμα της ζήτησης που καλύπτεται κατά το έτος βάσης και της επιπλέον ενέργειας που παρέχεται με την εφαρμογή της κάθε λύσης. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι ακόμα και για το σενάριο υψηλής ζήτησης, η επιπλέον ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να καλυφθεί με τη χρήση ΑΠΕ. Τα δύο πλάνα ένταξης συνοψίζονται στον Πίνακα 4. Είναι προφανές ότι στο σενάριο υψηλής ζήτησης, τα μέτρα που επιλέγονται είναι περισσότερα από το σενάριο βάσης, και, η ένταξη της μονάδας βιομάζας γίνεται ένα χρόνο νωρίτερα.

Πίνακας 4: Πλάνο ένταξης ΑΠΕ για κάθε σενάριο		
Έτος	Σενάριο Βάσης	Σενάριο Υψηλής Ζήτησης
2008	3 Α/Γ ×850 kW	3 Α/Γ ×850 kW
2011	-	Μονάδα Βιομάζας Ισχύος 2MW
2012	Μονάδα Βιομάζας Ισχύος 2MW	-
2020	-	Μονάδα Βιοαερίου Ισχύος 630 kW

Για να ελεγχθεί η επίδραση της αβεβαιότητας πραγματοποιείται Ανάλυση Επικινδυνότητας με τη χρήση προσομοίωσης Monte Carlo. Για τις παραμέτρους που επηρεάζουν το κόστος χρησιμοποιούνται τα διαστήματα τιμών που αναφέρθηκαν. Για την ενέργεια που παράγεται από τις Α/Γ και τα Φ/Β θεωρείται ένα περιθώριο σφάλματος στην εκτίμηση $\pm 20\%$, ενώ για τη βιομάζα και το βιοαέριο το σφάλμα αυτό κυμαίνεται στο $\pm 5\%$. Η κατανομή του συνολικού κόστους για το σχέδιο δράσης των δύο σεναρίων παρουσιάζεται στις Εικόνες 7 και 8. Το ύψος κάθε στήλης εκφράζει το ποσοστό των τιμών οι οποίες βρίσκονται στο διάστημα που προσδιορίζεται από το πλάτος της στήλης. Η τιμή που αντιστοιχεί στο μέσο του εύρους κάθε στήλης εμφανίζεται στον οριζόντιο άξονα. Για το Σενάριο Βάσης, το μέσο κόστος είναι 1071000 €, ενώ το 50% των τιμών κυμαίνεται μεταξύ 1022000 € και 1111000 €. Το συνολικό κόστος υπερβαίνει το 1200000 € μόνο στο 5% των επαναλήψεων ενώ είναι μικρότερο του 1000000 € στο 9% των περιπτώσεων. Αντίστοιχα, για το Σενάριο Υψηλής Ζήτησης το μέσο κόστος είναι 1556000 € ενώ το 50% των τιμών κυμαίνεται μεταξύ 1500000 € και 1600000 €. Το συνολικό κόστος υπερβαίνει το 1700000 € μόνο στο 5% των επαναλήψεων ενώ είναι μικρότερο του 1500000 € στο 10% των περιπτώσεων. Η μορφή της κατανομής προσεγγίζει και στις δύο περιπτώσεις μια θετικά ασύμμετρη κατανομή, μόνο που στο σενάριο υψηλής ζήτησης είναι μετατοπισμένη σε υψηλότερες τιμές του οριζόντιου άξονα.

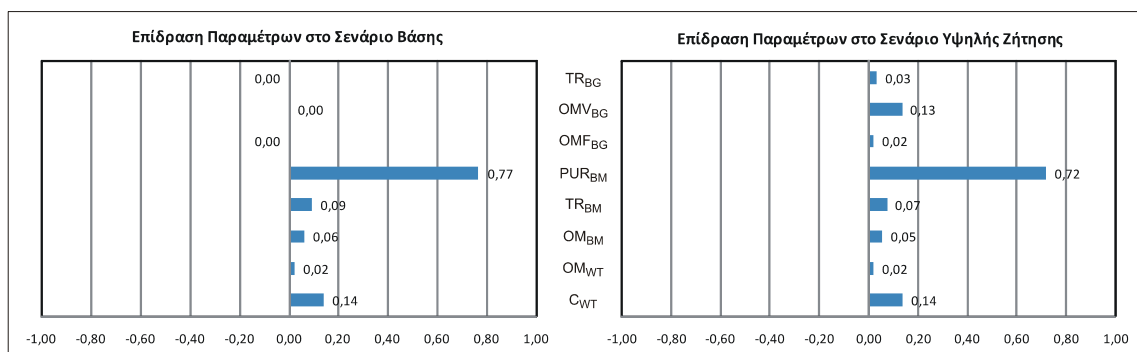


Εικόνα 7: Ιστόγραμμα Συχνοτήτων Συνολικού Κόστους (Σενάριο Βάσης)



Εικόνα 8: Ιστόγραμμα Συχνοτήτων Συνολικού Κόστους (Σενάριο Υψηλής Ζήτησης)

Η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στη διαμόρφωση του συνολικού κόστους παρουσιάζεται στην Εικόνα 9. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζουν τη σχετική συνεισφορά της αβεβαιότητας κάθε παραμέτρου στη διακύμανση του συνολικού κόστους. Στον οριζόντιο άξονα δεν υπάρχουν μονάδες, καθώς ο άξονας αυτός εκφράζει μια σχετική ένδειξη της συμβολής κάθε παραμέτρου. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος της οριζόντιας στήλης, τόσο μεγαλύτερη είναι και η συμβολή της παραμέτρου, που αντιστοιχεί στη στήλη αυτή, στη μεταβλητότητα του συνολικού κόστους. Η παράμετρος με τη σημαντικότερη επίδραση στη διακύμανση του συνολικού κόστους είναι και στις δύο περιπτώσεις είναι η τιμή της βιομάζας.



Εικόνα 9: Επίδραση της αβεβαιότητας των παραμέτρων στη διακύμανση του κόστους

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια μεθοδολογική προσέγγιση προγραμματισμού της ένταξης των ΑΠΕ σε ένα απομονωμένο ενεργειακό σύστημα, υπό συνθήκες αβεβαιότητας, και η εφαρμογή της στο νησί της Λήμνου. Μέσα από μια απλή και σύντομη διαδικασία καθορίστηκε ένα σχέδιο δράσης για την κάλυψη ενός μέρους των ηλεκτρικών αναγκών του νησιού. Η διαδικασία μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί ώστε να καλύπτει πολλαπλούς στόχους, μέσω της επιλογής κατάλληλων δεικτών που εκφράζουν κοινωνικά ή περιβαλλοντικά κριτήρια.

Ένα ενδεχόμενο το οποίο δεν εξετάστηκε στην παρούσα εργασία είναι η μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων διαχρονικά. Η κατάρτιση του σχεδίου δράσης έγινε με βάση τις βραχυπρόθεσμες πιθανές μεταβολές στη τιμή τους. Αν, όμως, σε ένα ευρύτερο χρονικό ορίζοντα (π.χ. δεκαετίας), η τιμή των Φ/Β μειωθεί αισθητά (π.χ. υποδιπλασιαστεί) τότε πιθανότατα εκείνη τη στιγμή η επιλογή τους θα είναι πιο συμφέρουσα σε σχέση με την επιλογή κάποιου άλλου εναλλακτικού μέτρου. Κατά συνέπεια, ένα πεδίο περαιτέρω έρευνας και βελτίωσης του μοντέλου είναι η εισαγωγή σε αυτό της διάστασης του χρόνου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Yoe, C., «Incremental Cost Analysis Primer for Environmental Resources Planning (draft)», Prepared for the U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Alexandria Virginia, 1992.
2. RPA, «CEA and Developing a Methodology for Assessing Disproportionate Costs», Final Report for Defra, WAG, SE and DOENI, July 2004.
3. Orth, K., «Cost-effectiveness analysis for environmental planning: Nine EASY Steps», U.S. Army Corps of Engineers, Water Resources Support Center, Institute for Water Resources, Alexandria Virginia, 1994.
4. Angelis-Dimakis, A., Trogadas, P., Arampatzis, G., and Assimacopoulos, D., «Cost Effectiveness Analysis for Renewable Energy Sources Integration in the Island of Lemnos, Greece», iEMSs, Barcelona, 2008.
5. Τρωγάδας, Π., «Μελέτη Εναλλακτικών Σεναρίων για την Ένταξη των ΑΠΕ στο Ενεργειακό Σύστημα της Λήμνου», Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα 2005.
6. ΕΣΥΕ, «Απογραφή Γεωργίας και Κτηνοτροφίας, 1999-2000»
7. Αγγελής-Δημάκης, Α., «Ενεργειακός Σχεδιασμός – Εφαρμογή στην Επαρχία Λήμνου», Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα 2005.
8. Karalis, G., Zervos, A., Panaras, G., and Garofallis, P., «Towards 100% RES supply in the island of Lemnos-Greece», International Conference: RES for island tourism and water, Crete, Greece, 2000.
9. Blanco, M. I., «The Economics of Wind Energy», Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008.
10. Diakoulaki, D., Mirasgedis, S., Tziantzi, M., «Environmental Externalities and the Development of Renewable Energy Sources», EAERE2000 Conference, Rethymnon, Greece, 2000.
11. Boukis, I., Vassilakos, N., Karellas, S., and Kakaras, E., «Techno-economic Analysis of the Energy Exploitation of Biomass Residues in Heraklion Prefecture, Crete», Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008.
12. Fiorese, G., Guariso, G. and Polimeni, A., «Optimizing Biogas Production: An Application to an Italian Farming District», iEMSs, Barcelona, 2008.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ-ΟΦΕΛΟΥΣ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΛΑΔΑΣ ΚΑΙ ΚΥΠΡΟΥ

Χ. Τουρκολιάς, Δ. Διακουλάκη

Εργ. Βιομηχανικής και Ενεργειακής Οικονομίας, Σχολή Χημικών Μηχανικών,
Ε.Μ. Πολυτεχνείο, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, 15780 Αθήνα,
e-mail: ctourkolias@central.ntua.gr, diak@chemeng.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή εξετάζονται και αξιολογούνται διαφορετικά σενάρια για την επέκταση των ηλεκτρικών συστημάτων της Ελλάδας και της Κύπρου μέχρι το 2020. Τα σενάρια αναφοράς έχουν διαμορφωθεί από διεθνείς και εθνικούς φορείς, ενώ αναπτύσσονται εναλλακτικά σενάρια έτσι ώστε να καλύπτονται οι στόχοι της ΕΕ για το μερίδιο των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή και κατ' επέκταση στο σύνολο της ενεργειακής κατανάλωσης. Η αξιολόγηση στηρίζεται στη μεθοδολογία της Ανάλυσης Κόστους-Οφέλους και αξιοποιεί τις εκτιμήσεις του εξωτερικού κόστους των βασικών τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής που έχουν προκύψει από πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες στην ΕΕ. Τα αποτελέσματα δείχνουν τη σημαντική υπεροχή των σεναρίων που υποθέτουν σημαντική διείσδυση ΑΠΕ. Ειδικότερα προκύπτει ότι η ανάπτυξη των ΑΠΕ στην Ελλάδα και την Κύπρο αποτελεί μία ιδιαίτερα ελκυστική προοπτική, ιδιαίτερα αν ληφθεί υπόψη η σταδιακή ενσωμάτωση του εξωτερικού κόστους της κλιματικής μεταβολής στο μηχανισμό της αγοράς.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην ηλεκτροπαραγωγή αποτελεί σταθερή επιδίωξη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) καθώς εξυπηρετεί και τους 3 στόχους της ενεργειακής της στρατηγικής: α) την αειφορία του ενεργειακού συστήματος και την καταπολέμηση της κλιματικής μεταβολής, β) την ενίσχυση της ασφάλειας της ενεργειακής τροφοδοσίας, και γ) την αποδοτική λειτουργία της εσωτερικής αγοράς ενέργειας. Η ενεργειακή αυτή στρατηγική αποτυπώνεται σε μία επετειακού χαρακτήρα απόφαση του Συμβουλίου Αρχηγών των κρατών μελών της ΕΕ το 2007 [1], ενώ το 2008 η απόφαση συμπληρώνεται με σχέδια δράσης και κατανομές υποχρεώσεων μεταξύ των κρατών μελών. Ειδικότερα, σύμφωνα με το σύστημα κατανομής βαρών ο στόχος του 20% συμμετοχής των ΑΠΕ στο σύνολο της Ακαθάριστης Εγχώριας Ενεργειακής Κατανάλωσης για το 2020 εξειδικεύεται για την Ελλάδα στο 18% και για την Κύπρο στο 13%.

Από τη μέχρι σήμερα εξέλιξη της διείσδυσης των ΑΠΕ στα ηλεκτρικά συστήματα των χωρών μελών της ΕΕ, γίνεται φανερό ότι μία μεγάλης κλίμακας διείσδυση των σχετικών τεχνολογιών δεν προκύπτει αυθόρμητα από τις δυνάμεις της αγοράς. Και αυτό γιατί το ιδιωτικό κόστος των ΑΠΕ είναι κατά κανόνα υψηλότερο από εκείνο των συμβατικών μορφών ενέργειας. Όμως, αν στο ιδιωτικό κόστος προστεθεί το εξωτερικό περιβαλλοντικό κόστος, δηλαδή το κόστος των επιπτώσεων από την παραγόμενη ρύπανση στην ανθρώπινη υγεία, το φυσικό περιβάλλον και το κλίμα, προκύπτει το κοινωνικό κόστος της ενέργειας το οποίο μεταβάλλει σημαντικά την κοινωνική ελκυστικότητα των διαφόρων ενεργειακών μορφών και τεχνολογιών. Αν και οι πρώτες εκτιμήσεις των εξωτερικών οικονομιών της ενέργειας

χρονολογούνται από τα τέλη της δεκαετίας του '80, μία συστηματική ερευνητική προσπάθεια αρχίζει το 1992, όταν η Ευρωπαϊκή Επιτροπή προωθεί το πρόγραμμα ExternE, με στόχο την ανάπτυξη ενός συνεπούς μεθοδολογικού πλαισίου αποτίμησης του εξωτερικού κόστους της ηλεκτροπαραγωγής και την εφαρμογή του σε όλα τα κράτη μέλη [2,3].

Σήμερα, έχει ευρύτερα αναγνωρισθεί ότι ο ενεργειακός σχεδιασμός και η διαμόρφωση των πολιτικών θα πρέπει να στηρίζεται στη θεώρηση του κοινωνικού κόστους, με απώτερο στόχο την πλήρη ενσωμάτωση του εξωτερικού κόστους της ενέργειας στο μηχανισμό της αγοράς. Τα πρώτα αποτελέσματα του προγράμματος ExternE έχουν ήδη ευρύτατα αξιοποιηθεί στην αξιολόγηση πολιτικών και την έκδοση σχετικών Οδηγιών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ιδιαίτερα αυτών που αναφέρονται στην ποιότητα της ατμόσφαιρας. Ενδεικτικά αναφέρονται η Οδηγία 1999/30/EC για σωματίδια, NO₂, SO₂ και μόλυβδο, η Οδηγία 2000/76/EC για τα εθνικά ανώτατα όρια εκπομπών SO₂, NO_x, VOC και NH₃ στις χώρες της ΕΕ για το 2010, η Οδηγία 2001/80/EC για Μεγάλες Εγκαταστάσεις Καύσης κλπ.

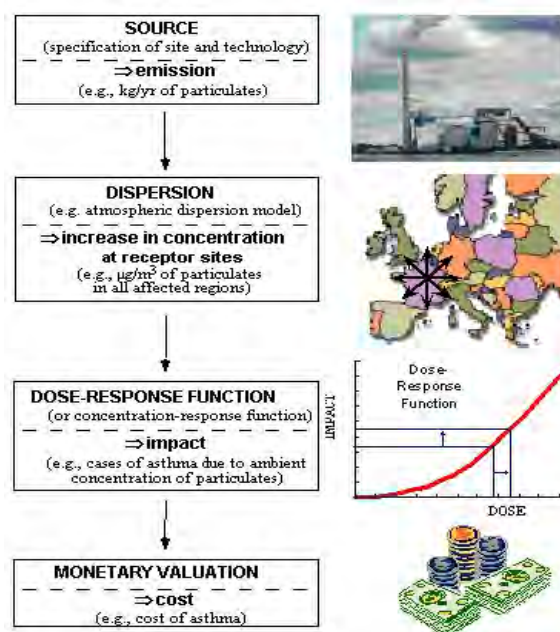
Στην εργασία αυτή αξιοποιούνται οι νεότερες εκτιμήσεις κοινωνικού κόστους για τη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων επέκτασης των ηλεκτρικών συστημάτων της Ελλάδας και της Κύπρου μέχρι το 2020. Ειδικότερα, συγκρίνεται το Σενάριο Αναφοράς κάθε χώρας με σενάρια ανάπτυξης των ΑΠΕ που διασφαλίζουν την επίτευξη του ευρωπαϊκού στόχου το 2020 και εφαρμόζεται Ανάλυση Κόστους-Οφέλους με βάση τις πρόσθετες επενδύσεις και τα επιτυγχανόμενα κοινωνικά οφέλη που απαιτούνται σε κάθε περίπτωση.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

2.1 Η μεθοδολογία ExternE

Η μεθοδολογική προσέγγιση ExternE βασίζεται στη μέθοδο της Συνάρτησης Ζημίας (ΣΖ) (Damage Function Approach ή Impact Pathway Approach), που αποτελεί μία σειριακή διαδικασία ανάλυσης κατά την οποία οι εκπομπές ή άλλα φορτία ή οχλήσεις διαχέονται στο περιβάλλον και οδηγούν σε περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως απεικονίζεται γραφικά στην Εικόνα 1. Τα βασικά στάδια της μεθοδολογίας είναι τα εξής:

1. **Προσδιορισμός των ρυπαντικών φορτίων** που εκλύονται από την εξεταζόμενη μονάδα.
2. **Εκτίμηση της διάχυσης των φορτίων** στο περιβάλλον με χρήση κατάλληλων μοντέλων διασποράς και υπολογισμός των αντίστοιχων συγκεντρώσεων ρύπων σε κάθε θέση του περιβάλλοντος αναφοράς.
3. **Εκτίμηση σε φυσικούς όρους της ζημίας ή του οφέλους** που υφίστανται οι αποδέκτες με χρήση κατάλληλων συναρτήσεων έκθεσης-απόκρισης για κάθε κατηγορία αποδεκτών.
4. **Οικονομική αποτίμηση επιπτώσεων** με χρήση τεχνικών που αντλούνται από τη θεωρία οικονομικών της ευημερίας (welfare economics).



Εικόνα 1: Τα στάδια της μεθοδολογίας ExternE

Με τον τρόπο αυτό οι προκαλούμενες επιπτώσεις και οι συνεπαγόμενες ζημιές ή οφέλη από τη λειτουργία μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής υπολογίζονται σε οριακή βάση, για κάθε δηλαδή πρόσθετη μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, παίρνοντας σε κάθε περίπτωση υπόψη τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία και το περιβάλλον αναφοράς, δηλαδή το είδος, το πλήθος και τη γεωγραφική διασπορά των αποδεκτών.

Στη διάρκεια των τελευταίων 15 ετών η μεθοδολογία ExternE συμπληρώνεται, αναθεωρείται και επεκτείνεται έτσι ώστε να συμπεριλάβει περισσότερους ρύπους και περισσότερες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ενσωματώνοντας ταυτόχρονα όλα τα νεότερα ευρήματα από διάφορα επιστημονικά πεδία (χημεία ατμόσφαιρας, επιδημιολογία, γεωπονία, οικονομική του περιβάλλοντος κλπ.) [4,5,6]. Ειδικότερα, στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού προγράμματος CASES υπολογίστηκε το κοινωνικό κόστος όλων των τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής σε όλες τις χώρες της ΕΕ-27 και η εξέλιξη του μέχρι το 2030, λαμβάνοντας υπόψη όλες αυτές τις μεθοδολογικές βελτιώσεις. Το ιδιωτικό κόστος εκφράζεται ως μέσο ετησιοποιημένο κόστος και οι βασικές του συνιστώσες περιλαμβάνουν το κόστος καυσίμου, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης και το κόστος επένδυσης. Αντίστοιχα, το εξωτερικό κόστος αναλύεται στο κόστος της κλιματικής μεταβολής, στο κόστος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης το οποίο αναλύεται περαιτέρω σε επιμέρους συνιστώσες (κόστος επιπτώσεων στην υγεία, στην αγροτική παραγωγή, στα οικοσυστήματα), ενώ παράλληλα λαμβάνεται υπόψη ολόκληρος ο κύκλος ζωής των εισροών σε κάθε σύστημα ηλεκτροπαραγωγής. Με βάση το χρόνο ζωής κάθε τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής οι συνιστώσες ιδιωτικού και εξωτερικού κόστους ανάγονται σε αξίες 2005 με επιτόκιο προεξόφλησης 5%. Σημειώνεται, ότι σύμφωνα με τις αποφάσεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, το εξωτερικό κόστος της κλιματικής μεταβολής μετά το 2013 και μέχρι το 2020 σταδιακά ενσωματώνεται στο ιδιωτικό κόστος, ενώ η μοναδιαία τιμή ExternE των 19 €/t CO₂, θεωρείται ότι αποτελεί μία ικανοποιητική εκτίμηση για το μέσο επίπεδο τιμών των δικαιωμάτων εκπομπής CO₂ στο παγκόσμιο σύστημα εμπορίας εκπομπών. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι υπολογισθείσες τιμές ιδιωτικού, εξωτερικού και κοινωνικού κόστους για τις βασικές τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής για την Ελλάδα και την Κύπρο. Παρατηρείται ότι οι τεχνολογίες αξιοποίησης των ΑΠΕ και ιδιαίτερα τα αιολικά συστήματα αν και το ιδιωτικό τους κόστος παραμένει ακόμη υψηλότερο από εκείνο των περισσότερων συμβατικών μονάδων, εμφανίζονται ανταγωνιστικά σε όρους ιδιωτικού κόστους.

Πίνακας 1: Ιδιωτικό, εξωτερικό και κοινωνικό κόστος ηλεκτροπαραγωγής (€/MWh) [6]						
Τεχνολογία	Ιδιωτικό κόστος	Εξωτερικό κόστος CO ₂	Λοιπό εξωτερικό κόστος		Κοινωνικό κόστος	
			Ελλάδα	Κύπρος	Ελλάδα	Κύπρος
Λιγνίτης	21.8	17.2	7.2	-	46.2	-
Λιθάνθρακας	32.2	15.8	9.4	-	57.4	-
Πετρέλαιο	71.9	4.4	15.9	22.8	92.2	99.1
Φυσικό Αέριο	45.8	8.3	3.0	4.3	57.1	58.4
Υδροηλεκτρικά	81.2	0.1	0.5	0.5	81.8	81.8
Αιολικά	44.8	0.1	0.6	0.6	45.6	45.6
Φωτοβολταϊκά	214.6	1.4	6.7	6.7	222.7	222.7
CHP Φυσικό αέριο	43.2	8.3	3.0	4.4	54.5	55.9
CHP Βιομάζα	15.8	1.3	6.9	8.3	24.0	25.4

2.2. Ανάλυση Κόστους-Οφέλους

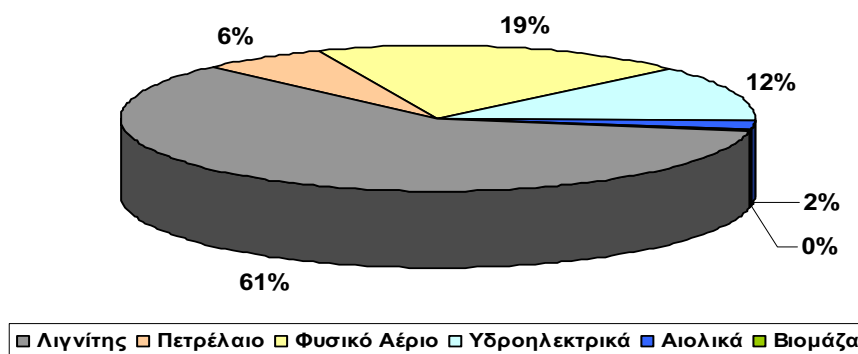
Η ανάλυση Κόστους-Οφέλους χρησιμοποιείται ευρύτατα για την αξιολόγηση έργων και πολιτικών που δημιουργούν εξωτερικές οικονομίες επηρεάζοντας θετικά ή αρνητικά την ευημερία ευρύτερων κοινωνικών ομάδων, καθώς και σε περιπτώσεις που άλλες στρεβλώσεις της αγοράς εμποδίζουν την ακριβή αποτύπωση της χρηματικής αξίας των χρησιμοποιούμενων πόρων και των παραγόμενων αγαθών ή υπηρεσιών. Ειδικότερα, η ανάλυση Κόστους-Οφέλους αποτελεί σήμερα ένα απαραίτητο εργαλείο αξιολόγησης περιβαλλοντικών έργων και πολιτικών με στόχο να διασφαλισθεί η μεγαλύτερη δυνατή αποτελεσματικότητα των σχετικών δράσεων [7,8]. Η ανάλυση Κόστους-Οφέλους αποσκοπεί στην άθροιση όλων των παραμέτρων κόστους και οφέλους που απορρέουν από μία δράση, όπως αυτές γίνονται αντιληπτές από το σύνολο της κοινωνίας, ανεξάρτητα από το ποιος επωμίζεται το κόστος ή ποιος επωφελείται από το όφελος. Κατ' αντιστοιχία με μία χρηματοοικονομική ανάλυση, ο χρονικός ορίζοντας μίας ανάλυσης Κόστους-Οφέλους επεκτείνεται ανάλογα με το χρόνο ζωής του έργου ή το χρονικό διάστημα στο οποίο οι επιπτώσεις της πολιτικής θα είναι αισθητές και υπολογίσιμες. Επομένως, προκύπτει η αναγκαιότητα χρήσης ενός 'κοινωνικού' επιτοκίου προεξόφλησης μελλοντικών χρηματικών ροών στο παρόν τέτοιο που να διασφαλίζει ότι οι σημερινές προτιμήσεις της κοινωνίας δεν υποθηκεύουν τις επιδιώξεις και την ευημερία των μελλοντικών γενεών [9].

Το γενικό κριτήριο αξιολόγησης σε μία ανάλυση Κόστους-Οφέλους είναι αν η Καθαρή Παρούσα Αξία του έργου ή της πολιτικής είναι θετική, που πληροφορεί ταυτόχρονα για το ύψος του καθαρού κοινωνικού οφέλους από όλη τη διάρκεια ζωής της επένδυσης. Ένα άλλο κριτήριο που εφαρμόζεται ευρύτατα είναι αν ο λόγος της παρούσας αξίας οφέλους και κόστους (B/C) είναι μεγαλύτερος της μονάδας, δείκτης που πληροφορεί για την ποσοτική σχέση μεταξύ συνολικού οφέλους και συνολικού κόστους της εξεταζόμενης δράσης.

3. ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΛΑΔΑΣ ΚΑΙ ΚΥΠΡΟΥ

3.1. Η σημερινή δομή

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα και την Κύπρο αυξάνεται με μέσο ετήσιο ρυθμό 3.6% και 5.5%, αντίστοιχα, δηλαδή με ταχύτητα υπερδιπλάσια και υπερτριπλάσια του μέσου όρου της ΕΕ-27. Η ποσοτική αυτή μεγέθυνση δεν συνοδεύεται όμως από μία ποιοτική διαφοροποίηση. Στην Ελλάδα, η μόνη σημαντική μεταβολή που παρατηρείται είναι η ταχεία διείσδυση του φυσικού αερίου μετά το 1998, με συνέπεια το 2006 να αποτελεί το 20% περίπου της συνολικής εγκατεστημένης δυναμικότητας, αλλά και της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίθετα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2, η συμμετοχή των ΑΠΕ παραμένει ακόμη σε απογοητευτικά χαμηλά επίπεδα.



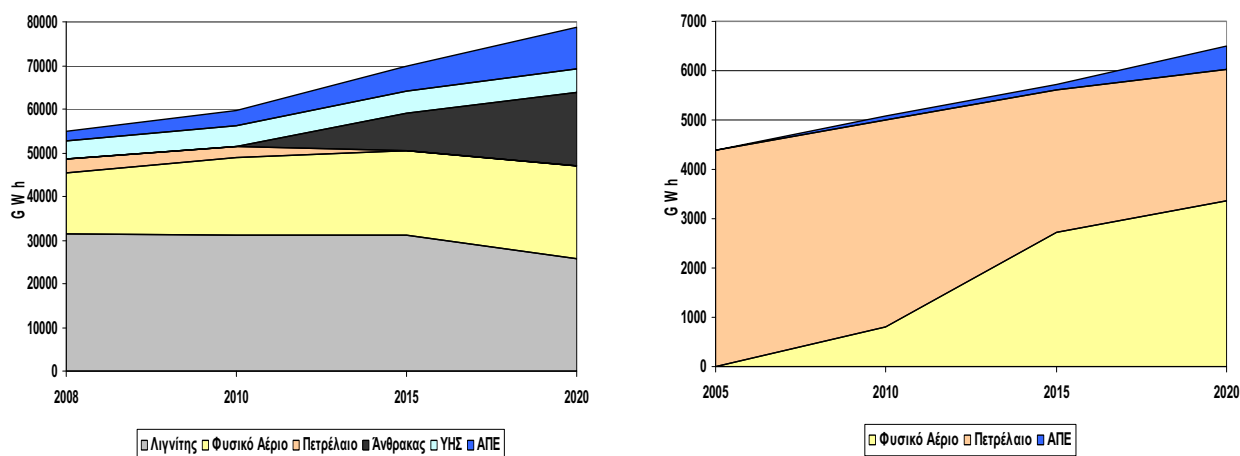
Εικόνα 2: Συμμετοχή ενεργειακών μορφών στο ελληνικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής (2006)

Στην Κύπρο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εξακολουθεί και στηρίζεται αποκλειστικά σε πετρελαϊκούς σταθμούς. Το 2006 η συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα ανερχόταν σε 988 MW και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε 4363 GWh.

3.2. Σενάρια εξέλιξης

Αν και οι ρυθμοί αυτοί αναμένεται να επιβραδυνθούν στο επόμενο διάστημα λόγω του ήδη υψηλού επιπέδου ανάπτυξης των δύο χωρών αλλά και των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας που επιβάλλεται να προωθηθούν σύμφωνα και με το σχετικό στόχο της ΕΕ, είναι φανερό ότι η κάλυψη των μελλοντικών αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια απαιτεί την υλοποίηση σημαντικών επενδύσεων.

Τα Σενάρια Αναφοράς (ΣΑ) που αποτελούν τη βάση της παρούσας ανάλυσης έχουν διατυπωθεί για μεν την Ελλάδα από το Υπουργείο Ανάπτυξης [9] για δε την Κύπρο από την ΕΕ, DG TREN [10]. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3, προβλέπεται μία σημαντική διαφοροποίηση του ελληνικού ηλεκτρικού συστήματος με περαιτέρω ανάπτυξη του φυσικού αερίου που μέχρι το 2020 θα φθάσει στο 27%, εισαγωγή λιθάνθρακα που θα φθάσει στο 21% το 2020, ενώ παράλληλα θα μηδενισθεί η συμμετοχή του πετρελαίου και θα περιορισθεί κατά 23% η ποσοστιαία συμμετοχή των λιγνιτικών μονάδων. Η συμμετοχή των υδροηλεκτρικών μονάδων και των λοιπών ΑΠΕ αν και αυξάνεται από 12% σε 19%, υπολείπεται σημαντικά από το ποσοστό του 29% στην ηλεκτροπαραγωγή, που σύμφωνα με σχετική μελέτη [11] είναι αναγκαίο για την επίτευξη του ευρωπαϊκού στόχου 18% για τη συμμετοχή των ΑΠΕ στο σύνολο της ενεργειακής κατανάλωσης.



Εικόνα 3: Σενάρια Αναφοράς για το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής Ελλάδας [9], Κύπρου [10]

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται επίσης και το ΣΑ για την Κύπρο [10] σύμφωνα με το οποίο προβλέπεται μία σημαντική διεύρυνση φυσικού αερίου που μέχρι το 2020 θα αντιπροσωπεύει πάνω από το 50% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίστοιχα μειώνεται το μερίδιο των πετρελαϊκών μονάδων, ενώ οι ΑΠΕ φθάνουν στο 7.3%, σημαντικά χαμηλότερα από το αναγκαίο 22% που σύμφωνα με σχετική μελέτη [11] είναι αναγκαίο για την επίτευξη του ευρωπαϊκού στόχου του 13% για τη συμμετοχή των ΑΠΕ στο σύνολο της ενεργειακής κατανάλωσης.

Τα εναλλακτικά σενάρια που εξετάστηκαν για την αξιολόγηση της κοινωνικής σκοπιμότητας ανάπτυξης των ΑΠΕ, υποθέτουν μερίδιο συμμετοχής 29% στην Ελλάδα και 22% στην

Κύπρο, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η προσαρμογή με τους αντίστοιχους ευρωπαϊκούς στόχους. Η επιπρόσθετη παραγωγή από ΑΠΕ ανέρχεται σε 6750 GWh στην Ελλάδα και σε 960 GWh στην Κύπρο και θεωρείται ότι υποκαθιστά:

A) μονάδες φυσικού αερίου και στις δύο χώρες

B) μονάδες λιθάνθρακα στην Ελλάδα και πετρελαϊκές μονάδες στην Κύπρο

Και στα δύο σενάρια εξετάζονται δύο εναλλακτικές περιπτώσεις ως προς το μίγμα των ΑΠΕ:

- 1) η πρόσθετη παραγωγή από ΑΠΕ προέρχεται αποκλειστικά από αιολικά συστήματα,
- 2) η πρόσθετη παραγωγή από ΑΠΕ προέρχεται κατά 90% από αιολικά συστήματα και κατά 10% από φωτοβολταϊκά συστήματα.

Το μίγμα της ηλεκτροπαραγωγής στο ΣΑ και στα 4 εναλλακτικά σενάρια ανάπτυξης ΑΠΕ, όπως υπολογίζεται με βάση τους συντελεστές φόρτισης κάθε κατηγορίας μονάδων, παρουσιάζεται στους Πίνακες 2 και 3 για την Ελλάδα και την Κύπρο, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι στο ΣΑ, γίνεται η απλουστευτική παραδοχή ότι το μίγμα ΑΠΕ αποτελείται μόνο από αιολικά συστήματα, παραδοχή που ελαχιστοποιεί το κόστος αυτού του σεναρίου.

Πίνακας 2: Εναλλακτικά σενάρια για το μίγμα ηλεκτροπαραγωγής Ελλάδα, 2020 (GWh)						
Σενάριο	Λιγνίτης	Φυσικό αέριο	Λιθάνθρακας	Υδρο-ηλεκτρικά	Αιολικά	PVs
Αναφοράς	25715	21311	16872	5212	9584	
A1	25715	14562	16872	5212	16333	
A2	25715	14562	16872	5212	15658	675
B1	25715	21311	10123	5212	16333	
B2	25715	21311	10123	5212	15658	675

Πίνακας 3: Εναλλακτικά σενάρια για το μίγμα ηλεκτροπαραγωγής Κύπρος, 2020 (GWh)				
Σενάριο	Πετρέλαιο	Φυσικό αέριο	Αιολικά	PVs
Αναφοράς	2682	3356	474	
A1	2682	2398	1433	
A2	2682	2398	1337	96
B1	1723	3356	1433	
B2	1723	3356	1337	96

4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

Στους Πίνακες 4 και 5 παρουσιάζεται το ετήσιο κοινωνικό κόστος των σεναρίων ηλεκτροπαραγωγής, το οποίο υπολογίσθηκε με βάση τη συνολική διάρθρωση του μίγματος το 2020 και τις συνιστώσες του λειτουργικού ιδιωτικού και εξωτερικού κόστους κάθε τεχνολογίας. Παρατηρείται ότι, σε σύγκριση με το ΣΑ, η ανάπτυξη των ΑΠΕ οδηγεί σε σημαντική μείωση του ετήσιου κοινωνικού κόστους, που στην Ελλάδα κυμαίνεται μεταξύ 170-220 εκ. €/έτος και στην Κύπρο μεταξύ 30-70 εκ.€/έτος. Το όφελος αυτό προκύπτει κυρίως από τη μείωση του κόστους καυσίμου και είναι μεγαλύτερο αν οι ΑΠΕ υποκαθιστούν πετρέλαιο, μικρότερο στην περίπτωση φυσικού αερίου και ακόμη μικρότερο στην περίπτωση

του λιθάνθρακα. Σημαντική είναι επίσης η μείωση του εξωτερικού κόστους, κυρίως στην περίπτωση του λιθάνθρακα και ακολούθως του πετρελαίου και του φυσικού αερίου.

Πίνακας 4: Κοινωνικό κόστος εναλλακτικών σεναρίων στην Ελλάδα, 2020 (εκ. €/ έτος)					
Σενάριο	Κόστος Καυσίμου	Κόστος Λειτουργίας	Εξωτερικό Κόστος CO ₂	Λοιπό Εξωτ. Κόστος	Συνολικό Κοινωνικό Κόστος
Αναφοράς	1243	454	887	416	3000
A1	988	459	832	400	2678
A2	988	475	833	404	2699
B1	1137	432	781	357	2706
B2	1137	448	782	361	2727

Πίνακας 5: Κοινωνικό κόστος εναλλακτικών σεναρίων στην Κύπρο, 2020 (εκ. €/ έτος)					
Σενάριο	Κόστος Καυσίμου	Κόστος Λειτουργίας	Εξωτερικό Κόστος CO ₂	Λοιπό Εξωτ. Κόστος	Συνολικό Κοινωνικό Κόστος
Αναφοράς	277	40	40	76	432
A1	241	40	32	72	385
A2	241	43	32	73	388
B1	223	35	36	55	349
B2	223	38	36	55	352

Το ετήσιο αυτό όφελος αντισταθμίζει σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό το αυξημένο κόστος επένδυσης που συνεπάγεται η υλοποίηση των μονάδων αξιοποίησης των ΑΠΕ, έναντι των ισοδύναμων συμβατικών σταθμών του ΣΑ. Λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική κλιμάκωση των επενδύσεων κάθε σεναρίου, το χρόνο ζωής κάθε κατηγορίας μονάδων και προεξοφλώντας στο παρόν, τόσο τη διαφορά του κόστους επένδυσης C, όσο και τη διαφορά του ετήσιου κοινωνικού οφέλους B μεταξύ του ΣΑ και κάθε εναλλακτικού σεναρίου. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6: Συγκριτική αξιολόγηση σεναρίων ανάπτυξης ΑΠΕ με το Σενάριο Αναφοράς (εκ. €/ έτος)						
Σενάριο	Ελλάδα			Κύπρος		
	Διαφορά Κόστους Επένδυσης	Διαφορά Κοινωνικού Κόστους	B/C	Διαφορά Κόστους Επένδυσης	Διαφορά Κοινωνικού Κόστους	B/C
A1	-1545	+4375	2.83	-248	+627	2.52
A2	-2711	+4164	1.54	-410	+599	1.46
B1	-1268	+3911	3.09	-208	+863	4.15
B2	-2434	+3701	1.52	-370	+834	2.26

Όπως είναι αναμενόμενο η ένταξη φωτοβολταϊκών συστημάτων, αυξάνει σημαντικά το κόστος επένδυσης, με συνέπεια τη μείωση του δείκτη οφέλους-κόστους των σεναρίων A2 και B2. Όλα όμως τα σενάρια ανάπτυξης των ΑΠΕ και στις δύο χώρες εμφανίζονται πιο ελκυστικά από το ΣΑ, καθώς το όφελος Β που συνεπάγονται είναι κατ' ελάχιστον 50% μεγαλύτερο από το αντίστοιχο κόστος, ενώ μπορεί να φθάσει να είναι και τριπλάσιο.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάπτυξη των ΑΠΕ στην Ελλάδα και την Κύπρο δεν είναι μόνο επιβεβλημένη από τους εθνικούς στόχους που απορρέουν από την κοινή ευρωπαϊκή ενεργειακή πολιτική. Τα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης αποδεικνύουν ότι αν συνυπολογισθεί σε χρηματικούς όρους το περιβαλλοντικό όφελος που συνεπάγεται η ενίσχυση των ΑΠΕ, η προσαρμογή της Ελλάδας και της Κύπρου στους στόχους αυτούς αποτελεί μία ιδιαίτερα ελκυστική προοπτική. Πολύ περισσότερο, που στην εξεταζόμενη περίπτωση της ηλεκτροπαραγωγής το όφελος από τη μείωση των εκπομπών CO₂, μετά το 2013 θα ενσωματωθεί σταδιακά στο μηχανισμό της αγοράς και θα μεταφράζεται άμεσα και σε χρηματικό όφελος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. European Commission, 'COM(2007) - An Energy Policy for Europe', Brussels, 2007.
2. European Commission, 'ExternE, Externalities of Energy, ExternE Report Vol. 2, Methodology', EUR 16521, Brussels, 1995.
3. European Commission, 'ExternE: externalities of energy – Vol. 10: National Implementation', EUR 18528, Brussels, 1999.
4. European Commission, 'ExternE, Externalities of Energy, Vol. 7 Methodology 1998 update', EUR 19083, Brussels, 1999.
5. European Commission, 'ExternE: externalities of energy – methodology 2005 update', EUR 21951, Brussels, 2005.
6. European Commission, 'CASES - Cost Assessment of Sustainable Energy Systems. Report 'Development of a set of full cost estimates of the use of different energy sources and its comparative assessment in EU countries', 2008. Available at www.feem-project.net/cases
7. Pearce, D., Atkinson, G., Murato, S., 'Cost-Benefit Analysis and the Environment: Recent Developments', OECD Publication, Paris, 2006.
8. Horowitz, J. K., 'Environmental Policy under a non-market discount rate', Ecological Economics, 16, 73-78, 1996.
9. Υπουργείο Ανάπτυξης, 'Ανάλυση του ελληνικού ενεργειακού συστήματος για την περίοδο 2008-2020 εν όψει των νέων στόχων εθνικής και ευρωπαϊκής πολιτικής για τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τον ενεργειακό τομέα, την διείσδυση των ΑΠΕ και την εξοικονόμηση ενέργειας', ΕΠΑΝ, Αθήνα, 2008.
10. European Commission, 'European energy and transport trends to 2030 - update 2007', Directorate-General for Energy and Transport, 2008.
11. European Commission, 'PROGRESS promotion and growth of renewable energy sources and systems - Final report', 2008.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥΣ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΑ ΝΗΣΙΑ ΤΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ

Γ. Βικάτος^{}, Ι. Στεφανάκης^{*} και Ι. Κ. Καλδέλλης^{**}*

^{*}ΔΕΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ Α.Ε. - Μεσογείων 223, Αθήνα 115 25

^{**}Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος, ΤΕΙ Πειραιώς
e-mail: jkald@teipir.gr, www.sealab.gr, Τ.Θ. 41046, Αθήνα 122 01

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το Αιγαίο πέλαγος απαρτίζεται από πολυάριθμα νησιά πέρα από τις ανατολικές ακτές της ηπειρωτικής Ελλάδας, με εκτάσεις που κυμαίνονται από μερικά τετραγωνικά μέτρα έως αρκετά τετραγωνικά χιλιόμετρα. Τα περισσότερα από αυτά τα νησιά είναι απομακρυσμένα με ολιγάριθμους μόνιμους κατοίκους. Τα παραπάνω στοιχεία, σε συνδυασμό με τα μεγάλα βάθη και τη σύνθετη τοπογραφία του βυθού, έχουν καταστήσει τα περισσότερα σχέδια ηλεκτρικής διασύνδεσης τεχνικά και οικονομικά ανέφικτα. Συνεπώς, μόνο ένας πολύ μικρός αριθμός νησιών έχουν διασυνδεθεί μέσω υποθαλάσσιων καλωδίων με το δίκτυο της ηπειρωτικής χώρας. Αντίθετα, η πλειονότητα των νησιών τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια η οποία παράγεται από αυτόνομους σταθμούς παραγωγής (ΑΣΠ) που χρησιμοποιούν "diesel" και βαρύ πετρέλαιο, με πολύ μικρή συμβολή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) - κυρίως αιολική και ηλιακή ενέργεια. Η συνεχώς αυξανόμενη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με τις κλιμακούμενες τιμές του πετρελαίου έχει οδηγήσει σε εξαιρετικά υψηλές δαπάνες για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να εξεταστεί η χρονική εξέλιξη του κόστους παραγωγής από αυτόνομους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως κόστος καυσίμου, μισθοδοσία, αποσβέσεις και άλλα οικονομικά στοιχεία. Στη συνέχεια, τα κόστη παραγωγής από τους ΑΣΠ συγκρίνονται με τα εκάστοτε τιμολόγια των οικιακών καταναλωτών καθώς και με τα τιμολόγια απορρόφησης ηλεκτρικής ενέργειας από ανεξάρτητους παραγωγούς ΑΠΕ. Συμπερασματικά, αποδεικνύεται ότι καθώς οι τιμές του πετρελαίου αυξάνονται ταχύτατα, το κόστος ηλεκτρικής παραγωγής από τους αυτόνομους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα συνεχίσει να κλιμακώνεται στο άμεσο μέλλον. Έτσι θα καταστούν οικονομικά βιώσιμες εναλλακτικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως οι ΑΠΕ, οι οποίες συμβάλλουν ταυτόχρονα στη μείωση των περιβαλλοντικών και μακροοικονομικών επιδράσεων από το εισαγόμενο πετρέλαιο.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το Αιγαίο πέλαγος απαρτίζεται από πληθώρα διάσπαρτων νησιών με πληθυσμούς που ποικίλλουν από νησί σε νησί, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις από χειμώνα σε καλοκαίρι λόγω της άφιξης τουριστών. Αυτά τα δεδομένα συνθέτουν ένα ιδιόμορφο σκηνικό ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, που καλούνται να καλύψουν οι πεπαλαιωμένοι Αυτόνομοι Σταθμοί Παραγωγής (ΑΣΠ) θερμικής βάσης εγκατεστημένοι στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ), στα οποία περιλαμβάνεται η Κρήτη, η Ρόδος και τα λοιπά ΜΔΝ.

Το κόστος ηλεκτροδότησης όλων των ΜΔΝ για το 2007 ανήλθε [1] σε περίπου 800εκ.€ επιφέροντας μια οικονομική επιβάρυνση της τάξης των 443εκ.€, το οποίο μετακυλίεται τελικά στους καταναλωτές. Η ηλεκτρική διασύνδεση των νησιών με το ηπειρωτικό σύστημα

θα μπορούσε να εξαλείψει -υπό προϋποθέσεις- μέρος αυτής της επιβάρυνσης αλλά προχωράει με αργούς ρυθμούς. Η πρόσφατη Μελέτη Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς (ΜΑΣΜ) του ΔΕΣΜΗΕ [2] για την περίοδο 2008-2012 περιλαμβάνει τη διασύνδεση των Κυκλάδων, ωστόσο οι περισσότερες διασυνδέσεις παραπέμπονται για την επόμενη ΜΑΣΜ, της περιόδου 2012-2016. Είναι πλέον προφανές ότι οι ανάγκες ηλεκτροδότησης των ΜΔΝ του Αιγαίου θα συνεχίσουν να καλύπτονται κατά βάση από θερμικούς σταθμούς παραγωγής τουλάχιστον μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 2020.

Ο κύριος παράγοντας του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των ΑΣΠ είναι τα εισαγόμενα καύσιμα, κυρίως βαρύ πετρέλαιο (μαζούτ) και "diesel". Οι τιμές των εν λόγω καυσίμων διαμορφώνονται με βάση τις διεθνείς τιμές του πετρελαίου Brent σε €/bbl, που κατά μέσο όρο το πρώτο εξάμηνο του 2008 κατέγραψαν άνοδο περίπου 45% σε σχέση με το 2007. Η άνοδος αυτή εκτιμάται ότι θα επιφέρει αύξηση του Μέσου Μεταβλητού Κόστους παραγωγής (ΜΜΚ) για τα ΜΔΝ της τάξης των 20%, που μεταφράζεται σε τιμή ΜΜΚ ηλεκτροπαραγωγής ίσο με 138€/MWh [3].

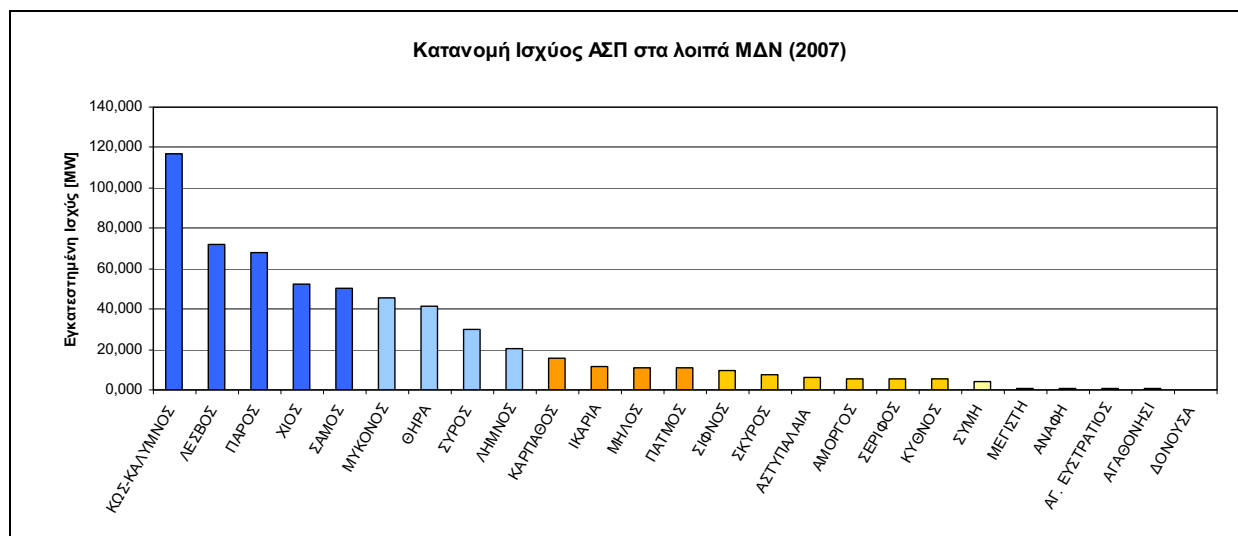
Είναι προφανές ότι η διατήρηση των διεθνών τιμών του αργού πετρελαίου σε πολύ υψηλά επίπεδα για παρατεταμένο χρονικό διάστημα αποτελεί μείζον πρόβλημα για το σύνολο της εγχώριας οικονομίας και ιδιαίτερα για τον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Σε μια προσπάθεια ανάλυσης του εν λόγω προβλήματος επιχειρείται μια ολοκληρωμένη μελέτη του κόστους ηλεκτροπαραγωγής των ΑΣΠ του Αιγαίου, η οποία εξετάζει τις διαθέσιμες επίσημες πληροφορίες της τελευταίας εικοσιπενταετίας [1]. Επιπλέον, επιχειρείται ο επιμερισμός του διαχρονικού κόστους ηλεκτροπαραγωγής στους κυριότερους συντελεστές του, δηλαδή κόστος καυσίμου, μισθοδοσία, έξοδα διοίκησης, κόστος συντήρησης κ.τ.λ..

2. Η ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια στα λοιπά ΜΔΝ (πλην Κρήτης και Ρόδου) καλύπτεται [4] από 29 ΑΣΠ απαρτιζόμενους από Θερμικές Μονάδες (ΘΜ) βάσης, ήτοι εμβολοφόρους κινητήρες και αεριοστρόβιλους. Η συνολική εγκατεστημένη ονομαστική ισχύς των ΑΣΠ ανέρχεται σε περίπου 640MW ενώ η ετήσια παραγομένη ηλεκτρική ενέργεια το 2007 ανήλθε σε περίπου 1730GWh.

Η εγκατεστημένη ισχύς των ΘΜ παραγωγής κυμαίνεται από περίπου 100kW, για τα πολύ μικρά νησιά, μέχρι και 120MW για το σύμπλεγμα Κως-Κάρπαθος (Σχήμα 1). Ένα μεγάλο ποσοστό των μονάδων αυτών βρίσκεται σε λειτουργία για 20 και πλέον χρόνια με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται συχνά σοβαρές βλάβες που οδηγούν τις συγκεκριμένες μηχανές σε μεγάλες περιόδους εκτός λειτουργίας. Παράλληλα, λόγω της παλαιότητας του διαθέσιμου εξοπλισμού αυτός κατά κανόνα λειτουργεί σε μειωμένη ισχύ κατά τουλάχιστον 15% σε σχέση με την ονομαστική του.

Επιπρόσθετα, η πραγματική ισχύς των ΑΣΠ για τα περισσότερα από τα ΜΔΝ του Αιγαίου είναι είτε οριακά επαρκής ή αδυνατεί να καλύψει με ασφάλεια την αναμενόμενη αύξηση της ζήτησης [4]. Το σοβαρότερο πρόβλημα αντιμετωπίζουν τα νησιά με έντονη τουριστική κίνηση, όπως η Μύκονος, η Σαντορίνη, η Μήλος, η Κύθνος και η Σέριφος. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, τα τελευταία χρόνια, έχει επιστρατευτεί η προσωρινή λύση της ενοικίασης Ηλεκτροπαραγωγών Ζευγών (H/Z) για την κάλυψη της ζήτησης κατά τη θερινή περίοδο. Για παράδειγμα, το καλοκαίρι του 2006 εγκαταστάθηκαν συνολικά 13 προσωρινές μονάδες παραγωγής συνολικής ισχύος 85MW.



Σχήμα 1: Κατάταξη των θερμικών μονάδων του Αιγαίου με βάση την ονομαστική τους ισχύ

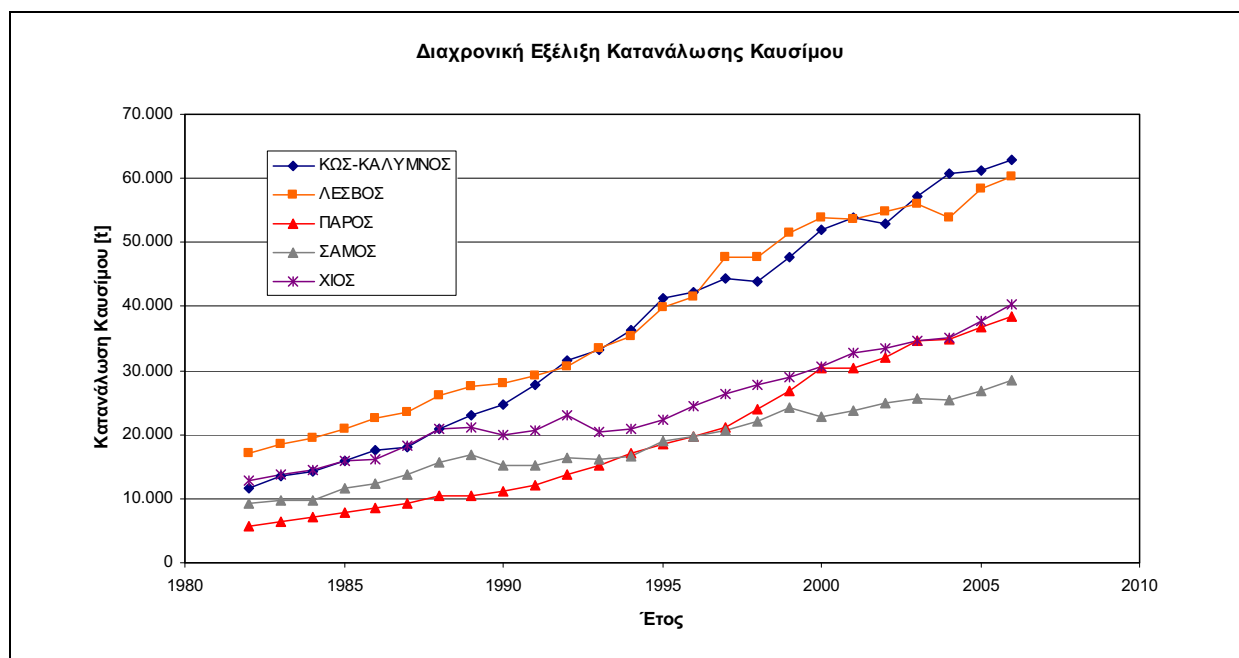
Για την καλύτερη ανάλυση των δεδομένων των ΑΣΠ του Αιγαίου, κρίνεται σκόπιμη η κατάταξη τους σε πέντε κατηγορίες με βάση την ονομαστική τους ισχύ, ως φαίνεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Κατάταξη των ΑΣΠ με βάση την ονομαστική τους ισχύ		
Κατηγορία	Ισχύς ΑΣΠ [MW]	Νησιά
Πολύ μικρά	<1	Αγαθονήσι, Αγ. Ευστράτιος, Ανάφη, Δονούσα, Μεγίστη
Μικρά	>1 και <9	Αμοργός, Αστυπάλαια, Κύθνος, Σαμοθράκη, Σέριφος, Σίφνος, Σύμη, Σκύρος
Μικρομεσαία	>9 και <20	Ικαρία, Κάρπαθος, Μήλος, Πάτμος
Μεσαία	>20 και <50	Λήμνος, Μύκονος, Σαντορίνη, Σύρος
Μεγάλα	>50	Κώς-Κάλυμνος, Λέσβος, Πάρος, Σάμος, Χίος

3. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

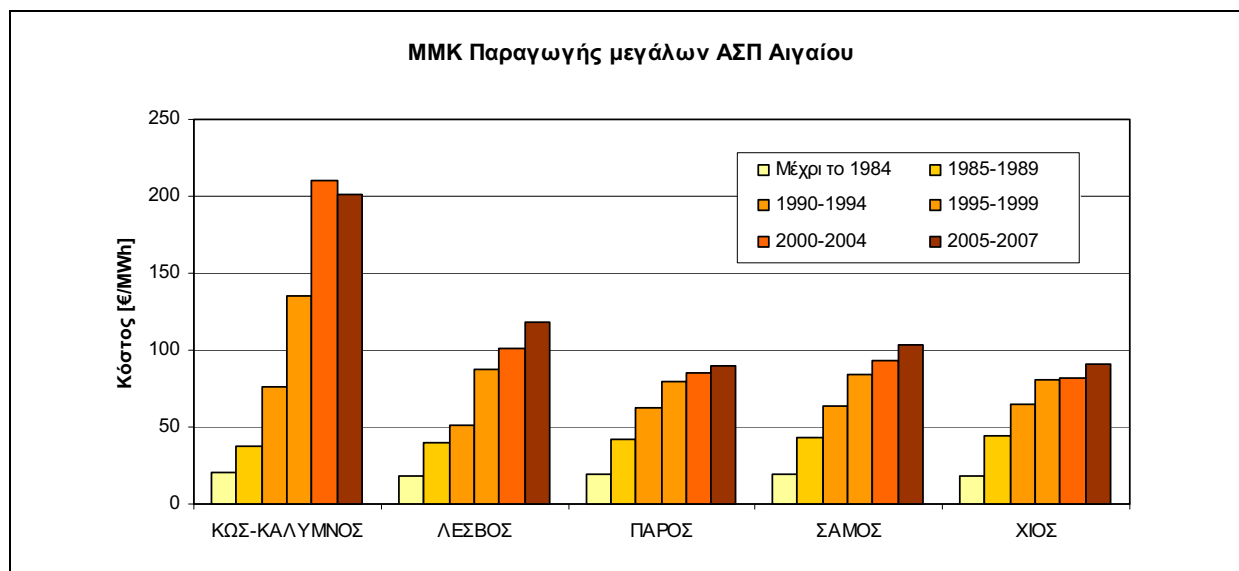
Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία των ΑΣΠ στα ΜΔΝ είναι το βαρύ πετρέλαιο (μαζούτ) και το "diesel". Η ετήσια κατανάλωση καυσίμων, στα ΜΔΝ πλην της Κρήτης, ανέρχεται σε περίπου 100,000t diesel και 400,000t μαζούτ. Στο Σχήμα 2 απεικονίζεται η διαχρονική μεταβολή στην ετήσια κατανάλωση καυσίμου των μεγάλων ΑΣΠ του Αιγαίου, ήτοι των αυτόνομων συστημάτων των νήσων Κώ-Καλύμνου, Λέσβου, Πάρου, Σάμου και Χίου. Να σημειωθεί ότι η μεταφορά των υγρών καυσίμων στα νησιά του Αιγαίου αποτελεί επίσης ένα σημαντικό πρόβλημα με σοβαρούς περιβαλλοντικούς κινδύνους. Επίσης, δεν εξασφαλίζεται η συνεχής τροφοδοσία των ΑΣΠ (ιδιαίτερα των μικρών) κατά την

χειμερινή περίοδο, ιδιαίτερα σε περιόδους παρατεταμένης κακοκαιρίας. Για το σκοπό αυτό διατίθενται σχετικοί αποθηκευτικοί χώροι μεγάλης χωρητικότητας.



Σχήμα 2: Ετήσια κατανάλωση καυσίμων (μαζούτ και diesel) μεγάλων ΑΣΠ Αιγαίου

Η μέση ειδική κατανάλωση καυσίμου (ετήσια κατανάλωση καυσίμου / ετήσια ηλεκτροπαραγωγή) των ΘΜ του Αιγαίου κυμαίνεται μεταξύ 200 g/kWh και 300 g/kWh, με μέση τιμή λίγο χαμηλότερη των 250 g/kWh. Οι ΑΣΠ των συστημάτων της Κω και της Χίου παρουσιάζουν τη χαμηλότερη ειδική κατανάλωση (περίπου 210 g/kWh), ενώ οι πολύ μικροί ΑΣΠ παρουσιάζουν ειδική κατανάλωση κοντά στα 300 g/kWh.

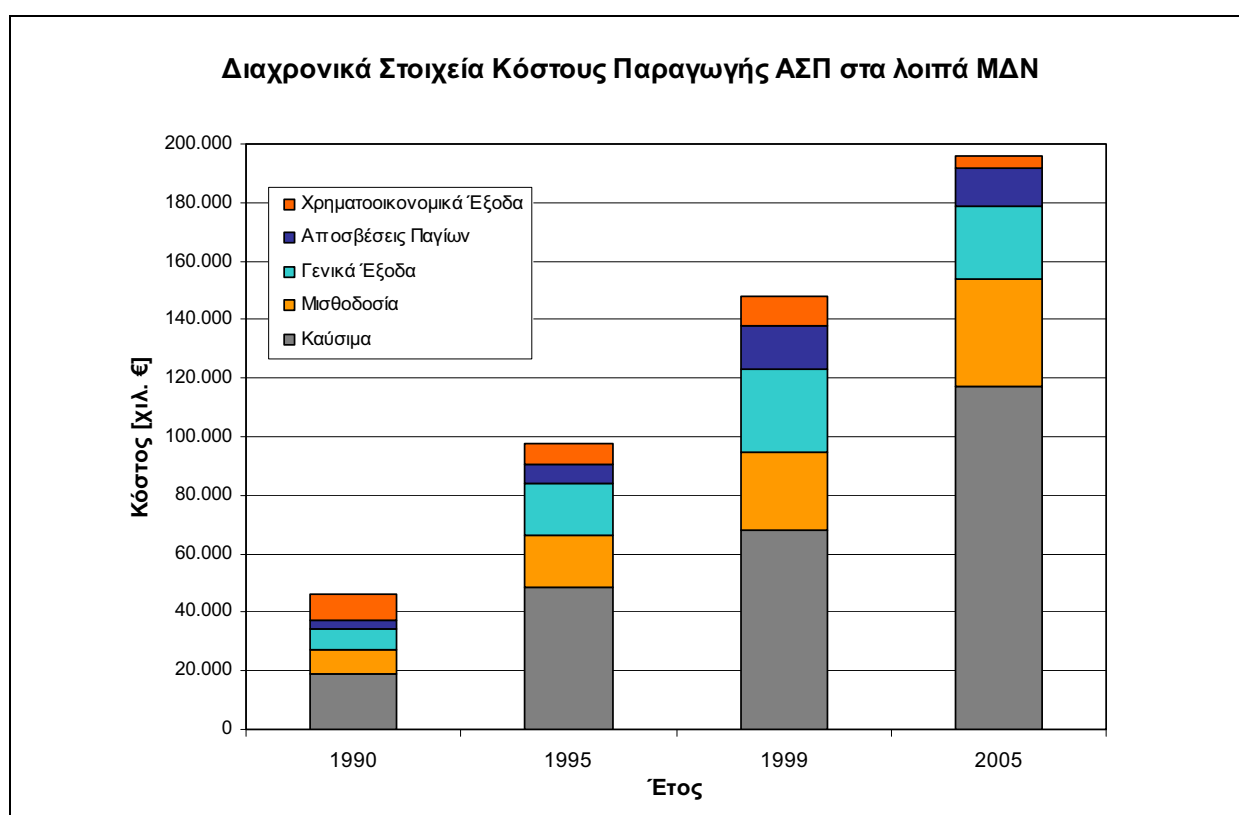


Σχήμα 3: Διαχρονική εξέλιξη ΜΜΚ παραγωγής μεγάλων ΑΣΠ Αιγαίου

Η υψηλή κατανάλωση καυσίμου σε συνδυασμό με την πλημμελή συντήρηση, την ξεπερασμένη τεχνολογία και το διαρκώς μεταβαλλόμενο φορτίο, εκτινάσσουν το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, το κόστος παραγωγής για τα

μεγάλα νησιά κυμαίνεται μεταξύ 90 και 200€/MWh, με τον ΑΣΠ της Πάρου να παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή ΜΜΚ παραγωγής περίπου 90€/MWh. Αντίστοιχες τιμές για τους μεσαίους και μικρούς ΑΣΠ κυμαίνονται μεταξύ 150 και 400€/MWh, ενώ για τους πολύ μικρούς ΑΣΠ η τιμή μπορεί να φτάσει και τα 1000€/MWh (ή ισοδύναμα 1€/kWh).

Εξετάζοντας τη συμβολή των διαφόρων συνιστωσών του κόστους παραγωγής τα τελευταία 15 έτη (Σχήμα 4), διαπιστώνεται ότι καθοριστική είναι η συμμετοχή του καυσίμου με ποσοστό συμμετοχής από 40% έως και 60%. Σταθερή επίσης είναι η συμβολή των εξόδων μισθοδοσίας (περίπου 18%), καθώς και των γενικών εξόδων διοίκησης (περίπου 16%). Θετική εξέλιξη αποτελεί ο σημαντικός περιορισμός των χρηματοοικονομικών εξόδων των νησιωτικών μονάδων. Αξίζει στο σημείο αυτό να τονισθεί ότι τα οικονομικά μεγέθη παρουσιάζονται σε τρέχουσες τιμές, ενώ και το περιορισμένο μέγεθος των νησιωτικών ΑΣΠ προκαλεί αρνητικές οικονομίες κλίμακας, οι οποίες μεταφράζονται σε αυξημένο λειτουργικό κόστος (μισθοδοσία, έξοδα διοίκησης, κ.λπ.).

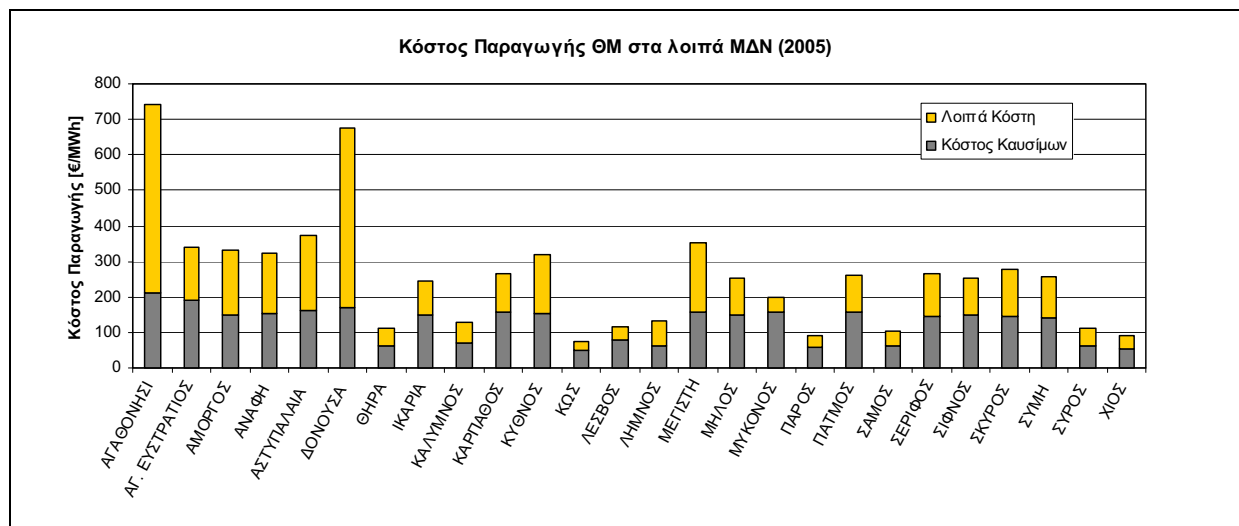


Σχήμα 4: Διαχρονική μεταβολή συνιστωσών κόστους ηλεκτροπαραγωγής

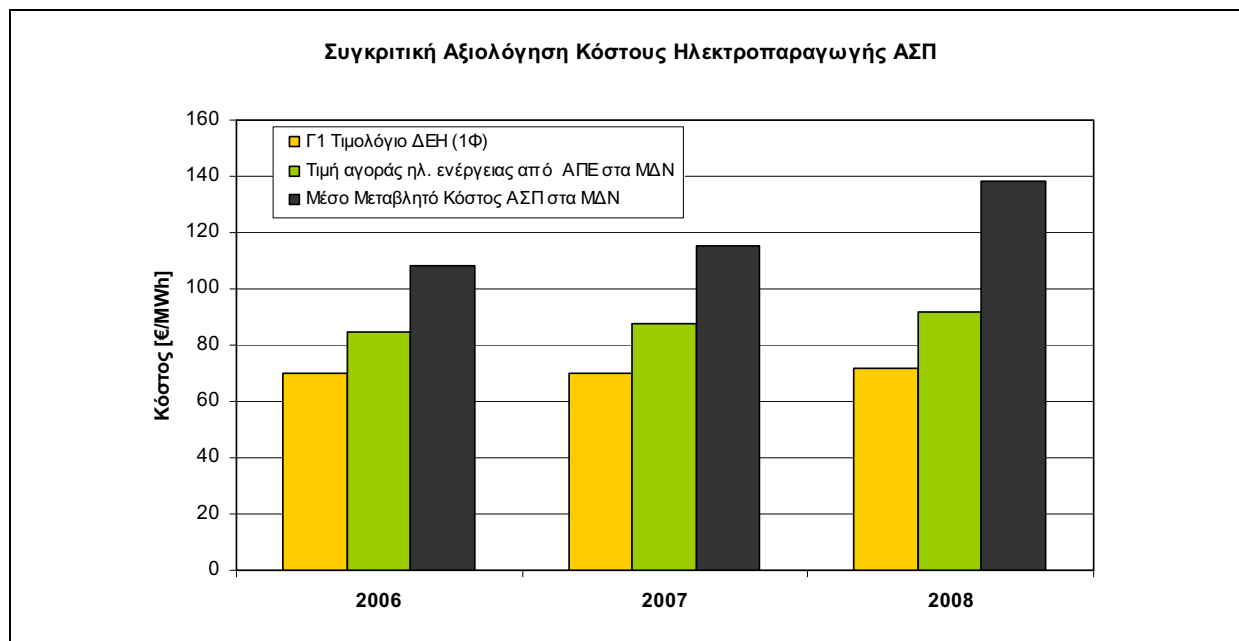
Βάσει των διαθέσιμων στοιχείων, οι ΑΣΠ των λοιπών ΜΔΝ παρουσιάζουν συνεχώς αυξανόμενο κόστος λειτουργίας, που για το 2005 ξεπέρασε τα 195,000,000€, δηλαδή υπερτετραπλασιάστηκε (τρέχουσες τιμές) σε σχέση με το 1990, Σχήμα 4. Καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του κόστους αυτού έχει το εισαγόμενο καύσιμο (diesel ή μαζούτ), καθώς και οι υπόλοιπες γενικές δαπάνες διοίκησης και μισθοδοσίας.

Από την ανάλυση πρόσφατων στοιχείων, που αφορούν τους νησιωτικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής των λοιπών ΜΔΝ, προκύπτει (Σχήμα 5) η καθοριστική συμμετοχή του κόστους του καυσίμου, που σε αρκετές περιπτώσεις ξεπερνά το 50% του συνολικού κόστους λειτουργίας. Το γεγονός αυτό επιφέρει σημαντικό αριθμό αρνητικών επιπτώσεων τόσο σε μακροοικονομική βάση [5] (εισαγόμενο καύσιμο, εκροή συναλλάγματος, ενεργειακή

εξάρτηση) όσο και σε περιβαλλοντικό επίπεδο [6,7] (εκπομπές αέριων ρύπων, θερμική επιβάρυνση). Επιπλέον, τίθεται ανά πάσα στιγμή σε αμφισβήτηση (κυρίως το χειμώνα-λόγω ακραίων καιρικών φαινομένων) η ενεργειακή αυτονομία και επάρκεια των νησιών, γεγονός που τελικά επιδεινώνει τη γενικότερη οικονομική τους πορεία. Βάσει των ανωτέρω είναι πλέον σαφές ότι η συμμετοχή του κόστους των υγρών καυσίμων θα συνεχίσει να καθορίζει το κόστος ηλεκτροπαραγωγής στα νησιά του Αιγαίου, εκτός εάν υλοποιηθούν σημαντικά ενεργειακά έργα βασισμένα στην αξιοποίηση των ΑΠΕ σε συνεργασία με κατάλληλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας [8-10].



Σχήμα 5: Συμμετοχή κόστους καυσίμων στην ηλεκτροπαραγωγή των ΑΣΠ στα λοιπά ΜΔΝ



Σχήμα 6: Διαχρονική σύγκριση τιμών ηλεκτρικής ενέργειας

Τέλος, συγκρίνοντας το MMK ηλεκτροπαραγωγής των ΑΣΠ για όλα τα ΜΔΝ (Σχήμα 6), το οποίο για το 2008 θα ανέλθει στα 138€/MWh [3], με την τιμή πώλησης ενέργειας για οικιακή χρήση (Τιμολόγιο Γ1 μονοφασικών παροχών ΔΕΗ), ήτοι 71.7€/MWh και με την αντίστοιχη τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τους Σταθμούς ΑΠΕ στα ΜΔΝ, που πρόσφατα ανέβηκε στα 91.74€/MWh [11], είναι προφανές ότι σε κάθε περίπτωση η χρήση των ΑΠΕ πλεονεκτεί ακόμα και από καθαρά οικονομικής σκοπιάς σε σχέση με τη χρήση υγρών

καυσίμων. Ειδικότερα, η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας σε συνεργασία με κατάλληλα συστήματα αντλησιο-ταμίευσης καθώς και η εγκατάσταση υβριδικών ενεργειακών σταθμών βασισμένων σε ΑΠΕ αποτελούν αξιόπιστες και πολλά υποσχόμενες ενεργειακές λύσεις.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την εκτεταμένη ανάλυση των οικονομικών αποτελεσμάτων λειτουργίας των νησιωτικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής σε χρονικό ορίζοντα 25-ετίας προκύπτει μια σαφής αυξητική τάση του κόστους ηλεκτροπαραγωγής στο σύνολο των 29 περίπου ΑΣΠ του Αιγαίου. Παράλληλα, σχεδόν το 50% του κόστους παραγωγής οφείλεται στην κατανάλωση εισαγόμενου πετρελαίου. Δεδομένης της επιχειρούμενης λειτουργίας της εγχώριας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας με καθαρά χρηματοοικονομικά κριτήρια, το αυξημένο MMK των ΑΣΠ περιορίζει αφενός την ενεργειακή επάρκεια των νησιών και αφετέρου επιβαρύνει συνολικά το κοινωνικό σύνολο, που καλείται να καλύψει τη σημαντική διαφορά κόστους παραγωγής και τιμής διάθεσης της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Αντίθετα, η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, κατά περίπτωση, σε συνδυασμό με κατάλληλου τύπου αποθηκευτικά συστήματα εμφανίζει σαφές ανταγωνιστικό πλεονέκτημα, συνεισφέροντας ταυτόχρονα στην ενεργειακή απεξάρτηση της χώρας μας και στον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του ενεργειακού τομέα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ΔΕΗ, 2007, "Ετήσιο Πρόγραμμα Αυτόνομων Σταθμών Παραγωγής", Κλάδος Παραγωγής, ΔΠΝ/ΔΕΗ, Αθήνα.
2. ΔΕΣΜΗΕ, 2008, "<http://www.desmie.gr>".
3. ΡΑΕ, 2008, "Υπολογισμός του ύψους του μέσου μεταβλητού κόστους παραγωγής της ΔΕΗ Α.Ε. στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά, στο πλαίσιο των διατάξεων του άρθρου 40 παρ. 3 του ν.2773/199, για το έτος 2008", Απόφαση ΡΑΕ υπ' αριθμ. 588/2008.
4. Kaldellis J.K., Zafirakis D., 2007, "Present Situation and Future Prospects of Electricity Generation in Aegean Archipelago Islands", *Energy Policy*, Vol.35(9), pp.4623-4639.
5. Καλδέλλης Ι.Κ., 2001, "Νέες Συνθήκες στην Τιμολόγηση Ηλεκτρικής Ενέργειας. Η Θέση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας", 2^ο Εθνικό Συνέδριο "για την Εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. - Προτεραιότητες σε Συνθήκες Απελευθερωμένης Αγοράς", ΕΜΠ-RENES, ΚΕΙΠΠ-Γουδί, Αθήνα.
6. Kaldellis J.K., Kondili E.M., Paliatsos A.G., 2008, "The Contribution of Renewable Energy Sources on Reducing the Air Pollution of Greek Electricity Generation Sector", *Fresenius Environmental Bulletin*, Vol.17(10a), pp.1584-1593.
7. Kaldellis J., 1997, "Renewable and Thermal Energy Plants. Comparison on the Basis of Environmental-Social Costs & Benefits", 5ο Συνέδριο Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μόλυβος - Λέσβου.
8. Kaldellis J.K., Kavadias K.A., 2001, "Optimal Wind-Hydro Solution for Aegean Sea Islands' Electricity Demand Fulfillment", *Journal of Applied Energy*, Vol.70, pp.333-354.
9. Kaldellis J.K., 2008, "Integrated Electrification Solution for Autonomous Electrical Networks on the Basis of RES and Energy Storage Configurations", *Energy Conversion and Management Journal*, Vol.49(12), pp.3708-3720.

10. Kaldellis J.K., Zafirakis D., 2007, "Optimum Energy Storage Techniques for the Improvement of Renewable Energy Sources-Based Electricity Generation Economic Efficiency", *Energy Journal*, Vol.32(12), pp.2295-2305.
11. ΥΠΑΝ, 2008, "Αναπροσαρμογή τιμολογίων απορρόφησης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από παραγωγό ή αυτοπαραγωγό σε σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ή μέσω συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας υψηλής απόδοσης ή σε υβριδικό σταθμό", Υπουργική Απόφαση Δ6/Φ1/οικ.26042/30.10.2008, ΦΕΚ Β' 2282/10.11.2008.

ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΣΤΕΡΕΑ ΑΦΥΓΡΑΝΤΙΚΑ ΜΕΣΑ

Γ.Πανάρας¹, Ε.Μαθιουλάκης¹, Β.Μπελεσιώτης¹, Ν.Κυριάκης²

1 - Εργαστήριο Ηλιακών & άλλων Ενεργειακών Συστημάτων
ΕΚΕΦΕ “ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ”, 15310, Αγία Παρασκευή Αττικής
e-mail: petpan@ipta.demokritos.gr

2 – Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών, Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα συστήματα με στερεά αφυγραντικά μέσα αποτελούν ενδιαφέρουσα εναλλακτική πρόταση στον τομέα του κλιματισμού, επισημαίνοντας ότι χαρακτηρίζονται από την απουσία χρήσης ψυκτικών μέσων και τη δυνατότητα εκμετάλλευσης θερμικής ενέργειας, όπως η ηλιακή. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται θεωρητικό μοντέλο συστήματος κλιματισμού με στερεά αφυγραντικά μέσα, το οποίο αναπτύχθηκε στη βάση υφιστάμενων προσεγγίσεων για τα κύρια υποσυστήματα μιας τέτοιας διάταξης. Το μοντέλο επιβεβαιώνεται πειραματικά σε σύστημα πραγματικής κλίμακας και στη βάση σημαντικού πλήθους μετρήσεων, οι οποίες αντιστοιχούν σε τυπικό εύρος συνθηκών λειτουργίας για τα συστήματα αυτά. Αξιοποιώντας τις δυνατότητες που δίνει το μοντέλο, παρουσιάζεται διερεύνηση της απόδοσης του συστήματος σε δύο διαφορετικούς τύπους κλιματικών συνθηκών, ήπιων και θερμών-υγρών, και διερευνάται η επίδραση παραγόντων όπως το επίπεδο απόδοσης των βασικών υποσυστημάτων και το λανθάνον φορτίο, καθώς και λειτουργικών παραμέτρων όπως η παροχή και η θερμοκρασία αναγέννησης. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τη δυνατότητα των συστημάτων να ανταποκριθούν σε πραγματικά φορτία κλιματισμού.

Λέξεις κλειδιά : ηλιακός κλιματισμός, αφυγραντικά μέσα

ΣΥΜΒΟΛΑ

COP	συντελεστής ενεργειακής απόδοσης συστήματος κλιματισμού
N	αριθμός μετρήσεων
η	βαθμός απόδοσης
η_{F1}, η_{F2}	απόδοση συναρτήσεων συνδυασμένου δυναμικού (μοντέλο τροχού desiccant)
T	θερμοκρασία αέρα (°C)
w	απόλυτη υγρασία (g/kg)
α_s, α_e	ποσοστό λειτουργίας υγραντήρα προσαγωγής/απαγωγής

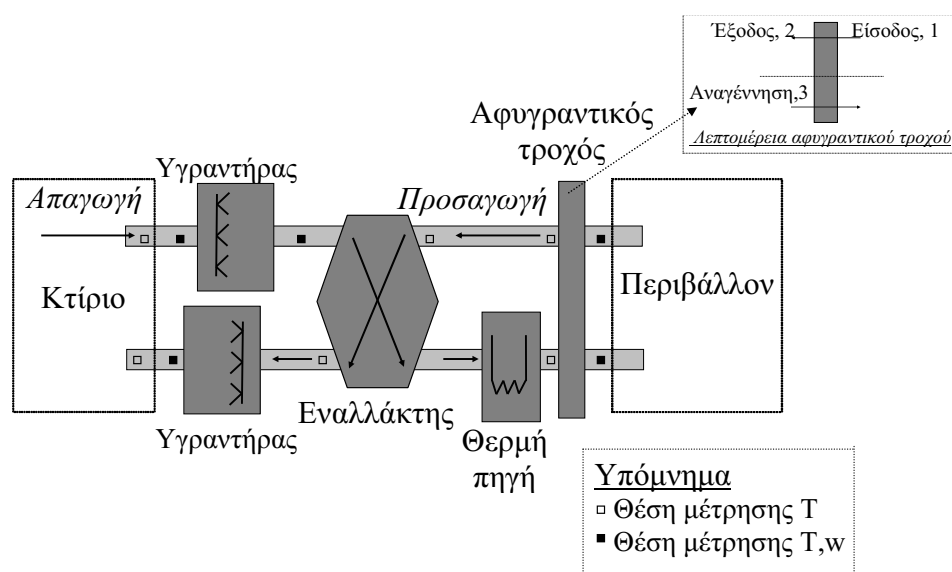
Δείκτες

a	περιβάλλον
b	κτίριο
des	αφυγραντικός τροχός
e	ρεύμα απαγωγής
hx	εναλλάκτης
hum	υγραντήρας
ld	θέση τελικής προσαγωγής αέρα στο κτίριο
reg	θέση αναγέννησης τροχού (ρεύμα απαγωγής)
s	ρεύμα προσαγωγής

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα συστήματα με στερεά αφυγραντικά μέσα παρουσιάζουν θετικές προοπτικές για εφαρμογή στον τομέα του κλιματισμού, σε επίπεδο τόσο απόδοσης όσο και προστασίας του περιβάλλοντος. Γενικά, ο έλεγχος της υγρασίας μέσω της θερμοκρασίας, όπως δηλαδή γίνεται στα συμβατικά συστήματα, είναι ενεργοβόρα διαδικασία, και σε ορισμένες συνθήκες λειτουργίας αποτυγχάνει να εξασφαλίσει τις επιθυμητές συνθήκες στον κλιματιζόμενο χώρο. Στον αντίποδα, τα συστήματα με αφυγραντικά μέσα επιτυγχάνουν ρύθμιση της υγρασίας και θερμοκρασίας με ένα σχετικά ανεξάρτητο τρόπο (όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια). Επιπρόσθετα, δε χρησιμοποιούν επιβλαβή για το περιβάλλον ψυκτικά μέσα, και δεν καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια, για καθαυτή τη διεργασία της ψύξης, αλλά θερμική ενέργεια, σε επίπεδα θερμοκρασίας που ευνοούν τη χρήση ηλιακής ενέργειας (ή απορριπτόμενης θερμότητας). Αυτό θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά τους, [1], και οι περισσότερες ερευνητικές προσεγγίσεις αναφέρονται σε συστήματα συνδεδεμένα με ηλιακή θερμική πηγή.

Η τεχνολογία των συστημάτων στερεού αφυγραντικού μέσου εμφανίζει θετικές προοπτικές όσον αφορά τη διείσδυση στην αγορά. Στην Ευρώπη η σχετική βιβλιογραφία αναφέρει δεκαέξι εγκατεστημένα συστήματα αυτού του τύπου τα οποία είναι συνδεδεμένα με θερμική ηλιακή πηγή (ερευνητικά ή επιδεικτικά έργα), [2]. Αντίστοιχα στις ΗΠΑ αναφέρεται σημαντική εμπορική δραστηριότητα (κυρίως για συστήματα τροφοδοτούμενα από συμβατική θερμική ενέργεια) με αφετηρία τη δεκαετία του '80, η οποία όμως μετά το 2000 εμφάνισε ύφεση οφειλόμενη σε οικονομικούς λόγους [3].



Σχήμα 1 – Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης

Η λειτουργία των συστημάτων κλιματισμού με αφυγραντικά μέσα βασίζεται στη δυνατότητα του τροχού να αφυγράνει τον προσαγώμενο αέρα, παρέχοντας με τον τρόπο αυτό αέρα ο οποίος, λόγω της χαμηλής του περιεκτικότητας σε υγρασία, παρουσιάζει υψηλό δυναμικό σε ψύξη και/ή ύγρανση. Τυπική διάταξη παρουσιάζεται στο σχ.1, όπου σημειώνονται τα κύρια υποσυστήματα μιας τέτοιας εγκατάστασης, τα οποία είναι ο τροχός αφύγρανσης, οι υγραντήρες και ο εναλλάκτης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα συστήματα με αφυγραντικά μέσα έχουν περιορισμούς όσον αφορά το φορτίο που μπορούν να καλύψουν, καθώς επιχειρούν κάποιου είδους αντιστάθμιση μεταξύ της ψυκτικής ικανότητας του αέρα που έχει αφυγρανθεί και του λανθάνοντος φορτίου του κλιματιζόμενου χώρου. Η κατάσταση επιβαρύνεται από τις κλιματικές συνθήκες, ειδικά για θερμά-υγρά κλίματα, καθώς στην

περίπτωση αυτή παρατηρείται μείωση του δυναμικού αφύγρανσης με παράλληλη αύξηση του αισθητού και λανθάνοντος φορτίου, [4].

Στη βιβλιογραφία εμφανίζονται πειραματικές προσεγγίσεις [5-6] καθώς και αναλύσεις στη βάση μοντέλων [7-8] για την απόδοση και λειτουργία συστημάτων ψύξης με στερεά αφυγραντικά μέσα. Στο επίπεδο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι πειραματικές προσεγγίσεις είναι περιορισμένες και δεν παρουσιάζονται εργασίες οι οποίες να αναφέρονται σε συστηματική επιβεβαίωση αναλυτικού μοντέλου σε πειραματική εγκατάσταση πραγματικής κλίμακας. Τέτοιες εργασίες θα παρείχαν συνεισφορά και σε ένα βασικό ερευνητικό ζήτημα για την τεχνολογία αυτή, αυτό της τυποποίησης των συστημάτων, το οποίο περιλαμβάνει μεταξύ άλλων την αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με την ενσωμάτωση των υποσυστημάτων στο συνολικό σύστημα καθώς και την ανάπτυξη μεθοδολογιών σχεδιασμού, [1].

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται, στη βάση υφιστάμενων προσεγγίσεων για τα βασικά υποσυστήματα, μοντέλο για σύστημα κλιματισμού με στερεά αφυγραντικά μέσα. Το μοντέλο επιβεβαιώνεται σε αντίστοιχη διάταξη πραγματικής κλίμακας, για τυπικό εύρος συνθηκών λειτουργίας. Σύμφωνα με το μοντέλο πραγματοποιείται παραμετρική διερεύνηση των δυνατοτήτων απόδοσης του συστήματος και μελετάται η επίδραση παραγόντων όπως οι κλιματικές συνθήκες και το φορτίο κλιματισμού ή λειτουργικών παραμέτρων όπως η παροχή και η θερμοκρασία αναγέννησης.

2. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

2.1 Εναλλάκτης

Για την περίπτωση ισοσταθμισμένου εναλλάκτη, προτείνεται [9] η εξίσωση (1)

$$\eta_{hx} = \frac{T_{hx,in(s)} - T_{hx,out(s)}}{T_{hx,in(s)} - T_{hx,in(e)}} = \frac{T_{hx,in(e)} - T_{hx,out(e)}}{T_{hx,in(e)} - T_{hx,in(s)}} \quad (1)$$

2.2 Υγραντήρας

Ο συνηθέστερος τύπος υγραντήρα σε αντίστοιχες διατάξεις είναι αυτός του υγραντήρα με εξάτμιση (evaporative humidifier). Κατά τη λειτουργία του υγραντήρα με εξάτμιση, πραγματοποιείται χώρα εξάτμιση του νερού και απορρόφησή του από τον διερχόμενο αέρα. Αν δεν υπάρχουν απώλειες προς το περιβάλλον, η θερμοκρασία υγρού βολβού διατηρείται σταθερή κατά τη διεργασία, και ο συνηθέστερος τρόπος παρουσίασης της λειτουργίας του υγραντήρα με εξάτμιση [10], είναι η απόδοση με όρους θερμοκρασίας:

$$\eta_{hum,T} = \frac{T_{hum,in} - T_{hum,out}}{T_{hum,in} - T_{wb}} \quad (2\alpha)$$

ή με όρους απόλυτης υγρασίας (w_s η απόλυτη υγρασία κορεσμού):

$$\eta_{hum,w} = \frac{w_{hum,in} - w_{hum,out}}{w_{hum,in} - w_s} \quad (2\beta)$$

2.3 Τροχός αφύγρανσης

Για τον τροχό επιλέχθηκε η προσέγγιση των Maclaine-Cross και Banks [11], η οποία προβλέπει τη μοντελοποίηση της διεργασίας αφύγρανσης στον τροχό, που αποτελεί συνδυασμένη μεταφορά θερμότητας και υγρασίας, σε αναλογία με την διεργασία της απλής μεταφοράς θερμότητας. Η αναλογία αυτή εκφράζεται με τις μεταβλητές συνδυασμένου δυναμικού F_1, F_2 .

Στη βάση της θεωρίας αναλογίας των Maclaine-Cross και Banks, είναι δυνατός ο υπολογισμός των συντελεστών απόδοσης του τροχού ως προς τις μεταβλητές συνδυασμένου δυναμικού F_1 , F_2 σε αναλογία με τον συντελεστή απόδοσης του τροχού ως προς τη θερμοκρασία, για διεργασία απλής μεταφοράς θερμότητας. Σύμφωνα με τη μοντελοποίηση του Jurinak για τους συντελεστές F_1 , F_2 [12], η οποία εισάγει τα μεγέθη της θερμοκρασίας και απόλυτης υγρασίας στην ανάλυση, διαμορφώνεται το μοντέλο των εξ. ((3,4); $ix=1,2,3$ – σχ.1), το οποίο και επιτρέπει τον υπολογισμό των τιμών θερμοκρασίας και απόλυτης υγρασίας στην έξοδο του ρεύματος προσαγωγής του τροχού (θέση $ix=2$, σχ.1).

$$F_{1,ix} = \frac{-2865}{(T_i + 273.15)^{1.49}} + 4.344 \left(\frac{w_{ix}}{1000} \right)^{0.8624} \quad (3\alpha)$$

$$F_{2,ix} = \frac{(T_i + 273.15)^{1.49}}{6360} - 1.127 \left(\frac{w_{ix}}{1000} \right)^{0.07969} \quad (3\beta)$$

$$\eta_{F1} = \frac{F_{1,2} - F_{1,1}}{F_{1,3} - F_{1,1}} \quad (4\alpha)$$

$$\eta_{F2} = \frac{F_{2,2} - F_{2,1}}{F_{2,3} - F_{2,1}} \quad (4\beta)$$

Είναι χρήσιμο να σημειωθεί ότι ο συντελεστής απόδοσης η_{F1} εκφράζει το βαθμό κατά τον οποίο η διεργασία προσεγγίζει την αδιαβατική μεταβολή, ενώ ο συντελεστής απόδοσης η_{F2} εκφράζει το βαθμό αφύγρανσης, [11]. Το ζευγάρι $[\eta_{F1}, \eta_{F2}] = [0, 1]$ αντιστοιχεί στην ιδεατή διεργασία, δηλαδή αδιαβατική με μέγιστο επίπεδο αφύγρανσης για τη δεδομένη διάταξη-γεωμετρία και τις συνθήκες λειτουργίας.

Στην εργασία [13] υπολογίζεται πειραματικά και προτείνεται ζεύγος τιμών η_{F1} , η_{F2} για τον τροχό που μελετάται στη διάταξη αυτή.

2.4 Μοντέλο συνολικού συστήματος

Το μοντέλο για το συνολικό σύστημα αναπτύχθηκε στη βάση των εξισώσεων (1)-(4), οι οποίες ενσωματώθηκαν σε αυτό σύμφωνα με τη θέση του κάθε υποσυστήματος στη διάταξη.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η πειραματική διάταξη (σχ.1) αναπτύχθηκε στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Ηλιακών & άλλων Ενεργειακών Συστημάτων του ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ. Το σύστημα σχεδιάστηκε για λειτουργία στο εύρος παροχής 450-1800 m³/h και είναι συνδεδεμένο με χώρο (test cell) συνολικής επιφάνειας 48m² (150 m³), ενώ το μεγαλύτερο τμήμα του κελύφους είναι κατασκευασμένο από πολυουρεθάνη πάχους 5cm (συνολικός συντελεστής αισθητού θερμικού φορτίου, UA=0.5 kW/K).

Ειδικότερα, ο τροχός αφύγρανσης είναι αφυγραντικού υλικού silica gel, διαμέτρου 630mm και πάχους 200 mm, οι υγραντήρες ψύξης με εξάτμιση ωφέλιμης επιφάνειας πληρωτικού υλικού κάθετης στη ροή 60x60 cm και διαδρομής πληρωτικού υλικού 30 cm, ενώ χρησιμοποιήθηκε πλακοειδής εναλλάκτης θερμότητας, αντιροής.

Για τη λεπτομερή και ακριβή καταγραφή των σχετικών με την απόδοση του συστήματος μεγεθών αναπτύχθηκε κατάλληλο μετρητικό σύστημα. Στο σχ.1 σημειώνονται οι θέσεις μέτρησης θερμοκρασίας και απόλυτης υγρασίας.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ

4.1 Συνθήκες μετρήσεων

Οι παράμετροι λειτουργίας που επιδέχονται ρύθμιση κατά την πειραματική διερεύνηση είναι η παροχή των αερίων ρευμάτων προσαγωγής και απαγωγής (μελετήθηκε η περίπτωση ίσων τιμών παροχής για τα δύο ρεύματα), η ταχύτητα περιστροφής του τροχού αφύγρανσης (χρησιμοποιήθηκε η προκαθορισμένη τιμή του κατασκευαστή, 6 rph), η θερμοκρασία αναγέννησης του τροχού, η λειτουργία ή όχι του υγραντήρα απαγωγής καθώς και του υγραντήρα προσαγωγής. Στον πίν.1 παρουσιάζεται το εύρος συνθηκών λειτουργίας των μετρήσεων.

Η λειτουργία του συστήματος μελετήθηκε σε ημερήσια βάση, και η εφαρμογή των διαφόρων σεναρίων έγινε με τρόπο που να διασφαλίζει λειτουργία μόνιμου χαρακτήρα για το σύστημα.

	$T_a(^{\circ}\text{C})$	$w_a(\text{g/kg})$	$T_{\text{reg}}(^{\circ}\text{C})$	$w_{\text{reg}}(\text{g/kg})$
MIN	24	4	50	3
MAX	40	14	80	15
Παροχή (m^3/h)	600	1000	1200	

Πίνακας 1 - Εύρος συνθηκών λειτουργίας πειραματικής διάταξης

4.2 Πειραματική επιβεβαίωση μοντέλων υποσυστημάτων

Στον πιν.2 παρουσιάζονται οι πειραματικά προσδιοριζόμενες μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των σχετικών δεικτών απόδοσης για κάθε υποσύστημα. Στον πίνακα σημειώνεται και ο αριθμός των μετρήσεων.

	N	η_T	$s(\eta_T)$	η_w	$s(\eta_w)$	η_{F1}	$s(\eta_{F1})$	η_{F2}	$s(\eta_{F2})$
Εναλλάκτης	182	0.85	0.02	-	-	-	-	-	-
Υγραντήρας	107	0.8	0.05	0.65	0.03	-	-	-	-
Αφυγραντ. Τροχός	109	-	-	-	-	0.15	0.04	0.69	0.06

Πίνακας 2 – Πειραματικά προσδιοριζόμενοι δείκτες απόδοσης υποσυστημάτων

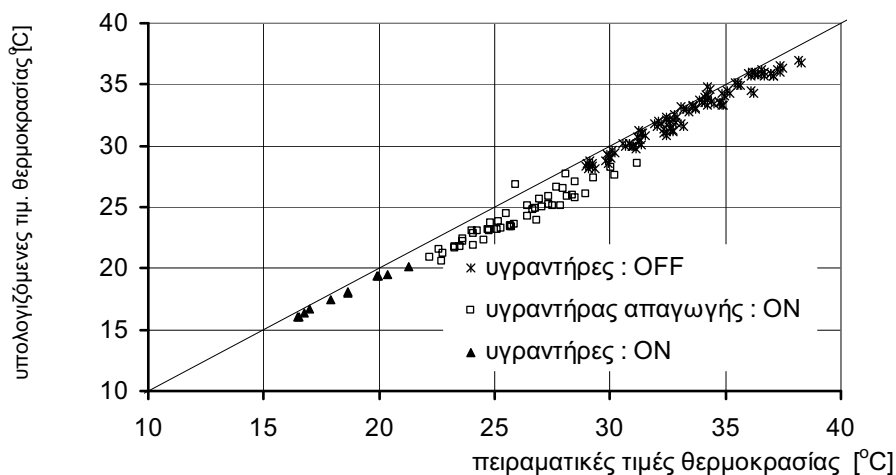
Οι τυπικές αποκλίσεις (πιν.2) είναι σχετικά χαμηλές, παρατήρηση που ενισχύει την ακρίβεια των προτεινόμενων μοντέλων.

4.3. Πειραματική επιβεβαίωση μοντέλου συνολικού συστήματος

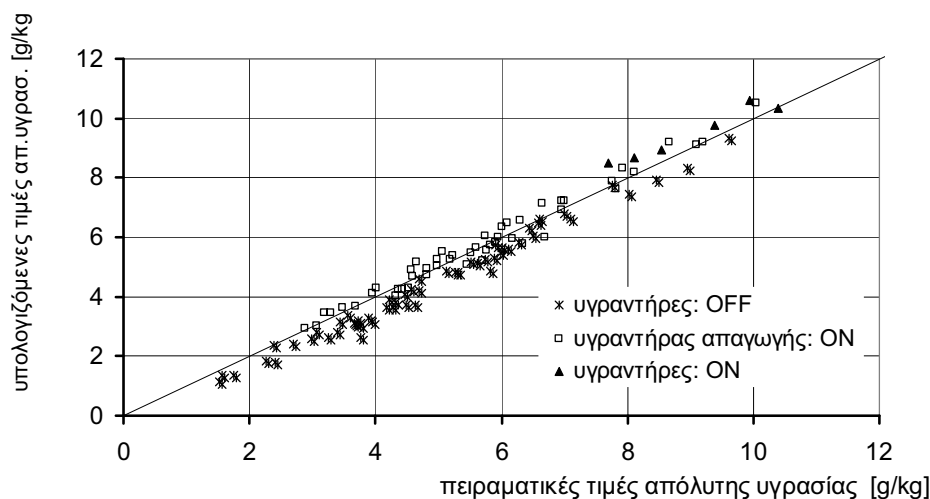
Η ισχύς του μοντέλου ελέγχθηκε στη βάση των πειραματικών τιμών για τη λειτουργία του συνολικού συστήματος σε περιόδους μόνιμης λειτουργίας, και σύγκρισής τους με τις υπολογιζόμενες τιμές από το μοντέλο. Ο έλεγχος έγινε στη θέση προσαγωγής αέρα από το σύστημα στο κτίριο (T_{id} , w_{id}).

Στα σχ.2α, 2β παρουσιάζονται οι τιμές των πειραματικών και υπολογιζόμενων τιμών για θερμοκρασία και απόλυτη υγρασία αντίστοιχα. Η σήμανση είναι διαφορετική ανάλογα με τη λειτουργία ή όχι των υγραντήρων, καθώς η παράμετρος αυτή επηρεάζει την εισαγωγή ή όχι του μοντέλου του υγραντήρα στο συνολικό μοντέλο.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα, η σύγκλιση είναι πολύ ικανοποιητική για το μέγεθος της απόλυτης υγρασίας. Για τη θερμοκρασία παρατηρείται μια σχετική υποεκτίμηση από το μοντέλο (θεωρητική αύξηση της ψυκτικής ικανότητας), η οποία όμως δεν ξεπερνάει τους 2°C . Δεδομένων των αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται στις μετρήσεις σε ένα πραγματικό σύστημα όπως το συγκεκριμένο, η σύγκλιση του μοντέλου κρίνεται ικανοποιητική.



Σχήμα 2α – Μετρούμενες και υπολογιζόμενες τιμές θερμοκρασίας στην έξοδο του συστήματος (συμπεριλαμβάνεται η γραμμή $y=x$)



Σχήμα 2β – Μετρούμενες και υπολογιζόμενες τιμές απόλυτης υγρασίας στην έξοδο του συστήματος (συμπεριλαμβάνεται η γραμμή $y=x$)

5. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΑΦΥΓΓΡΑΝΣΗ

Σύμφωνα με το μοντέλο που αναπτύχθηκε και το οποίο επιβεβαιώθηκε πειραματικά, πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση της απόδοσης του συστήματος. Σχετικά με τις συνθήκες της διερεύνησης, διατυπώνονται τα παρακάτω:

- Κτίριο αναφοράς αντίστοιχο της πειραματικής διάταξης ($UA=0.5 \text{ kW/K}$, λανθάνον φορτίο το οποίο αντιστοιχεί στο 25% του υπολογιζόμενου αισθητού φορτίου, [8])
- Παροχή $1200\text{-}1500 \text{ m}^3/\text{h}$ και 100% ανανέωση αέρα
- Θερμοκρασία αναγέννησης $50\text{-}80^\circ\text{C}$ (στάθμη συμβατή με ηλιακό φορέα)
- Συνθήκες άνεσης: 24°C , 50%RH [10]
- Κλιματικές συνθήκες,
 - α. Ήπιες: τοποθεσία Αθήνας, 32°C -30%RH (όπως αυτές προσδιορίζονται μέσω της εμπειρίας από την πειραματική διερεύνηση)

β. Θερμές και υγρές: τοποθεσία Jacksonville (Florida, US), 36⁰C, 41%RH [9,11]

- Τεχνικά χαρακτηριστικά υποσυστημάτων:

α. Διάταξη I (Πειραματική εγκατάσταση): $n_{F1}=0.15$, $n_{F2}=0.69$, $n_{hx}=0.85$, $n_{hum,T}=0.8$, $n_{hum,w}=0.8$ (στον υγραντήρα θεωρήθηκε ταυτόσημη απόδοση όσον αφορά τη θερμοκρασία και υγρασία)

β. Διάταξη II (Υψηλής Απόδοσης): $n_{F1}=0.05$, $n_{F2}=0.95$, $n_{hx}=0.95$, $n_{hum,T}=0.95$, $n_{hum,w}=0.95$

Κατά τη διερεύνηση υπολογίζεται το ζεύγος τιμών (a_s , a_e) για τους υγραντήρες καθώς και το COP του συστήματος (λόγος φορτίου κλιματισμού, λανθάνοντος και αισθητού, προς θερμική ενέργεια αναγέννησης), [7]. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πιν.3, και τα ακόλουθα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν:

- Η απόδοση των υποσυστημάτων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην απόδοση του συστήματος. Η διάταξη I (πειραματική) απαιτεί υψηλή θερμοκρασία αναγέννησης (80⁰C) για να καλύψει το απαιτούμενο φορτίο (πιν.3-α). Αντίθετα για τη διάταξη II (υψηλής απόδοσης) η θερμοκρασία αναγέννησης μειώνεται σημαντικά (πιν.3-β), ενώ υπάρχει και περιθώριο για μείωση της παροχής (πιν.3-γ).

		Περιοχή	Ποσοστό λανθάνοντος φορτίου	Παροχή (m ³ /h)	T _{reg} (°C)	a _e	a _s	COP
α	Διάταξη I	Αθήνα	0.25	1500	80	0.18	0.95	0.3
β	Διάταξη II	Αθήνα	0.25	1500	50	0.44	0.73	0.77
γ	Διάταξη II	Αθήνα	0.25	1200	50	0.99	0.77	0.88
δ	Διάταξη II	Αθήνα	0.25	1200	60	0.21	0.9	0.71
ε	Διάταξη II	Αθήνα	0.5	1200	60	0.71	0.75	0.81
στ	Διάταξη II	Jacksonville	0.25	1500	85	1	0.97	0.7

Πιν. 3 – Αποτελέσματα θεωρητικής διερεύνησης απόδοσης συστήματος ηλιακού κλιματισμού με στερεά αφυγραντικά μέσα

- Η λειτουργία σε μειωμένη παροχή (πιν.3-γ) ή σε μειωμένη θερμοκρασία αναγέννησης (πιν.3-γ,δ) επιδρά θετικά στο COP του συστήματος.
- Σε χώρους επιβαρυσμένου φορτίου υγρασίας (ποσοστό λανθάνοντος φορτίου 0.5), η διάταξη II ικανοποιεί τις συνθήκες (πιν.3-ε).
- Σε επιβαρυσμένες κλιματικές συνθήκες η διάταξη II ικανοποιεί οριακά το απαιτούμενο φορτίο (οι υγραντήρες δουλεύουν σε πλήρη ύγρανση) για υψηλή θερμοκρασία αναγέννησης (85⁰C), η οποία θεωρείται σχετικά υψηλή για λειτουργία με ηλιακό πεδίο επίπεδων συλλεκτών (πιν.3-στ).
- Το υπολογιζόμενο COP για τη διάταξη II συμφωνεί με τις τιμές που συναντώνται και προτείνονται σε θεωρητικές μελέτες της βιβλιογραφίας για αντίστοιχα συστήματα, [7].

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αναπτύχθηκε μοντέλο συστήματος κλιματισμού με στερεά αφυγραντικά μέσα, το οποίο και επιβεβαιώθηκε πειραματικά σε αντίστοιχη διάταξη πραγματικής κλίμακας.

Η διερεύνηση της απόδοσης του συστήματος στη βάση του μοντέλου παρέχει χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την ικανότητα αντίστοιχων συστημάτων. Ειδικότερα και δεδομένων των περιορισμών που εμφανίζουν τα συστήματα αυτά όταν καλούνται να ανταποκριθούν σε κάλυψη αισθητού και λανθάνοντος φορτίου σε θερμά-υγρά κλίματα ή σε συνθήκες υψηλού λανθάνοντος φορτίου, αποτυπώνεται ο βαθμός επίδρασης στην απόδοση των συστημάτων παραγόντων όπως οι κλιματικές συνθήκες και το επίπεδο του λανθάνοντος

φορτίου. Παράλληλα εξετάστηκε η δυνατότητα λειτουργίας σε όσο το δυνατόν χαμηλότερη θερμοκρασία αναγέννησης ή σε σχετικά μειωμένη παροχή, και η ευεργετική επίδραση των επιλογών αυτών στο COP του συστήματος. Ιδιαίτερα σημαντικό για τη βέλτιστη ικανότητα σε απόδοση του συστήματος καθώς και για τη λειτουργία σε επίπεδα θερμοκρασίας που να ευνοούν τη χρήση θερμικής ηλιακής ενέργειας, καταδείχθηκε να είναι το επίπεδο απόδοσης των βασικών υποσυστημάτων (τροχός, υγραντήρας, εναλλάκτης).

Η εμπειρία από την λειτουργία συστήματος πραγματικής κλίμακας, σε συνδυασμό με τις δυνατότητες που παρέχει το θεωρητικό μοντέλο μπορούν να αποτελέσουν σημαντική συνεισφορά στην έρευνα για το σχεδιασμό και ανάπτυξη τυποποιημένων συστημάτων με δυνατότητα χρήσης θερμικής ηλιακής ενέργειας, πεδίο που αποτελεί προτεραιότητα για την τεχνολογία αυτή.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα υποστηρίχτηκε από την ΓΓΕΤ, στα πλαίσια του Επιχειρησιακού Προγράμματος για την Ανταγωνιστικότητα (Γ' ΚΠΣ, 2000-2006, Δράση: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Εξοικονόμηση Ενέργειας)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Waugaman D.G., Kini A., Kettleborough C.F., A review of desiccant cooling systems, *Journal of Energy Resources Technology* 115 (1993) 1-8.
- [2] Henning H.-M., Solar assisted air conditioning of buildings – an overview, *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) 1734–1749.
- [3] Daou K., Wang R.Z., Xia Z.Z., Desiccant Cooling air-conditioning: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10 (2006) 55-77.
- [4] Application Engineering Manual for Desiccant Systems. Washington : American Gas Cooling Center; 1999.
- [5] Joudi K.A., Madhi S.M., An experimental investigation into a solar-assisted desiccant-evaporative air-conditioning system, *Solar Energy* 39(2) (1987) 97-107.
- [6] Henning H., Erpenbeck T., Hindenburg C., Santamaria I.S., The potential of solar energy use in desiccant cooling cycles, *International Journal of Refrigeration* 24 (2001) 220-229.
- [7] Nelson J.S., Beckmann W.A., Mitchell J.W., Close D.J., Simulations of the performance of open cycle desiccant air-conditioning systems using solar energy, *Solar Energy* 21 (1978) 273-278.
- [8] Davanagere B.S., Sherif S.A., Goswami D.Y., A feasibility study of a solar desiccant air-conditioning system – part I, *International Journal of Energy Research* 23 (1999) 7-21.
- [9] Kays W.M., London A.L., Compact Heat Exchangers (3rd ed.), Mc-Graw Hill, London, 1984.
- [10] 1997 ASHRAE Handbook: Fundamentals, Inch-Pound editions, ASHRAE, Atlanta, 1997.
- [11] Maclaine-Cross I.L., Banks P.J., Coupled heat and mass transfer in regenerators – prediction using an analogy with heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 15 (1972) 1225-1242.
- [12] Jurinak J.J., Open cycle solid desiccant cooling – component models and system simulations, Ph.D. Thesis, Univ. of Wisconsin-Madison, 1982
- [13] Panaras G., Mathioulakis E., Belessiotis V., Kyriakis N., Experimental validation of a simplified approach for a desiccant wheel model, *Energy and Buildings*, *under review*

ΞΗΡΑΝΣΗ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ ΣΕ ΗΛΙΑΚΑ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΑ ΑΜΕΣΟΥ ΚΑΙ ΕΜΜΕΣΟΥ ΤΥΠΟΥ ΣΤΑ ΧΑΝΙΑ ΚΡΗΤΗΣ

*Γιάννη Βουρδουμπά, Αθηνάς Νούκα, Ευαγγελίας Καρλάκη, Ανδρέα Λιαράκου,
Ευτυχίας Γκρατσία,*

ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ, ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

E-mail : gboyrd@tee.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ηλιακή ξήρανση αγροτικών και άλλων προϊόντων αποτελεί μια σχετικά απλή εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας, η οποία βρίσκεται εφαρμογές σε διάφορες χώρες. Η υψηλή ηλιοφάνεια της Κρήτης σε σχέση με άλλες περιοχές της Ελλάδος κάνει ελκυστική την αξιοποίηση της στον τομέα αυτό. Μεταξύ των διαφόρων τύπων ξηραντήριων, τα ξηραντήρια άμεσου και έμμεσου τύπου παρουσιάζουν ποικίλα πλεονεκτήματα. Η πειραματική ξήρανση διάφορων φρούτων και λαχανικών στα Χανιά Κρήτης [35 ο 31 “ Β] με τα δύο προαναφερθέντα ξηραντήρια σε μικρή κλίμακα αποδεικνύει ότι οι προοπτικές για την ευρύτερη χρήση της ηλιακής ενέργειας στο τομέα αυτό είναι αρκετά ελκυστικές.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ- ΗΛΙΑΚΗ ΞΗΡΑΝΣΗ

Μια από τις πιο γνωστές μεθόδους συντήρησης διαφόρων προϊόντων αποτελεί η απομάκρυνση του νερού μέσω της ξήρανσής τους. Μεταξύ των διαφόρων μεθόδων ξήρανσης, στη περίπτωση της ικανοποιητικής ηλιακής ακτινοβολίας, αρκετά καλά αποτελέσματα δίδει η ηλιακή ξήρανση.

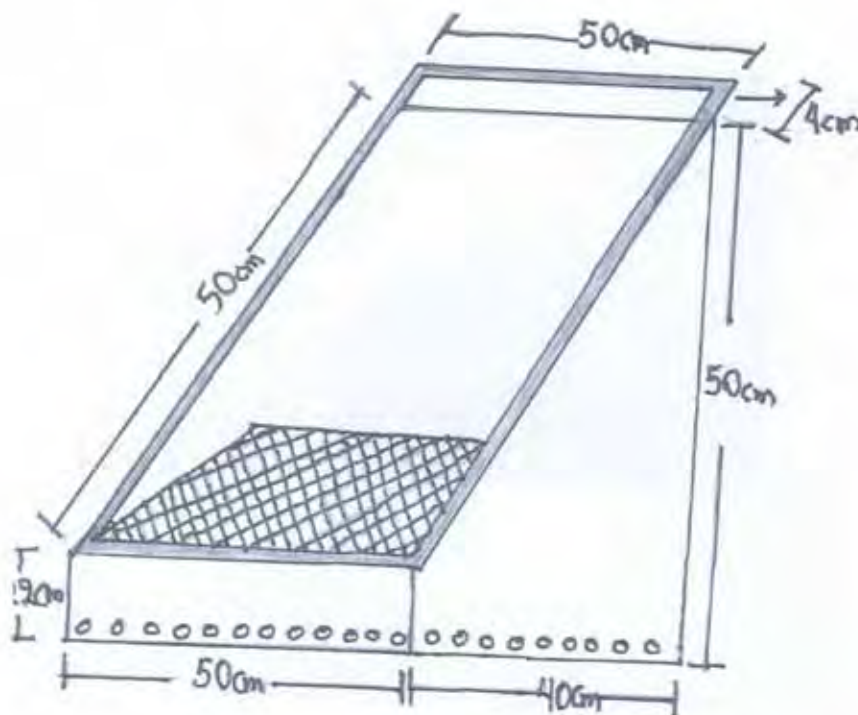
Σε χώρες της Μεσογείου αποτελεί γνωστή πρακτική από αρχαιοτάτων χρόνων η ξήρανση διαφόρων αγροτικών προϊόντων με την απευθείας έκθεσή τους στον ήλιο. Όμως η μέθοδος αυτή παρουσιάζει διάφορα μειονεκτήματα λόγω της ανοικτής έκθεσης των προϊόντων αυτών στο εξωτερικό περιβάλλον. Αντίθετα, η ξήρανσή τους σε απλά ξηραντήρια, σε κλειστό χώρο συνεπάγεται τη μη έκθεση τους σε σκόνη ή σε έντομα και πτηνά. Μεταξύ των διαφόρων απλών ξηραντήριων ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν είτε τα ξηραντήρια άμεσου τύπου είτε τα ξηραντήρια έμμεσου τύπου, λόγω της απλότητας της κατασκευής και της λειτουργίας τους. Η αύξηση της τιμής των συμβατικών καυσίμων που παρατηρείται τελευταία και η αναμενόμενη διατήρηση των τιμών σε υψηλά επίπεδα τα προσεχή έτη σε συνδυασμό με τα περιβαλλοντικά προβλήματα που συνεπάγεται η χρήση τους, κάνει ελκυστική τη χρήση της ηλιακής ενέργειας, για την ξήρανση διαφόρων προϊόντων, εφόσον οι αναγκαίες θερμοκρασίες για την ξήρανση είναι εύκολα επιτεύξιμες.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΩΝ

2.Α. Ηλιακό παθητικό ξηραντήριο άμεσου τύπου

Το ξηραντήριο αυτό αποτελείται από ένα θάλαμο κατασκευασμένο από ξύλο βαμμένο μαύρο, του οποίου οι διαστάσεις παρουσιάζονται στο παρατιθέμενο σκαρίφημα. Η ηλιακή ενέργεια εισέρχεται σε αυτό μέσω μιας κεκλιμένης επιφάνειας καλυμμένης με τζάμι. Στο κάτω μέρος του, περιμετρικά υπάρχουν διάφορες μικρές οπές για την είσοδο του αέρα. Τα προς ξήρανση προϊόντα τοποθετούνται πάνω σε μια μεταλλική εσχάρα εντός του ξηραντηρίου. Ο ψυχρός αέρας εισερχόμενος μέσω των οπών στο ξηραντήριο, θερμαίνεται και ανερχόμενος ξηραίνει

τα προϊόντα που βρίσκονται πάνω στην εσχάρα. Ο προσανατολισμός του ξηραντηρίου είναι προς το Νότο κατά τη διαδικασία της ξήρανσης. Η κλίση της άνω επιφάνειας καλυμμένης με τζάμι, ως προς το οριζόντιο επίπεδο είναι 37° . Στο ξηραντήριο αυτό άμεσου τύπου η συλλογή της ηλιακής ενέργειας και η ξήρανση των αγροτικών προϊόντων γίνεται στον ίδιο χώρο. Στο σχήμα 2.Α παρουσιάζεται σκαρίφημα του ηλιακού ξηραντηρίου άμεσου τύπου.



ΣΧΗΜΑ 2.Α ΗΛΙΑΚΟ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟ ΑΜΕΣΟΥ ΤΥΠΟΥ

2.Β. Ηλιακό παθητικό ξηραντήριο έμμεσου τύπου

Στο παθητικό ηλιακό ξηραντήριο έμμεσου τύπου, η συλλογή της ηλιακής ενέργειας και η θέρμανση του αέρα γίνονται σε διαφορετικό χώρο από το χώρο ξήρανσης των προϊόντων (σχήμα 2.Β).

Ο χώρος της συλλογής της ηλιακής ενέργειας αποτελείται από ένα ηλιακό συλλέκτη, κατασκευασμένο από πλαίσιο αλουμινίου, όπου στη πλάτη του από τη μέσα μεριά είναι ενισχυμένος με λεπτό ξύλο τύπου κόντρα πλακέ, βαμμένο με μαύρη μπογιά ώστε να απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία. Η επιφάνεια του πλαισίου έχει καλυφτεί με τζάμι. Ο συλλέκτης έχει τοποθετηθεί σε κλίση 35° ως προς το οριζόντιο επίπεδο, και στο άνω και κάτω μέρος του υπάρχει μεταξύ του πλαισίου και του τζαμιού άνοιγμα, για την είσοδο του ψυχρού αέρα και την έξοδο του θερμού αέρα. Ο χώρος ξήρανσης σχήματος παραλληλεπίπεδου συνδέεται με το άνω μέρος του ηλιακού συλλέκτη και είναι υπερυψωμένος κατά 40 εκατ., ενώ στη δεξιά πλευρά του υπάρχει μικρή πόρτα για την τοποθέτηση των προϊόντων που πρόκειται να ξηρανθούν πάνω σε μια μεταλλική σχάρα. Στο επάνω μέρος του χώρου ξήρανσης υπάρχει μικρή κυλινδρική καμινάδα για την έξοδο του αέρα. Κατά τη λειτουργία του ξηραντηρίου, ψυχρός αέρας εισέρχεται στο κάτω μέρος του ηλιακού συλλέκτη και θερμαινόμενος ανέρχεται στο χώρο του ξηραντηρίου όπου έρχεται σε επαφή με τα προς ξήρανση προϊόντα και εξέρχεται από την καμινάδα.



ΣΧΗΜΑ 2B.1 ΗΛΙΑΚΟ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟ ΕΜΜΕΣΟΥ ΤΥΠΟΥ

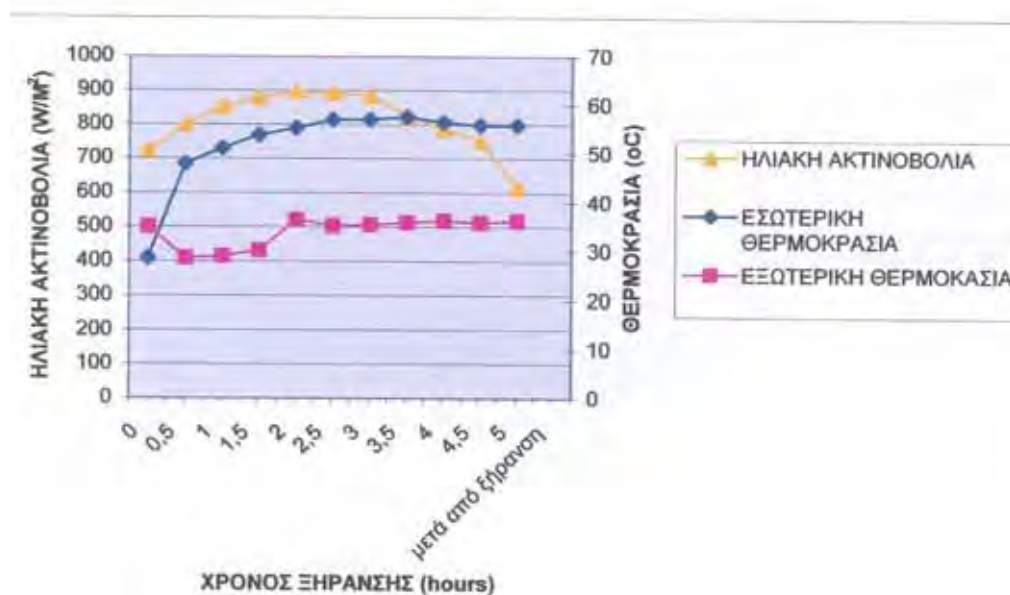
3, ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟΥ ΑΜΕΣΟΥ ΤΥΠΟΥ

Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων στο ηλιακό ξηραντήριο άμεσου τύπου , χρησιμοποιήθηκαν διάφορα λαχανικά (ντομάτα, αγγούρι) και φρούτα (πορτοκάλι, βερύκοκο, ακτινίδιο) κομμένα σε φέτες για ξήρανση. Η ξήρανση των διαφόρων προϊόντων διαρκούσε 5- 5,5 ώρες. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του ΤΕΙ Κρήτης στα Χανιά κατά τους μήνες Μάιο και Ιούλιο. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων καταγραφόταν:

- α) Η ηλιακή ακτινοβολία
- β) Ο χρόνος
- γ) Η θερμοκρασία εντός του χώρου του ξηραντηρίου
- δ) Η θερμοκρασία περιβάλλοντος
- ε) Η αρχική υγρασία των προϊόντων
- στ) Το βάρος των προϊόντων σε διάφορα χρονικά διαστήματα.

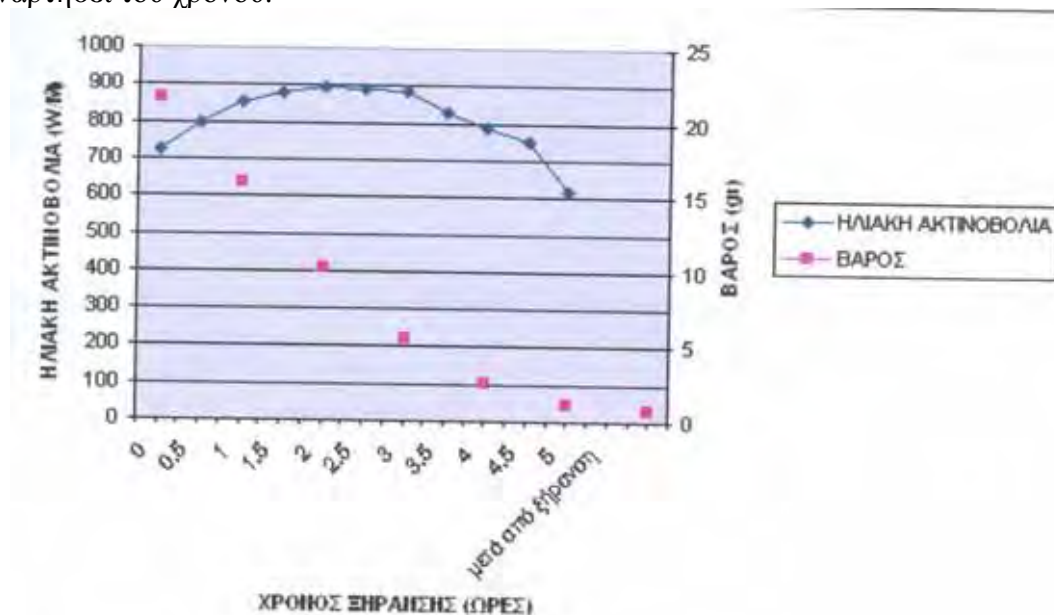
Η αρχική υγρασία του κάθε προϊόντος υπολογιζόταν με τη τοποθέτηση του δείγματος μετά το τέλος των μετρήσεων σε φούρνο ξήρανσης στους 105°C για 24 ώρες και μέτρηση του βάρους του.

Στο σχήμα 3.1 φαίνεται για τη ξήρανση της ντομάτας (23-5-06 , αρχικό βάρος 21,5 γρ.) η μεταβολή της εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου.



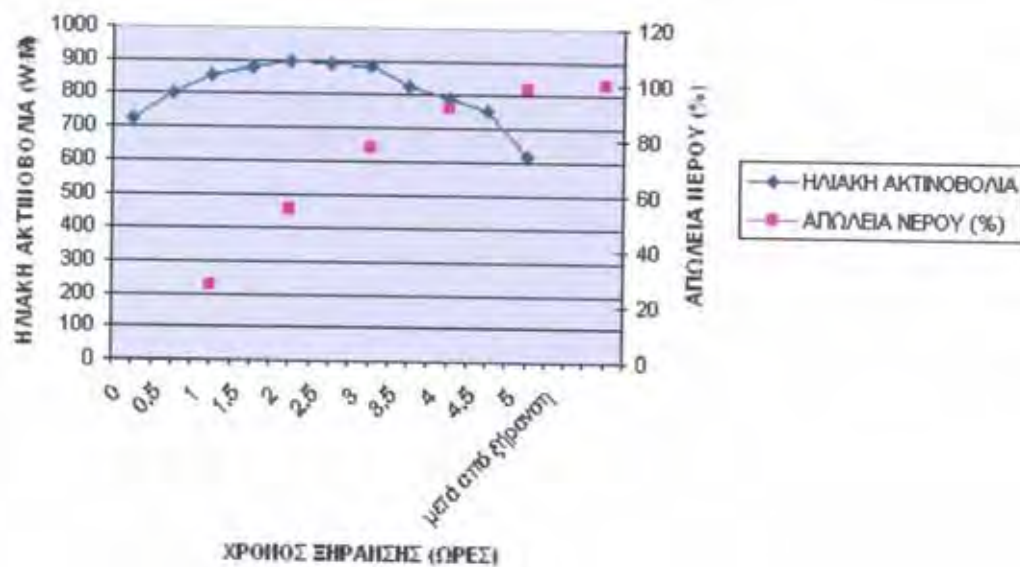
ΣΧΗΜΑ 3.1 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ, ΤΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΗΣ ΝΤΟΜΑΤΑΣ

Στο σχήμα 3,2 φαίνεται η μεταβολή του βάρους του δείγματος και της ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει του χρόνου.



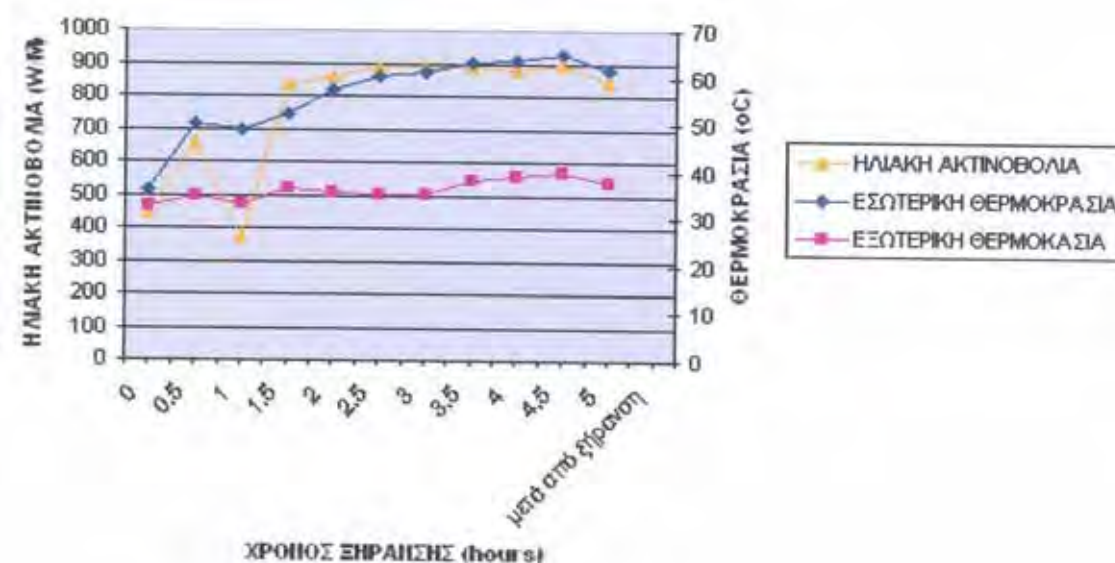
ΣΧΗΜΑ 3.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΒΑΡΟΥΣ ΤΗΣ ΝΤΟΜΑΤΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ.

Στο σχήμα 3.3 φαίνεται η απώλεια βάρους και οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας ανά ώρα ξήρανσης.



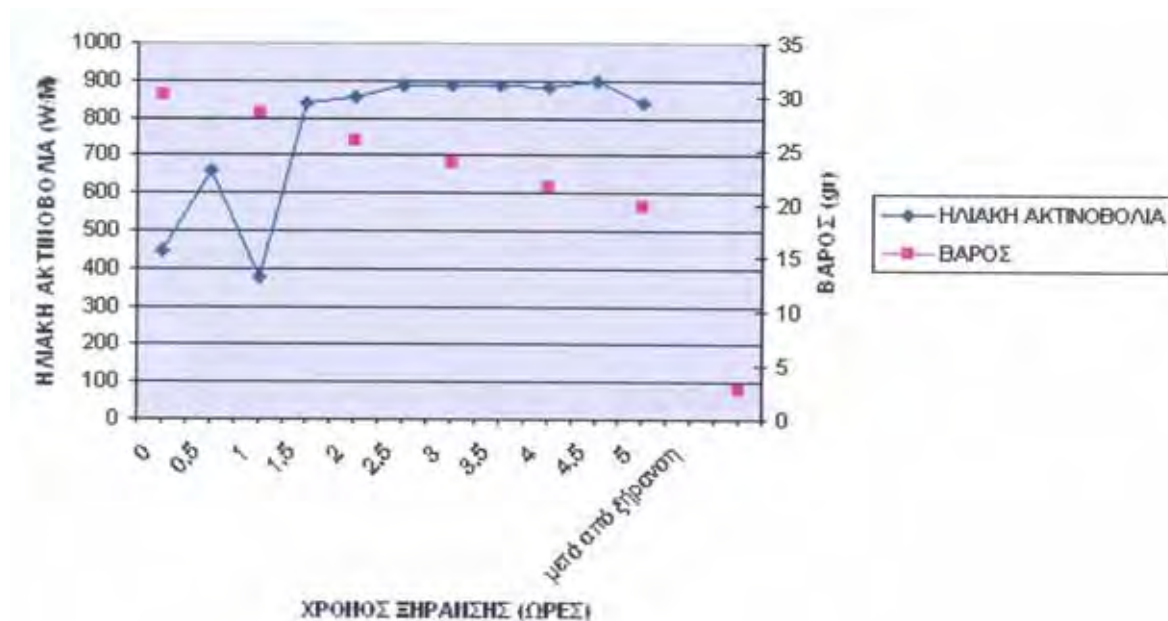
ΣΧΗΜΑ 3.3 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΝΕΡΟΥ ΤΗΣ ΝΤΟΜΑΤΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ.

Το πείραμα άρχισε στις 11.00 πμ και τελείωσε στις 16.00 πμ. Η μείωση της αρχικής υγρασίας της ντομάτας που επετεύχθη κατά το χρονικό αυτό διάστημα ήταν 98,55%. Στο σχήμα 3.4 φαίνεται για τη ξήρανση του βερίκοκου (13-7-06, αρχικό βάρος 30,22 gr) η μεταβολή της εσωτερικής και της εξωτερικής θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου.

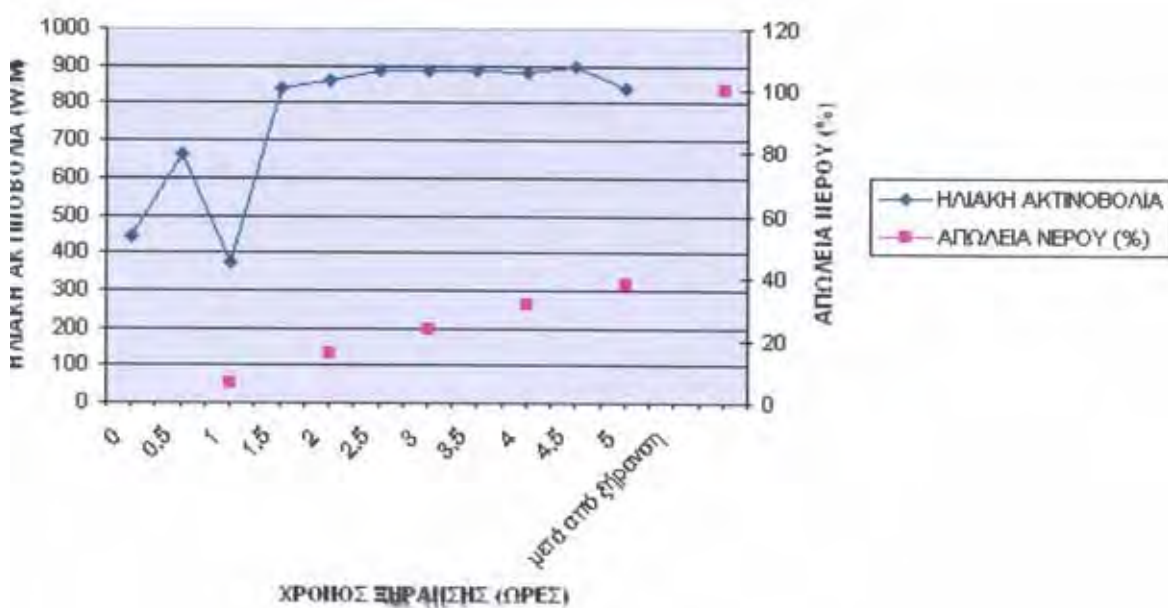


ΣΧΗΜΑ 3.4 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΤΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΟΥ ΒΕΡΙΚΟΚΟΥ.

Στο σχήμα 3.5 φαίνεται η μεταβολή του βάρους του δείγματος και της ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει του χρόνου και τέλος στο σχήμα 3.6 η απώλεια βάρους και οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας ανά ώρα ξήρανσης.



ΣΧΗΜΑ 3.5 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΒΑΡΟΥΣ ΤΟΥ ΒΕΡΥΚΟΚΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ.



ΣΧΗΜΑ 3.6 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΝΕΡΟΥ ΤΟΥ ΒΕΡΥΚΟΚΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ.

Το πείραμα άρχισε στις 10.00 π.μ και τελείωσε στις 15.00 μμ. Η μείωση της αρχικής υγρασίας του βερύκοκου που επετεύχθη το προαναφερθέν χρονικό διάστημα ήταν 37,93%.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟΥ ΕΜΜΕΣΟΥ ΤΥΠΟΥ

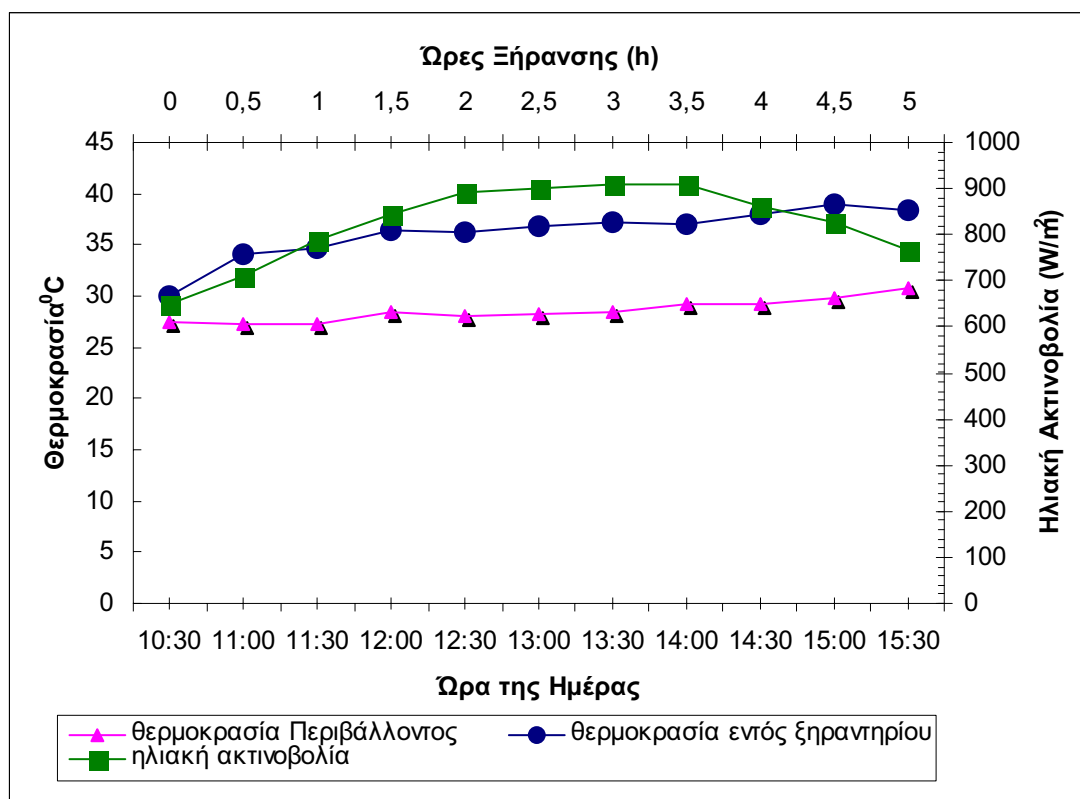
Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων στο ηλιακό ξηραντήριο έμμεσου τύπου χρησιμοποιήθηκαν όπως και προηγουμένως διάφορα λαχανικά (ντομάτα, αγγούρι, πατάτα) και φρούτα (λε-

μόνι, ακτινίδιο, πορτοκάλι). Η χρονική διάρκεια των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στους χώρους του ΤΕΙ Κρήτης στα Χανιά, τον Μάιο και τον Ιούλιο του 2006 ήταν 5 ώρες. Τα φρούτα πριν τοποθετηθούν στο θάλαμο για ξήρανση κοβόταν σε φέτες. Κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων καταγράφησαν:

- α) Η ηλιακή ακτινοβολία
- β) Ο χρόνος
- γ) Η θερμοκρασία εντός του χώρου του ξηραντηρίου
- δ) Η θερμοκρασία περιβάλλοντος
- ε) Η αρχική υγρασία
- στ) Το βάρος του προϊόντος σε διάφορα χρονικά διαστήματα.

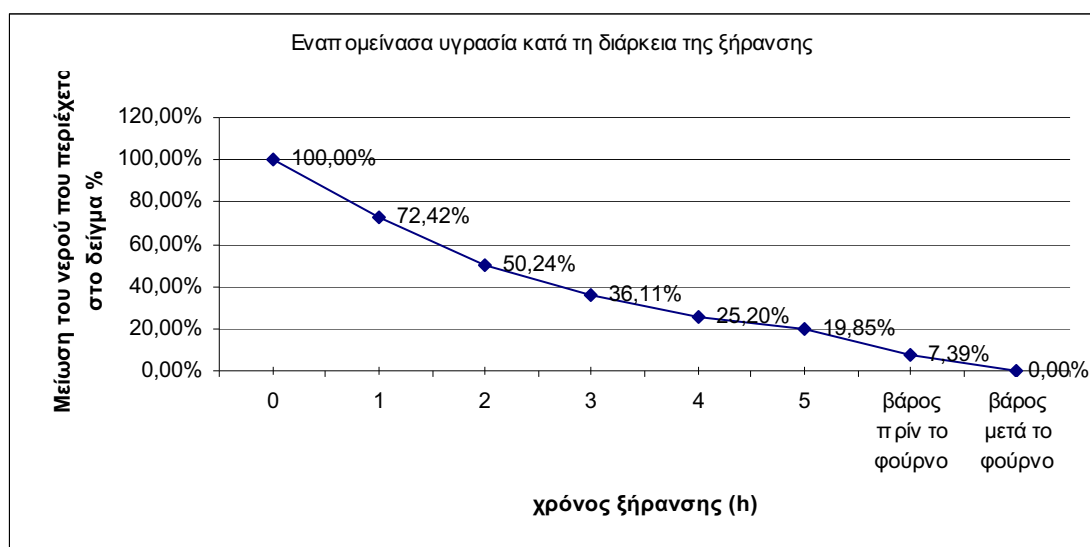
Η αρχική υγρασία του προϊόντος υπολογιζόταν με την τοποθέτηση του δείγματος μετά το τέλος των μετρήσεων σε φούρνο ξήρανσης στους 105°C για 24 ώρες και τη μέτρηση του βάρους του.

Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται για τη ξήρανση φέτας λεμονιού με αρχικό βάρος 17,89 γρ. (στις 18-5-06), η μεταβολή της ηλιακής, της θερμοκρασίας του θαλάμου ξήρανσης και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος με το χρόνο.



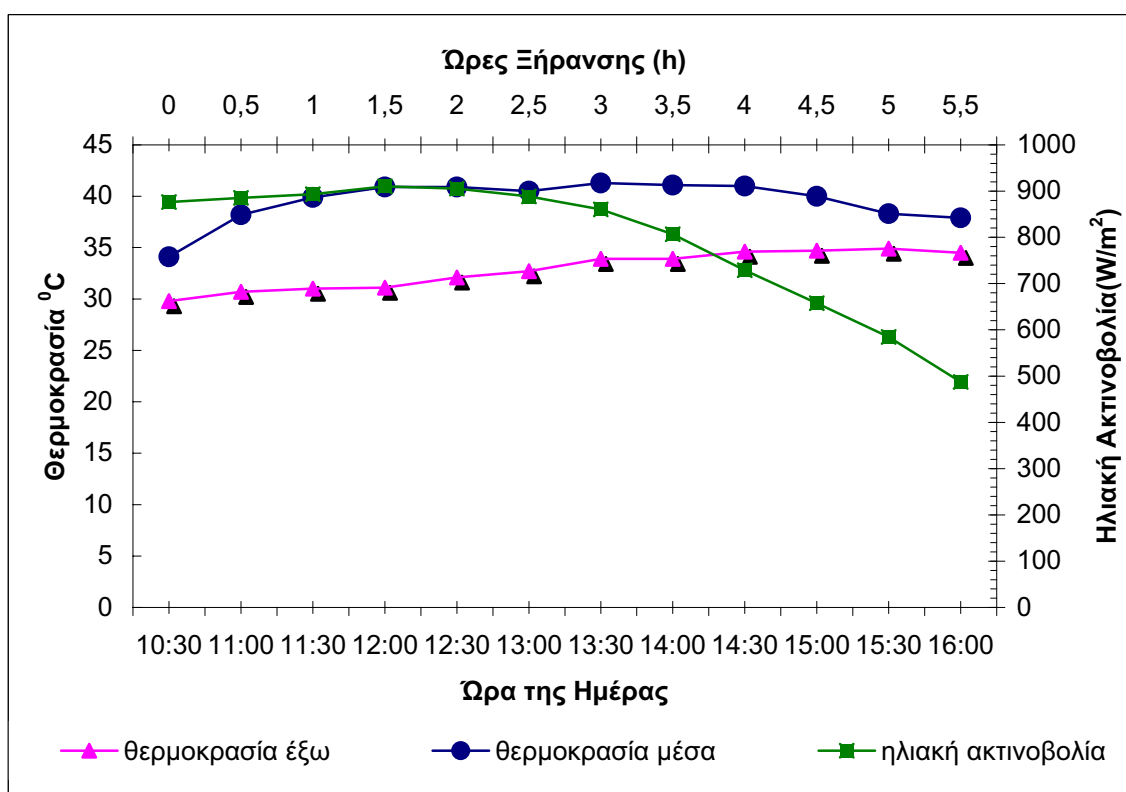
ΣΧΗΜΑ 4.1 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΟΥ ΛΕΜΟΝΙΟΥ.

Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η εκατοστιαία μείωση του νερού που περιέχεται στο δείγμα συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης.



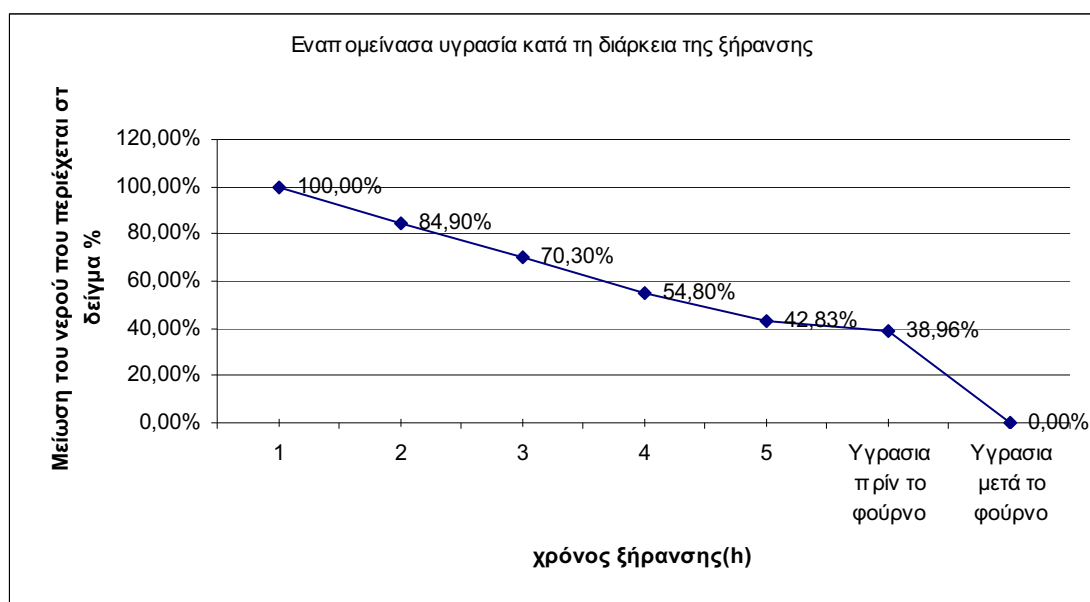
ΣΧΗΜΑ 4.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΚΑΤΟΣΤΙΑΙΑΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΔΕΙΓΜΑ ΤΟΥ ΛΕΜΟΝΙΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ.

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται για τη ξήρανση φέτας πατάτας με αρχικό βάρος 13,73 γρ. (στις 23-5-06), η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας του θαλάμου ξήρανσης και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος με το χρόνο.



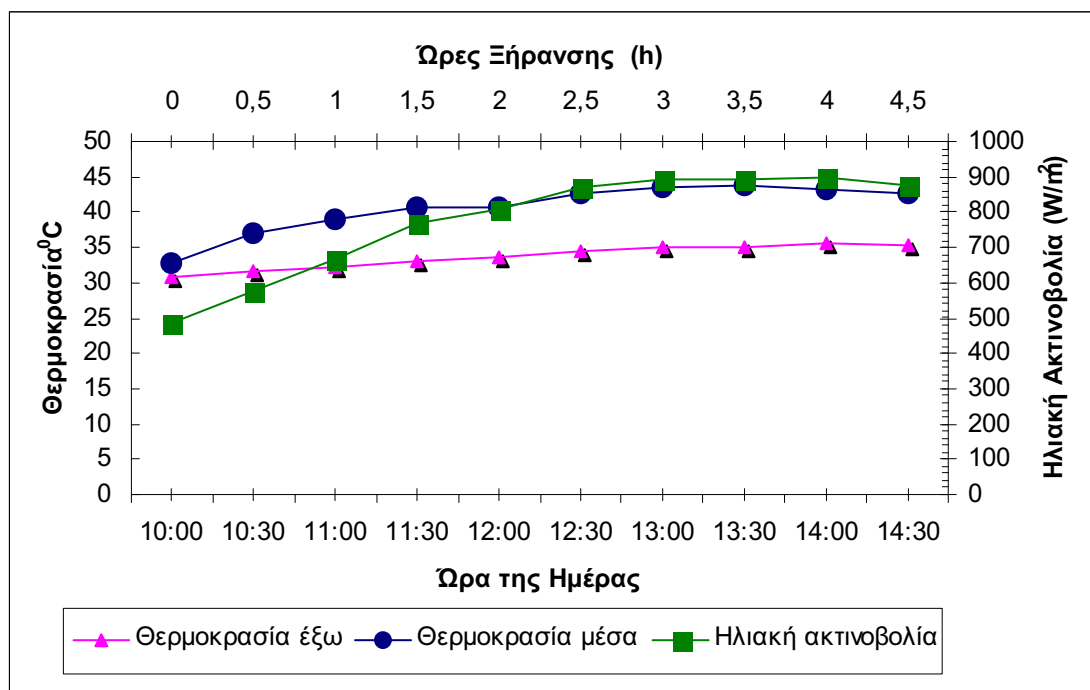
ΣΧΗΜΑ 4.3 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΗΣ ΠΑΤΑΤΑΣ.

Στο σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η εκατοστιαία μείωση του νερού που περιέχεται στο δείγμα συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης.



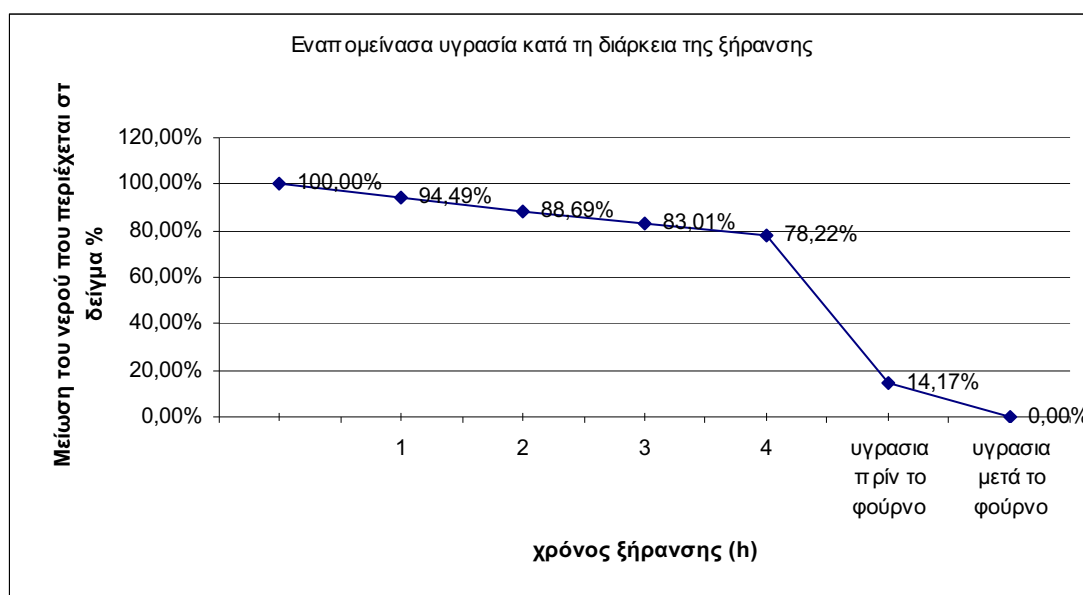
ΣΧΗΜΑ 4.4 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΚΑΤΟΣΤΙΑΙΑΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΗΣ ΠΑΤΑΤΑΣ.

Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται για την ξήρανση φέτας ντομάτας με αρχικό βάρος 25,38 γρ. (στις 10-7-2006), η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας του θαλάμου ξήρανσης και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος με το χρόνο.



ΣΧΗΜΑ 4.5 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΗΣ ΝΤΟΜΑΤΑΣ.

Τέλος, στο σχήμα 4.6, παρουσιάζεται η μείωση του νερού που περιέχεται στο δείγμα συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης.



ΣΧΗΜΑ 4.6 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΚΑΤΟΣΤΙΑΙΑΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΕΤΑΙ ΣΤΗ ΝΤΟΜΑΤΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ.

5. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η προκαταρκτική ξήρανση διαφόρων φρούτων και λαχανικών επετεύχθη ικανοποιητικά σε σύντομο χρονικό διάστημα στα δύο προαναφερθέντα ξηραντήρια. Δεδομένου ότι τα φρούτα και τα λαχανικά ξηραίνονται αφού προηγουμένως αυτά κοβόταν σε φέτες και όχι ολόκληρα, η ξήρανσή τους επιτυγχάνετο ταχύτερα. Μεταξύ των δύο εξετασθέντων ξηραντηρίων, το ξηραντήριο άμεσου τύπου είναι απλούστερο και πιο οικονομικό στη κατασκευή από αυτό του έμμεσου τύπου. Ταυτόχρονα η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ θαλάμου ξήρανσης και περιβάλλοντος ήταν μεγαλύτερη στο ξηραντήριο άμεσου τύπου. Βέβαια τα προαναφερθέντα πειράματα έγιναν σε ημέρες με ικανοποιητική ηλιοφάνεια στα Χανιά. Όσον αφορά το ποσοστό μείωσης της υγρασίας στα φρούτα και λαχανικά, στο ξηραντήριο άμεσου τύπου, αυτό κυμαίνεται μεταξύ 98,55% για τη ντομάτα και 37,93% για το βερύκοκο (για χρόνο ξήρανσης 5 ωρών).

Για το ξηραντήριο έμμεσου τύπου, η εκατοστιαία απώλεια βάρους για το λεμόνι ήταν 71,68%, για την πατάτα 48,28% και για τη ντομάτα 40,87% (για τον ίδιο χρόνο ξήρανσης των 5 ωρών).

Συγκρίνοντας τα δύο αυτά ξηραντήρια, η δυνατότητα ξήρανσης προϊόντων στο ξηραντήριο άμεσου τύπου ήταν καλύτερη, όσον αφορά τις επιτυγχανόμενες θερμοκρασίες και τον επιτυγχανόμενο βαθμό ξήρανσης σε ορισμένο χρονικό διάστημα. Βέβαια, οι μέγιστες επιτυγχανόμενες θερμοκρασίες στο θάλαμο ξήρανσης στο ξηραντήριο έμμεσου τύπου ήταν χαμηλότερες από εκείνες του άμεσου τύπου, που το κάνει καταλληλότερο για ξήρανση προϊόντων ευαίσθητων σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες ικανοποιητικής ηλιοφάνειας και δεν διερευνήθηκε η συμπεριφορά των ξηραντηρίων σε συνθήκες χαμηλότερης ηλιοφάνειας. Τα προαναφερθέντα ξηραντήρια είναι παθητικού τύπου, χαμηλού κόστους και προσφέρουν προστασία για την ξήρανση φρούτων και λαχανικών από πουλιά, έντομα, σκόνη κ.τ.λ., έναντι της ηλιακής ξήρανσης τους σε ανοικτό χώρο με την απευθείας επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η μέγιστη θερμοκρασία που επετεύχθη εντός του ξηραντηρίου άμεσου τύπου (τους μήνες Μάιο και Ιούλιο στα Χανιά) ήταν περίπου 65°C, ενώ πολύ ικανοποιητική ξήρανση επιτυγχάνετο και για θερμοκρασία 57°C (ντομάτα).

Για το ξηραντήριο έμμεσου τύπου η μέγιστη θερμοκρασία που επετεύχθη ήταν περίπου 54 °C, ενώ ικανοποιητική ξήρανση ορισμένων προϊόντων (λεμόνι) επετεύχθη και σε χαμηλότερη θερμοκρασία 45 °C.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. V. K. Sharma, A. Colangelo, G. Spagna “Experimental investigation of different solar dryers suitable for fruit and vegetable drying”, Renewable Energy, Vol. 6, No4, p.413-424,1995.
2. M. S. Sodha, R. Chandra “ Solar drying systems and their testing procedures : A review”, Energy conversion and management, Vol. 35, No3, p. 219-267, 1994.
3. H. H. Chen, C. E. Hernandez, T. C. Huang, “ A study of the drying effect on lemon slices using a closed – type solar dryer”, Solar energy, 78, p. 97-103,2005.
4. M. A. Karim, M.N.A Hawlader, “ Development of solar air collectors for drying applications”, Energy conversion and management, 45, p. 329-344,2004.
5. O.V. Ekechukwu, B. Norton , “ Review of solar energy drying systems III, An overview of solar drying technology”, Energy conversion and management, 40, p.615-655,1999.
6. O.V Ekechukwu, B. Norton, “ Review of solar energy drying systems III, Low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications”, Energy conversion and management, 40, p.657-667, 1999.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ/ΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΞΗΡΑΝΣΗ ΜΕ ΣΥΝΑΓΩΓΗ ΠΟΡΩΔΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΗΛΙΑΚΟ ΞΗΡΑΝΤΗΡΙΟ

Χρ. Λαμνάτου¹, Η. Παπανικολάου¹, Β. Μπελεσιώτης¹ και Ν. Κυριάκης²

¹ Εργαστήριο Ηλιακών & άλλων Ενεργειακών Συστημάτων (ΕΗ-ΕΣ),
ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», 15310 Αγία Παρασκευή Αττικής

² Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική
Σχολή Α.Π.Θ., Τ.Κ. 54124, Τ.Θ. 487, Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

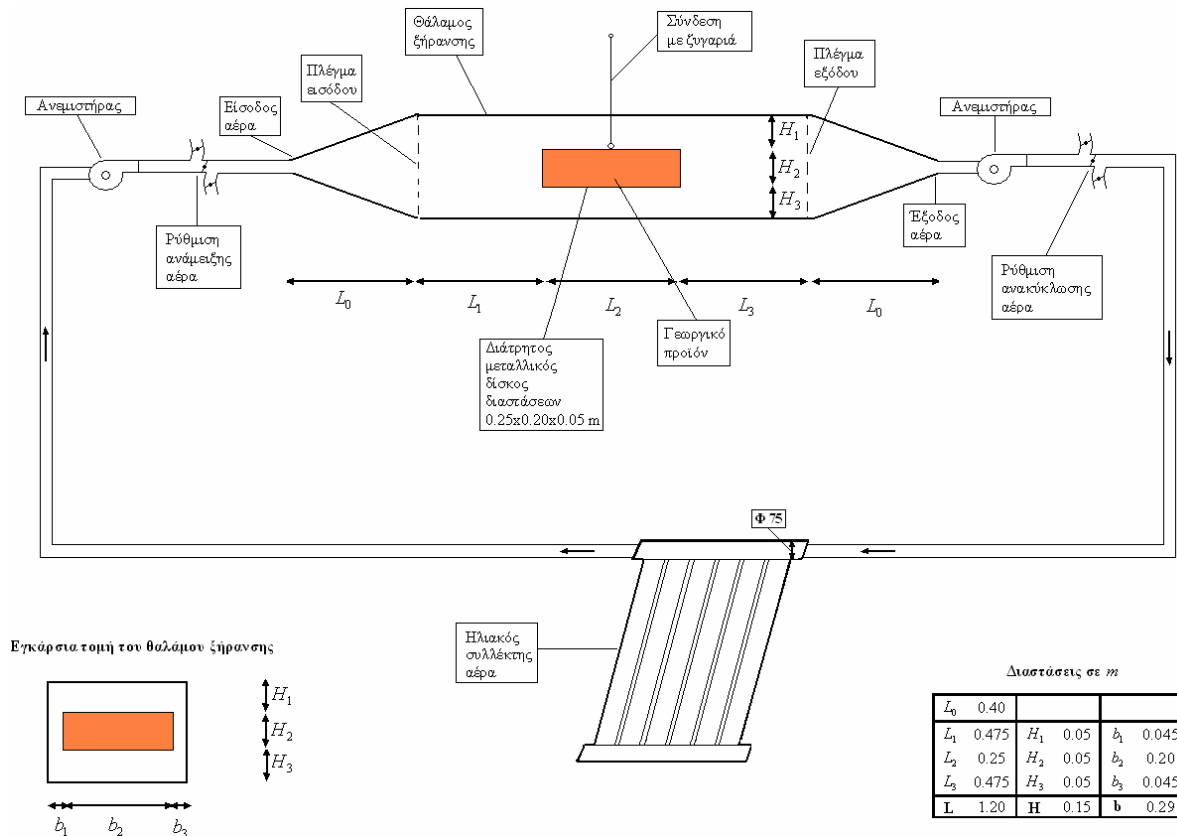
Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα μιας διαδικασίας αριθμητικής προσομοίωσης των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας/μάζας κατά τη Ξήρανση με Συναγωγή (Convective Drying) πορωδών σωμάτων. Το μοντέλο είναι τύπου Luikov και εφαρμόζεται τόσο σε κλίμακα μεμονωμένου δείγματος προϊόντος όσο και σε επίπεδο θαλάμου ξήρανσης, με παράλληλη ροή του θερμού αέρα πάνω από πλάκες ορθογωνικής μορφής που αντιπροσωπεύουν το προς ξήρανση προϊόν. Αναπτύσσεται μια γενική προσέγγιση που επιτρέπει επιλογή μεταξύ μοντελοποίησης των φαινομένων είτε μόνο στο στερεό είτε στο στερεό και στη ροή του αέρα. Στη δεύτερη περίπτωση, η επίλυση ροής, μεταφοράς θερμότητας/μάζας μεταξύ στερεού/ρευστού είναι συζευγμένη (Conjugate), ενώ και στις δύο περιπτώσεις γίνεται και συνυπολογισμός της αλλαγής φάσης (εξάτμιση). Για την επίλυση χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων. Η πιστοποίηση (Validation) του μοντέλου βασίζεται σε πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα άλλων ερευνητών και παρουσιάζονται αποτελέσματα από προσομοίωση που έγινε στα πλαίσια της ενεργειακής βελτιστοποίησης πειραματικού Ηλιακού Ξηραντηρίου του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος».

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ξήρανση αποτελεί μία διεργασία με ιδιαίτερο ενδιαφέρον π.χ. σε γεωργικά προϊόντα, οικοδομικά υλικά. Μπορεί να πραγματοποιηθεί με απευθείας έκθεση των προϊόντων στον ήλιο ή μηχανικά (σε ξηραντήρια) με βασικό πλεονέκτημα στη δεύτερη περίπτωση τη βιολογική σταθερότητα του τελικού προϊόντος. Οι πηγές ενέργειας για τη λειτουργία ενός ξηραντηρίου μπορεί να είναι συμβατικές ή ανανεώσιμες. Όταν η ξήρανση πραγματοποιείται με διοχέτευση θερμού αέρα μέσα από ή παράλληλα προς τη μάζα του προϊόντος, τότε πρόκειται για Ξήρανση με Συναγωγή η οποία χαρακτηρίζεται από τα φαινόμενα ροής και μεταφοράς θερμότητας/μάζας μεταξύ προϊόντος και αέρα. Η μελέτη αυτών των φαινομένων είναι πολύπλοκη και η μαθηματική τους μοντελοποίηση και αριθμητική προσομοίωση με χρήση κατάλληλων μοντέλων ξήρανσης που έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες μπορεί να αποδειχθεί πολύτιμη. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των σχετικών προσομοιώσεων μπορεί στη συνέχεια να οδηγήσει στην ενεργειακή βελτιστοποίηση του ξηραντηρίου με ταυτόχρονη μείωση του κόστους και του χρόνου που απαιτεί η διεξαγωγή πειραμάτων [1-3].

Αντικειμενικός στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι η βελτιστοποίηση σχεδιασμού ενός πειραματικού ηλιακού ξηραντηρίου, του Εργαστηρίου Ηλιακών του ΕΚΕΦΕ «Δ» (Σχ. 1), μέσω της πρόβλεψης των παραμέτρων ξήρανσης κατά τη λειτουργία του ξηραντηρίου. Στα

πλαίσια της προσπάθειας αυτής γίνεται ανάπτυξη ενός μοντέλου ξήρανσης που επιτρέπει επιλογή μεταξύ προσομοίωσης των φαινομένων είτε μόνο στο στερεό, με την επίδραση του αέρα να λαμβάνεται υπόψη μέσω κατάλληλων συντελεστών μεταφοράς στις οριακές επιφάνειες, είτε θεωρώντας ως πεδίο προσομοίωσης εκτός από το στερεό και τη ροή του αέρα. Στη δεύτερη περίπτωση, η επίλυση ροής, μεταφοράς θερμότητας/μάζας μεταξύ στερεού/ρευστού είναι συζευγμένη (Conjugate), ενώ και στις δύο περιπτώσεις γίνεται και συνυπολογισμός της αλλαγής φάσης (εξάτμιση).



Σχήμα 1. Πειραματικό Ηλιακό Ξηραντήριο του εργαστηρίου Ηλιακών του ΕΚΕΦΕ «Δ».

2. ΜΟΝΤΕΛΟ ΞΗΡΑΝΣΗΣ / ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Γενικά χαρακτηριστικά μοντέλου – Παραδοχές

Για την αριθμητική προσομοίωση χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων [4]. Οι δισδιάστατες (2Δ), μεταβαλλόμενες χρονικά εξισώσεις Navier-Stokes, ως προς τη ροϊκή συνάρτηση και τη στροβιλότητα (Ψ/Ω), μαζί με τις εξισώσεις συνέχειας, θερμοκρασίας θ και συγκέντρωσης C , σε αδιάστατη μορφή, επιλύονται για το πεδίο ροής και γίνεται σύζευξη αυτών με τις εξισώσεις θερμοκρασίας θ και περιεκτικότητας υγρασίας w^* για το στερεό [5]. Οι παραδοχές που γίνονται είναι: 1) ροή 2Δ/ασυμπίεστη, 2) προφίλ ταχύτητας εισόδου ομοιόμορφο, 3) δείγμα ομογενές, 4) η βαρύτητα μέσα στο στερεό αγνοείται (οι δυνάμεις των τριχοειδών θεωρούνται πολύ ισχυρότερες από τη βαρύτητα), όπως και οι βαθμίδες πίεσης, 5) δεν λαμβάνονται υπόψη συρρίκνωση/παραμόρφωση του στερεού κατά τη ξήρανση, 6) αγνοείται οποιαδήποτε παραγωγή θερμότητας μέσα στο σώμα εκτός από εκείνη λόγω αλλαγής φάσης, 7) αγνοείται η φυσική συναγωγή.

2.2. Μαθηματική διαμόρφωση του μοντέλου

Η εξίσωση για τη ροϊκή συνάρτηση Ψ είναι της μορφής Poisson: $\nabla^2 \Psi = -\Omega$, ενώ για τις υπόλοιπες αδιάστατες μεταβλητές (στροβιλότητα Ω , θερμοκρασία θ , συγκέντρωση υγρασίας

στον αέρα C και περιεκτικότητα υγρασίας στο στερεό w^*) η εξίσωση μεταφοράς έχει τη γενική μορφή:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} + \frac{\partial (U\phi)}{\partial X} + \frac{\partial (V\phi)}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial Y} \right) + S_\phi \quad (1)$$

όπου τ : χρόνος, U, V : συνιστώσες της ταχύτητας κατά τους άξονες X και Y – οριζόντια και κατακόρυφα αντίστοιχα. Στον Πίνακα 1 ορίζονται οι συντελεστές διάχυσης Γ_ϕ και οι όροι πηγής S_ϕ για κάθε μεταβλητή ϕ , όπου εμφανίζονται και οι αδιάστατοι αριθμοί Reynolds ($Re = U_i H_s / \nu$), Prandtl ($Pr = \nu / \alpha$), Lewis ($Le = \alpha / D$) ενώ R_{df} είναι ο λόγος θερμικών διαχυτοτήτων στερεού προς ρευστού. Οι συντελεστές K_1 - K_4 δίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 1. Συντελεστές όρων για κάθε μεταβλητή που διέπεται από την εξίσωση (1).

ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Ω	$1 / Re$	0
θ (ρευστό)	$1 / (Re Pr)$	0
C	$1 / (Re Pr Le)$	0
θ (στερεό χωρίς επίλυση EP)	1	$\nabla^2 (K_1 - \Gamma_\phi) \theta + \nabla^2 (K_2 w^*)$
θ (στερεό με επίλυση EP)	$R_{df} / (Re Pr)$	$\nabla^2 (K_1 - \Gamma_\phi) \theta + \nabla^2 (K_2 w^*)$
w^* (χωρίς επίλυση EP)	K_3	$\nabla^2 (K_4 \theta)$
w^* (με επίλυση EP)	K_3	$\nabla^2 (K_4 \theta)$

Οι εξισώσεις των οριακών συνθηκών διαφοροποιούνται ανάλογα με το εάν γίνεται ή όχι επίλυση της εξωτερικής ροής (EP). Στη δεύτερη περίπτωση, στη διεπιφάνεια στερεού-ρευστού (Δ-Ε Σ/Ρ) πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες: $\theta_{fluid} = \theta_{solid}$, $C_{fluid} = C(\theta, w^*)_{solid}$ και οι εξισώσεις συνέχειας των ροών θερμότητας/μάζας, αντίστοιχα:

$$K_1 \nabla \theta + K_2 \nabla w^* = K_6 \nabla \theta + (K_0 K_5) \nabla C, \quad K_3 \nabla w^* + K_4 \nabla \theta = K_5 \nabla C \quad (2)$$

Πίνακας 2. Συντελεστές που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις¹.

	Χωρίς επίλυση EP	Με επίλυση EP		Χωρίς επίλυση EP	Με επίλυση EP
K_1	$1 + LuKoPnD_T^*$	$\frac{R_{df}}{Re Pr} (1 + LuKoPnD_T^*)$	K_4	$LuPn$	$\frac{R_{df}}{Re Pr} LuPn$
K_2	$LuKoD_M^*$	$\frac{R_{df}}{Re Pr} (LuKoD_M^*)$	K_5	-	$B \cdot \frac{1}{Le} \cdot \frac{1}{Re Pr}$
K_3	Lu	$\frac{R_{df}}{Re Pr} Lu$	K_6	-	$\frac{1}{R_{cp}} \cdot \frac{1}{Re Pr}$

¹ οι λόγοι των συντελεστών διάχυσης στο στερεό $D_T^* = D_{Tv}/D_T$, $D_M^* = D_{mv}/D_m$ (αέρια φάση/ολική τιμή) αντικαθίστανται από έναν συντελεστή αλλαγής φάσης ε [5], όταν οι τιμές τους δεν είναι διαθέσιμες

Στη Δ-Ε Σ/Ρ και στα τοιχώματα ισχύει η συνθήκη μη ολίσθησης ενώ η εξίσωση θερμοδυναμικής ισορροπίας για τη Δ-Ε που εφαρμόζεται είναι από την εργασία [1]. Οι συντελεστές K_5, K_6 δίνονται επίσης στον Πίνακα 2, όπου εμφανίζεται μια επιπλέον σειρά αδιάστατων αριθμών που χαρακτηρίζουν τη ξήρανση, όπως οι Luikov (Lu), Kossovitch (Ko),

Posnov (Pn) καθώς και οι συντελεστές διάχυσης D_T^* , D_M^* , που όλοι ορίζονται σύμφωνα με τον Luikou [5]. Επιπλέον, R_{cp} είναι ο λόγος της θερμοχωρητικότητας στερεού προς ρευστό, ενώ $B = \Delta c / (\rho \Delta W)$, μια παράμετρος σύζευξης που εξαρτάται από τις κλίμακες αδιαστατοποίησης των c και W (Δc και ΔW , αντίστοιχα) και από την πυκνότητα του αέρα ρ .

2.3. Αριθμητικές μέθοδοι

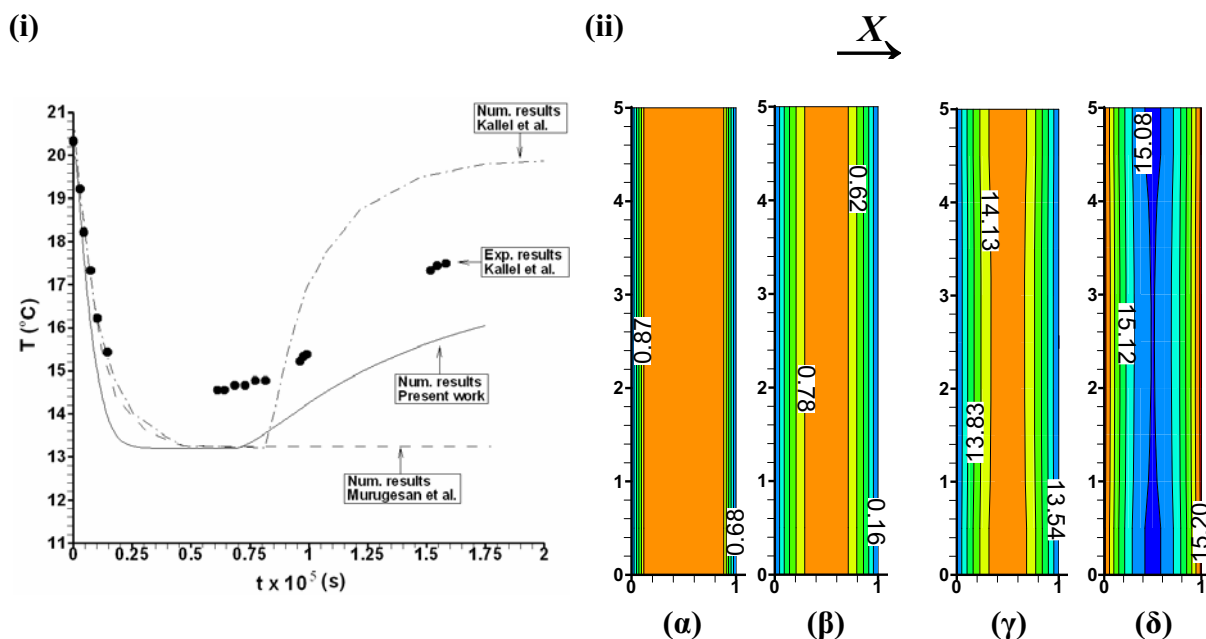
Για την αριθμητική επίλυση χρησιμοποιήθηκαν η μέθοδος *SOR* για την εξίσωση Ψ και η *ADI* για τις χρονικά μεταβαλλόμενες εξισώσεις [6]. Στην περίπτωση που δεν επιλύεται η EP, η επίδραση του αέρα λαμβάνεται υπόψη μέσω συντελεστών μεταφοράς (από τη βιβλιογραφία) στις οριακές επιφάνειες (δεξιό μέλος εξισώσεων (2)) ενώ όταν η EP επιλύεται, οι εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας/μάζας μεταξύ στερεού/ρευστού είναι συζευγμένες (Conjugate). Στη δεύτερη περίπτωση, η εύρεση του C της Δ-E γίνεται μέσω της εξίσωσης θερμοδυναμικής ισορροπίας και όπου η σχετική υγρασία της Δ-E προσδιορίζεται μέσω της καμπύλης ρόφησης του στερεού αφού έχει προσδιοριστεί η τρέχουσα τιμή του w^* . Οι διακριτοποιημένες εξισώσεις της σύζευξης ολοκληρωμένες επί των όγκων ελέγχου της Δ-E, προκύπτουν με βάση τη μέθοδο των Papanicolaou και Jaluria [7]. Έτσι τα θ , w^* , C της Δ-E υπολογίζονται ως μέρος της συζευγμένης επίλυσης και αποφεύγονται οι συχνά εφαρμοζόμενες ισοθερμοκρασιακές και ισοϋγρασιακές υποθέσεις στη Δ-E για την επίλυση στο στερεό.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

3.1. Προβλήματα χωρίς επίλυση εξωτερικής ροής

3.1.1. Ξήρανση πλάκας οικοδομικού υλικού (τούβλο)

Τα δεδομένα για το πρόβλημα προέρχονται από την εργασία των Kallel et al. [8] για πλάκα πάχους 10 cm και για την περίπτωση συμμετρικών συνθηκών περιβάλλοντος με $h_c = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $h_m = 0.015 \text{ m/s}$, μεταβλητή θερμοχωρητικότητα και σταθερές τις υπόλοιπες θερμοφυσικές ιδιότητες του στερεού. Το πρόβλημα επιλύθηκε ως δισδιάστατο με ομοιόμορφο πλέγμα 9×11 .



Σχήμα 2. i) χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στις εξωτερικές επιφάνειες ($X = 0, 1$) της πλάκας τούβλου, σύγκριση με [8-9], ii) ισο-υγρασιακές (α, β) σε αδιάστατες τιμές και ισο-θερμοκρασιακές (γ, δ) σε °C γραμμές στις 4 (α, γ) και 36 (β, δ) hrs ξήρανσης.

Στο Σχ. 2(i) παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στις εξωτερικές επιφάνειες της πλάκας και συγκρίνεται με πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα άλλων ερευνητών [8-9]. Φαίνεται ότι αρχικά η θερμοκρασία της πλάκας πέφτει στους 13.2°C (θερμοκρασία υγρού βολβού) λόγω εξάτμισης. Καθώς η ώρα περνά, ο ρυθμός εξάτμισης μειώνεται, η θερμοκρασία του στερεού γίνεται ομοιόμορφη, παραμένει σταθερή για κάποιο χρόνο και τελικά η πλάκα ξεκινά να θερμαίνεται λόγω συναγωγής από το περιβάλλον. Στη φάση αυτή της ψύξης και θέρμανσης του σώματος υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των εργασιών [8-9], ωστόσο το μοντέλο της παρούσας εργασίας ακολουθεί πιο πιστά αυτή τη διακύμανση της θερμοκρασίας του σώματος, προσεγγίζοντας καλύτερα τα αποτελέσματα των μετρήσεων των Kallel et al. [8]. Στο Σχ. 2(ii) απεικονίζονται οι ισο-υγρασιακές (α, β) και οι ισο-θερμοκρασιακές (γ, δ) γραμμές στις 4 (α, γ) και στις 36 (β, δ) hrs. Από το Σχ. 2(ii) επιβεβαιώνεται η συμμετρική χωρική κατανομή της υγρασίας και της θερμοκρασίας της πλάκας λόγω της συμμετρίας του προβλήματος. Το Σχ. 2(ii), αποτυπώνει επίσης το φαινόμενο το οποίο παρατηρείται και στο Σχ. 2(i). Αρχικά, η μείωση της θερμοκρασίας είναι εντονότερη στις επιφάνειες καθώς η εξάτμιση λαμβάνει χώρα εκεί κυρίως, ενώ η θερμοκρασία στο εσωτερικό της πλάκας παραμένει σε σχετικά υψηλές τιμές. Καθώς η ώρα περνά, ο ρυθμός εξάτμισης στην επιφάνεια μειώνεται και η συναγωγή αυξάνεται από το ρευστό προς τις επιφάνειες του στερεού με αποτέλεσμα αυτές να εμφανίζονται θερμότερες από το εσωτερικό.

3.1.2. Ξήρανση δειγμάτων γεωργικών προϊόντων (μήλου, μπανάνας)

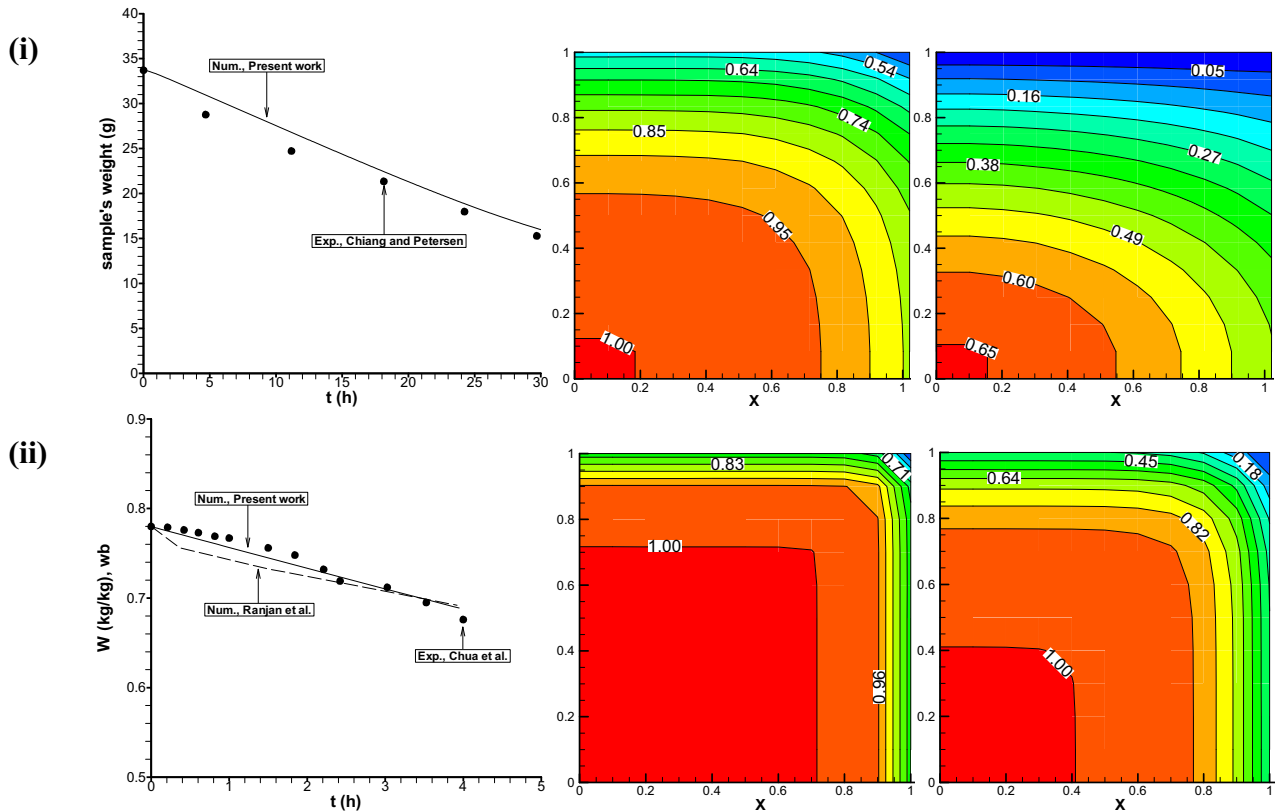
Οι υπολογισμοί έγιναν με δεδομένα: 1) από τις μελέτες [3, 10-12] για ξήρανση δείγματος μήλου (*Malus domestica*, Rosaceae, cultivar 'Jonagold') 0.02×0.02 m, με $h_c=15$ W/m²K, $h_m=0.001$ m/s, μεταβλητή θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα για το στερεό [13], μεταβλητά Lu , Ko , Bi_q^2 , 2) από τα άρθρα [14-15] για ξήρανση δείγματος μπανάνας (*Musa* sp., Musaceae, cultivar 'Cavendish') 0.03×0.03 m, με $h_c=90$ W/m²K, $h_m=0.028$ m/s και σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες. Το δισδιάστατο πεδίο προσομοίωσης και στις δύο περιπτώσεις είναι το ¼ του δείγματος και χρησιμοποιήθηκαν ομοιόμορφα πλέγματα 11×13 και 11×11.

Στο Σχ. 3(i) αριστερά απεικονίζονται η ολική απώλεια βάρους του δείγματος μήλου, σε συνάρτηση με το χρόνο, συγκρίνεται με τα αποτελέσματα της εργασίας [11] και παρατηρείται καλή συμφωνία ενώ δεξιά απεικονίζονται οι ισο-υγρασιακές γραμμές για το ¼ του δείγματος, μετά από 5 και 30 hrs ξήρανσης. Στο Σχ. 3(ii) παρουσιάζονται αριστερά η καμπύλη ξήρανσης του δείγματος μπανάνας, συγκρίνεται με πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα άλλων μελετών [14-15] και παρατηρείται αρκετά καλή συμφωνία ενώ δεξιά παρουσιάζονται οι ισο-υγρασιακές γραμμές για το ¼ δείγματος, στις 0.67 και 4 hrs. Και στις δύο περιπτώσεις οι ισο-υγρασιακές γραμμές είναι συμμετρικές ως προς τον κεντρικό άξονα του δείγματος γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη συμμετρικών συνθηκών και στα δύο προβλήματα ξήρανσης.

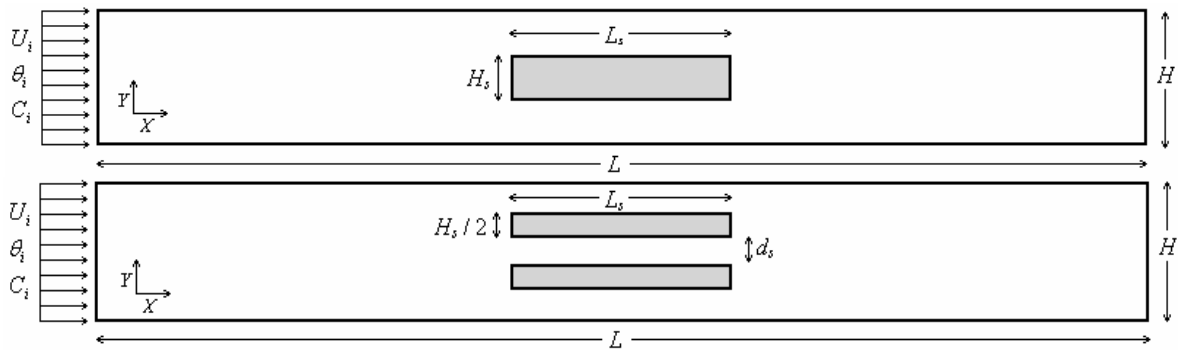
3.2. Προβλήματα με επίλυση εξωτερικής ροής

Στην κατηγορία αυτή έγινε αρχικά επίλυση προβλημάτων με βάση τις εργασίες των Oliveira and Haghighi [1] και Murugesan et al. [2] για ξήρανση ξύλου και τούβλου με σκοπό την πιστοποίηση του κώδικα. Στη συνέχεια, στα πλαίσια της διαδικασίας ενεργειακής βελτιστοποίησης του ξηραντηρίου του Σχ. 1, έγινε μελέτη δύο νέων, πρωτότυπων προβλημάτων ξήρανσης που διέφεραν μεταξύ τους ως προς την τοποθέτηση της ίδιας ποσότητας προϊόντος στο θάλαμο (διαστάσεων 1.20×0.15 m): 1) υπό μορφή ενός ορθογωνικού σώματος πάχους H_s , 2) υπό μορφή δύο όμοιων σωμάτων, πάχους $H_s/2$ (Σχ. 4).

² Στις οριακές συνθήκες εδώ εμφανίζονται οι αριθμοί Biot, $Bi_q = (h_c L) / k_{solid}$, $Bi_m = (h_m L) / D_m$, για τη θερμοκρασία και τη μάζα αντίστοιχα.



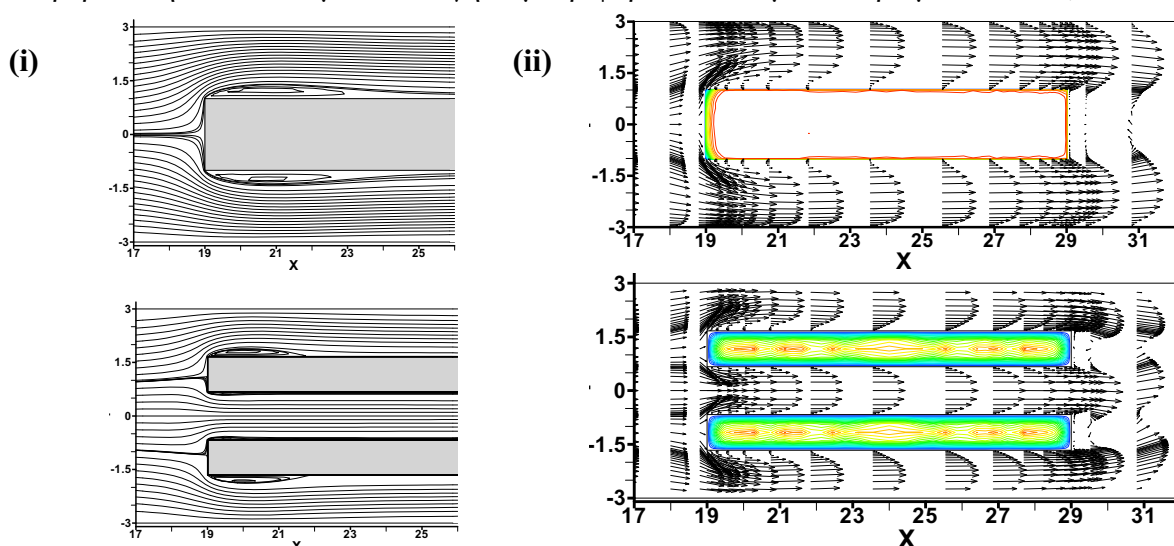
Σχήμα 3. i) χρονική μεταβολή βάρους δείγματος μήλου (αριστερά), σύγκριση με [11], ισο-υγρασιακές γραμμές (δεξιά) στις 5 και 30 hrs, ii) καμπύλη ξήρανσης δείγματος μπανάνας, σύγκριση με [14-15] (αριστερά), ισο-υγρασιακές γραμμές (δεξιά), στις 0.67 και 4 hrs.



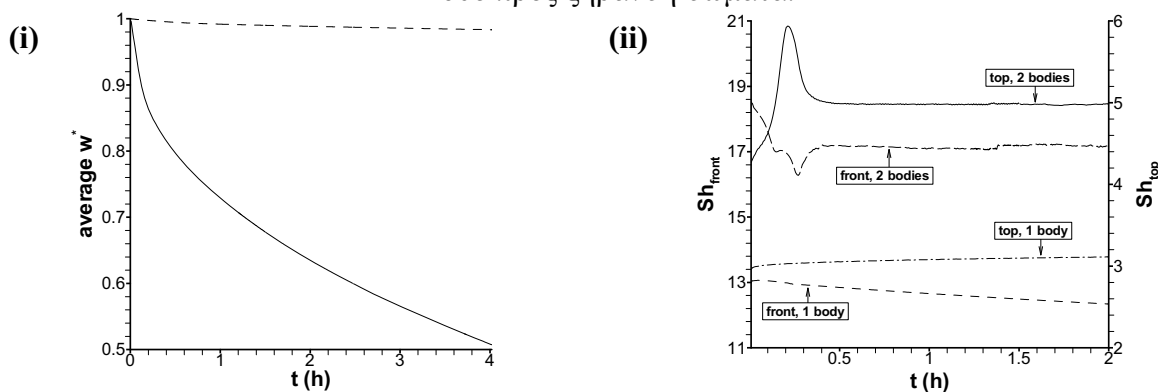
Σχήμα 4. Ο θάλαμος ξήρανσης με ένα (περίπτωση 1, επάνω) και με δύο (περίπτωση 2, κάτω) προς ξήρανση σώματα ορθογωνικής μορφής.

Στη 2^η εκδοχή ο όγκος των δύο σωμάτων ισούται με τον όγκο του σώματος της 1^{ης}. Προσομοιώσεις έγιναν για ξήρανση μήλου [3, 10-12] για 4 hrs, με $Re=463$ και πλέγματα μη ομοιόμορφα 183×61 , 183×63 για την περίπτωση 1 και 2, αντίστοιχα. Στην 1^η περίπτωση λαμβάνονται $H_s=5$ cm, $L_s=0.25$ m για τις διαστάσεις του σώματος ενώ στη 2^η περίπτωση το πάχος είναι $H_s/2=2.5$ cm και η απόσταση των σωμάτων είναι $d_s=0.033$ m. Ως προς τις αρχικές συνθήκες ισχύουν για το ρευστό: $U_o=1$, $\theta_o=1$, $C=0.0078$ (για $\varphi=9\%$ και θερμοκρασία 50°C) και για το στερεό: $\theta_o=0$, $w^*=1$. Στο Σχ. 5(i) φαίνονται τα πεδία ροής για τις δύο περιπτώσεις. Παρατηρείται αποκόλληση της ροής στη μετωπική επιφάνεια των σωμάτων, με τις φουσαλίδες στην 1^η περίπτωση να επεκτείνονται σε μεγαλύτερο μήκος σώματος από ότι στην 2^η, γεγονός που οφείλεται στην μικρότερη τάση προς αποκόλληση στην περίπτωση 2. Στο Σχ. 5(ii) γίνεται φανερή η μεγαλύτερη διείσδυση του μετώπου ξήρανσης στα σώματα στη

2^η περίπτωση ενώ το Σχ. 6(i) παριστάνει τις καμπύλες ξήρανσης για τις δύο περιπτώσεις και δείχνει μια θεαματική διαφορά μεταξύ τους. Κατά συνέπεια, συμπεραίνεται ότι η μείωση του πάχους του αρχικού σώματος οδηγεί σε μείωση του μήκους των περιοχών ανακυκλοφορίας του ρευστού και σε αύξηση των συντελεστών μεταφοράς μεταξύ στερεού/αέρα ξήρανσης, άρα σε γρηγορότερη και πιο ομοιόμορφη ξήρανση του προϊόντος. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το Σχ. 6(ii) που δείχνει τη μεταβολή του μέσου αριθμού Sherwood Sh ($Sh=(h_m L)/D_m$) στη μετωπική (front) και στην επάνω (top) επιφάνεια των σωμάτων και όπου γίνεται φανερή η ύπαρξη μεγαλύτερων τιμών των συντελεστών μεταφοράς για την περίπτωση 2, κάτι που επιβεβαιώθηκε και από μια ανάλογη συμπεριφορά και του μέσου αριθμού Nusselt, Nu .



Σχήμα 5. i) γραμμές ροής και ii) ισο-υγρασιακές γραμμές, για τις περιπτώσεις με ένα και με δύο προς ξήρανση σώματα.



Σχήμα 6. i) καμπύλες ξήρανσης για την περίπτωση με ένα (διακεκομμένη γραμμή) και με δύο (συνεχής γραμμή) προς ξήρανση σώματα, ii) χρονική μεταβολή του μέσου Sh , για τις περιπτώσεις με ένα και με δύο προς ξήρανση σώματα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη συγκεκριμένη μελέτη, έγινε αριθμητική προσομοίωση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας/μάζας κατά τη ξήρανση ενός πορώδους σώματος με συναγωγή, με βάση το μοντέλο Luϊκον, με συζευγμένη προσέγγιση και με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων όγκων. Τα αποτελέσματα παρουσίασαν ρεαλιστική φυσική συμπεριφορά για μια σειρά υλικών κατά τη σύγκρισή τους με σχετικά αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία. Επίσης, παρουσιάστηκαν ενδεικτικά, πρωτότυπα αποτελέσματα της προσομοίωσης των φαινομένων ροής, μεταφοράς θερμότητας/μάζας, που έγινε στα πλαίσια της ενεργειακής βελτιστοποίησης πειραματικού Ηλιακού Ξηραντηρίου του ΕΚΕΦΕ «Δ» για δύο περιπτώσεις τοποθέτησης του

προς ξήρανση προϊόντος μέσα στο θάλαμο. Διαπιστώθηκε ότι ο τρόπος τοποθέτησης των σωμάτων μέσα στο θάλαμο επηρεάζει καθοριστικά την ανάπτυξη της ροής, τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας/μάζας και κατά συνέπεια την ποιότητα ξήρανσης των προϊόντων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς εκφράζουν τις ευχαριστίες τους για την οικονομική υποστήριξη από την Ευρωπαϊκή Ένωση και από το Υπουργείο Ανάπτυξης της Ελλάδας μέσω του προγράμματος «Ανταγωνιστικότητα» (Πρόγραμμα Ενίσχυσης Ερευνητικού Δυναμικού, ΠΕΝΕΔ 2003, αριθ. 03 ΕΔ303). Επίσης, η πρώτη συγγραφέας κ. Χρυσοβαλάντου Λαμνάτου θα ήθελε να ευχαριστήσει το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) για την Τιμητική - PhD Υποτροφία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. L. S. Oliveira and K. Haghighi (1998), Conjugate heat and mass transfer in convective drying of porous media, *Num. Heat Transfer, Part A*, 34 (2), 105-117.
2. K. Murugesan, H. N. Suresh, K. N. Seetharamu, P. A. Aswatha Narayana and T. Sundararajan (2001), A theoretical model of brick drying as a conjugate problem, *Int. J. Heat Mass Transfer* 44, 4075-4086.
3. A. Kaya, O. Aydin and I. Dincer (2006), Numerical modeling of heat and mass transfer during forced convection drying of rectangular moist objects, *Int. J. Heat Mass Transfer* 49, 3094-3103.
4. S. V. Patankar (1980), *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill Book Company, USA.
5. A. V. Luikov (1964), Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Media, in *Advances in Heat Transfer*, T. Irvine and J. Hartnett (Eds), vol. 1, Academic Press, New York.
6. Y. Jaluria and K. E. Torrance (1986), *Computational Heat Transfer*, McGraw-Hill Book Company, USA.
7. E. Papanicolaou and Y. Jaluria (1993), Mixed Convection from a localized heat source in a cavity with conducting walls: A numerical study, *Num. Heat Transfer, Part A*, 23 (4), 463-484.
8. F. Kallel, N. Galanis, B. Perrin and R. Javelas (1993), Effects of Moisture on Temperature During Drying of Consolidated Porous Materials, *J. Heat Transfer* 115 (3), 724-733.
9. K. Murugesan, K. N. Seetharamu and P. A. Aswatha Narayana (1996), A one dimensional analysis of convective drying of porous materials, *Heat and Mass Transfer* 32, 81-88.
10. A. Kaya, O. Aydin and I. Dincer (2008), Heat and mass transfer modeling of recirculating flows during air drying of moist objects for various dryer configurations, *Num. Heat Transfer, Part A* 53, 18-34.
11. W. - C. Chiang and J. N. Petersen (1987), Experimental measurement of temperature and moisture profiles during apple drying, *Drying Technol.* 5(1), 25-49.
12. D. Velic, M. Planinic, S. Tomas and M. Bilic (2004), Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying, *J. Food Engineering* 64, 97-102.
13. M. M. Hussain and I. Dincer (2003), Numerical simulation of two-dimensional heat and moisture transfer during drying of a rectangular object, *Num. Heat Transfer, Part A*, 43, 867-878.
14. R. Ranjan, J. Irudayaraj, J. N. Reddy and A. S. Mujumdar (2004), Finite-Element Simulation and Validation of Stepwise Drying of bananas, *Num. Heat Transfer, Part A*, 45, 997-1012.
15. K. J. Chua, A. S. Mujumdar, M. N. A. Hawlader, S. K. Chou and Ho (2001), Batch drying of banana pieces - effect of stepwise change in drying air temperature on drying kinetics and product colour, *Food Research International* 34, 721-731.

ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΗΛΙΑΚΟ ΠΥΡΓΟ ΣΤΗ ΓΕΡΜΑΝΙΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ

Σπύρος Χ. Αλεξόπουλος, Μπέρνχαρντ Χόφσμιντ

Solar-Institut Jülich (SIJ), FH Aachen, Aachen University of Applied Sciences
Heinrich-Mußmann-Str. 5, D-52428 Jülich, e-mail: alexopoulos@sij.fh-aachen.de

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλιοθερμικά εργοστάσια, όπως οι ηλιακοί πύργοι, ήδη από την δεκαετία του 80 είναι ένας τρόπος, ώστε να αναπληρωθεί μακροπρόθεσμα η χρήση συμβατικών μορφών ενέργειας. Με την συγκέντρωση της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ηλιοστατών σε έναν αποδέκτη θερμότητας επιτυγχάνονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες στον μεταφορέα θερμότητας. Η θερμότητα αυτή μετατρέπεται σε έναν θερμικό κύκλο σε μηχανική ενέργεια και στη συνέχεια με γεννήτρια σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η χρήση αέρος ως μεταφορέως θερμότητας καθώς και κεραμικών δομών ως αποδεκτών της συγκεντρωτικής ηλιακής ακτινοβολίας επιτυγχάνει υψηλούς συντελεστές απόδοσης και ταχύτερα υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας της ενεργειακής εγκατάστασης.

Στη Γερμανία άρχισε να κατασκευάζεται ο πρώτος σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακό πύργο ισχύος 1,5 MW. Στα τέλη του 2008 αναμένεται η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στο δίκτυο, το οποίο θα τροφοδοτεί με ηλεκτρικό ρεύμα 350 γερμανικά νοικοκυριά. Ειδικά στην Ελλάδα και στην Κύπρο, με ένα αξιόλογο ηλιακό δυναμικό είναι επιτακτική ανάγκη η ανάπτυξη και αυτής της ανταγωνιστικής ηλιακής τεχνολογίας, η οποία ήδη σε άλλα κράτη της Μεσογείου αποτελεί πρώτη προτεραιότητα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην εποχή μας εξαιτίας της αύξησης των επιπτώσεων του φαινομένου του θερμοκηπίου στον άνθρωπο και το περιβάλλον και της αύξησης της ζήτησης ενέργειας γίνεται όλο και επιτακτικότερη η ανάγκη ανάπτυξης των Α.Π.Ε. Σε αυτές ανήκει και η ηλιοθερμία. Ως προς την ηλιοθερμική ενέργεια η Ελλάδα ήταν πρωτοπόρος χώρα στην Ευρώπη τις τελευταίες δεκαετίες με περίπου ένα εκατομμύριο εγκατεστημένους ηλιακούς θερμοσίφωνες, που συμβάλουν σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας και στην προστασία του περιβάλλοντος, αξιοποιώντας το ανεξάντλητο ηλιακό δυναμικό. Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα για παραγωγή ζεστού νερού έχουν ευρεία εμπορική εφαρμογή και στην Κύπρο, καθώς 92 % των νοικοκυριών και 53 % των ξενοδοχειακών μονάδων διαθέτουν ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού, γεγονός που, σύμφωνα με σχετική μελέτη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθιστά την Κύπρο πρωτοπόρο στον τομέα των θερμικών εφαρμογών ηλιακής ενέργειας, με σχεδόν 1 m² εγκατεστημένη επιφάνεια συλλέκτη ανά κάτοικο [1].

Στην ηλιοθερμική ενέργεια συγκαταλέγονται και τα μεγάλα ηλιοθερμικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος με ηλιακούς συλλέκτες. Στα ηλιοθερμικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας συγκαταλέγονται: οι παραβολικοί συλλέκτες σκάφης, ο ηλιακός δίσκος, η ηλιακή καπνοδόχος, οι καθρέφτες Φρενέλ και ο ηλιακός πύργος. Από αυτές τις τεχνολογίες οι παραβολικοί συλλέκτες σκάφης και οι ηλιακοί πύργοι είναι ήδη εμπορικά αξιοποιήσιμες.

2. Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ

Οι ηλιακοί πύργοι (Εικόνα 1) μετατρέπουν την συγκεντρωτική ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα. Η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είτε για χημικές διεργασίες. Για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος ο ηλιακός πύργος συνδυάζεται με το συμβατικό κύκλο ενός ατμοηλεκτρικού εργοστασίου. Στις ηλιακές χημικές εφαρμογές συγκαταλέγεται εκτός των άλλων η τήξη μετάλλων για την οποία απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες, η παραγωγή καυσίμων όπως υδρογόνου αλλά και η παραγωγή άλλων χημικών ενώσεων. Μια άλλη πολύ σημαντική εφαρμογή είναι η χρήση της ηλιακής θερμότητας για την αφαλάτωση και την παροχή πόσιμου νερού ιδιαίτερα σε νησιωτικές περιοχές, οι οποίες έχουν έλλειψη νερού.



Εικόνα 1: Ηλιακός πύργος Solar Two στην Αμερική (Πηγή Sandia)

Σε ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας με ηλιακό πύργο ηλιοστάτες εστιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία σε έναν μετατροπέα θερμότητας. Το σύνολο των ηλιοστατών ορίζει το ηλιοστατικό πεδίο, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει έναν μεγάλο αριθμό από καθρέφτες. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται συγκέντρωση του ηλιακού φωτός 500 με 1000 φορές. Αυτή η συγκέντρωση αρκεί για την επίτευξη θερμοκρασιών στον αποδέκτη πάνω από 1200 °C.

Ο μετατροπέας θερμότητας (αποδέκτης) βρίσκεται στην κορυφή του ηλιακού πύργου. Ο ρόλος του είναι η απορρόφηση της συγκεντρωτικής ηλιακής ακτινοβολίας και η απόδοση της θερμικής ενέργειας σε ένα μέσο μεταφοράς της σε υψηλές θερμοκρασίες. Τέτοια υλικά, που έχουν τις κατάλληλες ιδιότητες για τη χρησιμοποίησή τους ως αποδέκτες, είναι μεταλλικές ή κεραμικές δομές, οι οποίες μπορούν να αντεπεξέλθουν σε μεγάλες αλλαγές της θερμοκρασίας [2]. Το μέσο μεταφοράς της θερμότητας απορροφά την συγκεντρωτική ακτινοβολία και την μετατρέπει σε θερμική ενέργεια. Η παραγόμενη θερμική ενέργεια χρησιμεύει για την παραγωγή ατμού για χρήση σε ατμοστρόβιλο και για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

3. ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΟ ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ

Η Ελλάδα και η Κύπρος προσφέρονται όσο λίγες ευρωπαϊκές χώρες για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Η ετήσια ηλιοφάνεια αυξάνει στην Ελλάδα από βορρά προς νότο και από τα εσωτερικά ηπειρωτικά τμήματα προς την κατεύθυνση των ακτών [3]. Το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας είναι πολύ υψηλό ξεπερνώντας τις 4200 κιλοβατώρες ανά

τετραγωνικό μέτρο ημερησίως. Η Κύπρος απολαμβάνει υψηλή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου, με μέση ημερήσια ηλιοφάνεια 9,8 με 14,5 ώρες [1].

Το μέσο ετήσιο φυσικώς διαθέσιμο (θεωρητικό) δυναμικό της ηλιακής ακτινοβολίας για την Ελλάδα υπολογίζεται σε $195 \cdot 10^6$ GWh/a [4]. Το φυσικώς διαθέσιμο ηλιακό δυναμικό δεν είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμο. Το οικονομικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό των συγκεντρωτικών ηλιακών τεχνολογιών για την Ελλάδα και άρα και της τεχνολογίας του ηλιακού πύργου είναι πάνω από 4.000 GWh. Για την συνολική έκταση της Κύπρου το οικονομικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό των συγκεντρωτικών ηλιακών τεχνολογιών είναι πάνω από 20.000 GWh.

Η διαφορά αυτή ανάμεσα στα δύο αυτά κράτη της Νοτιοανατολικής Μεσογείου οφείλεται στο υψηλότερο ηλιακό δυναμικό της Κύπρου λόγω της γεωγραφικής της θέσης.

4. ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Από τις αρχές της δεκαετίας του 80 μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 90 έγιναν πολλά ερευνητικά προγράμματα στην Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη για τη χρήση του ηλιακού πύργου. Με την αποκτηθείσα εμπειρία διαμορφώθηκαν οι προϋποθέσεις για την εμπορική αξιοποίηση και την δημιουργία των πρώτων ηλιακών εργοστασίων παραγωγής ενέργειας με ηλιακό πύργο. Πρωτοπόροι στην εγκατάσταση και ανάπτυξη της τεχνολογίας στην Ευρώπη σήμερα είναι η Γερμανία και η Ισπανία.

Στην Ισπανία είναι ήδη σε λειτουργία ένας ηλιακός πύργος με ονομαστική ισχύ 10 MW. Εκτός από αυτή τη μονάδα κατασκευάζονται τουλάχιστον άλλες δύο μεγαλύτερες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 2: Ηλιακός πύργος του Γιούλιχ, Πηγή: Stadtwerke Juelich

Ακόμα και στη Γερμανία που δεν διαθέτει υψηλό ηλιακό δυναμικό ολοκληρώνεται μέχρι το τέλος του έτους 2008 η εγκατάσταση ενός ηλιακού εργοστασίου με ηλεκτρική ισχύ 1,5 MW [2]. Το εργοστάσιο αυτό θα τροφοδοτήσει με ηλεκτρικό ρεύμα 350 γερμανικά νοικοκυριά.

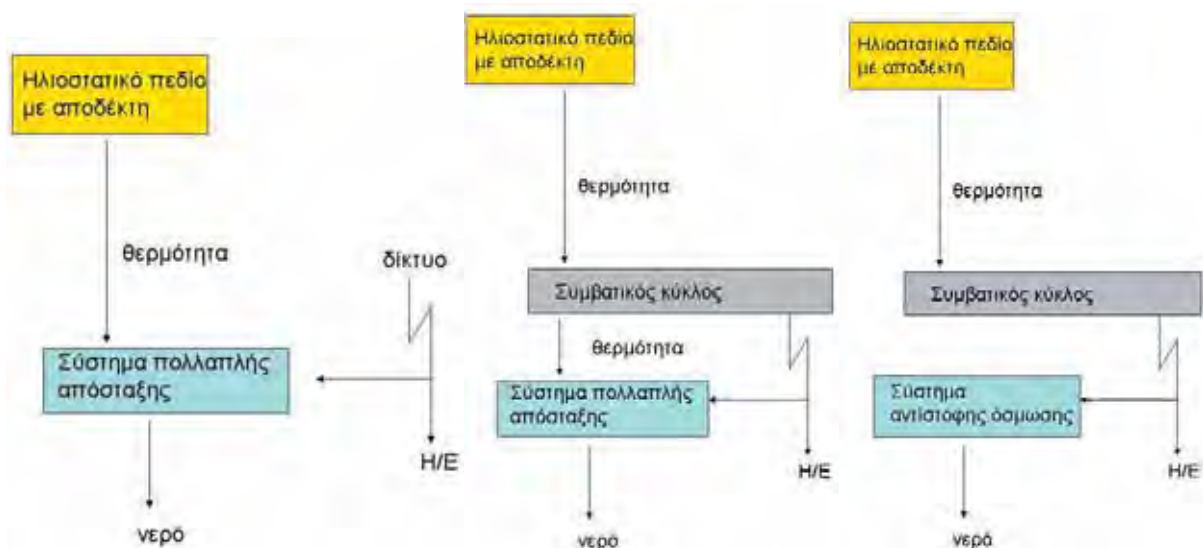
Στην πόλη του Γιούλιχ στο κρατίδιο της Ρηνανίας Βεστφαλίας δημιουργείται γι' αυτόν τον σκοπό ένα μεγάλο πεδίο με καθρέφτες με συνολική επιφάνεια περίπου 20.000 m² [5]. Το ενεργειακό αυτό σχέδιο, το οποίο θα κοστίσει περίπου 23 εκ. ευρώ χρηματοδοτείται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό από το κρατίδιο της Ρηνανίας Βεστφαλίας, της Βαυαρίας και από το Υπουργείο Περιβάλλοντος της Γερμανίας.

Αριστερά στην Εικόνα 2 διακρίνεται ένα τμήμα του ηλιοστατικού πεδίου και δεξιά ο ηλιακός πύργος ύψους 60 μέτρων με τον αποδέκτη. Στον αποδέκτη αναπτύσσονται θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 900 °C [6]. Ως μέσο μεταφοράς χρησιμοποιείται αέρας, ο οποίος μεραφέρει τη θερμότητα από τον αποδέκτη σε εναλλάκτες θερμότητας, όπου θερμαίνεται το νερό και παράγεται ατμός. Η θερμική ενέργεια του ατμού μετατρέπεται στον ατμοστρόβιλο του συμβατικού κύκλου σε μηχανική ενέργεια. Η με αυτό τον τρόπο παραγόμενη μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω γεννήτριας για την τελική παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Οι εργασίες κατασκευής της μονάδας του ηλιακού πύργου, όπως διακρίνεται και στην Εικόνα 2, έχουν σχεδόν ολοκληρωθεί και η παραγωγή των πρώτων κιλοβατμών ηλεκτρικού ρεύματος αναμένονται μέχρι το τέλος του 2008.

Η παρουσία ενός αποθηκευτή θερμότητας επιτρέπει την επέκταση της λειτουργίας του εργοστασίου κατά μια ώρα τη νύχτα ή σε συννεφιασμένες μέρες. Το Ηλιακό Ινστιτούτο του Γιούλιχ ερευνά περαιτέρω τη δυνατότητα συνδυασμού του ηλιακού πύργου σε υβριδικά συστήματα με την καύση φυσικού αερίου ή βιοαερίου.

5. ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΓΙΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ

Η τεχνολογία του ηλιακού πύργου προσφέρεται και για την αφαλάτωση. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι εκμετάλλευσης του ηλιοστατικού πεδίου ενός ηλιακού πύργου για την παραγωγή πόσιμου ή ποτιστικού νερού (βλέπε Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Συστήματα αφαλάτωσης με ηλιακό πύργο

Για την αφαλάτωση χρησιμοποιούνται σήμερα είτε συστήματα πολλαπλής απόσταξης είτε αντίστροφης όσμωσης. Για το πρώτο σύστημα απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα ενώ για το δεύτερο μόνο ηλεκτρικό ρεύμα.

Το πρώτο σύστημα αφαλάτωσης με ηλιακό πύργο (βλέπε Εικόνα 3, αριστερά) χρησιμοποιεί μόνο τη θερμότητα του ηλιοστατικού πεδίου και του αποδέκτη για την παροχή της

θερμότητας στο σύστημα πολλαπλής απόσταξης και το ηλεκτρικό ρεύμα παρέχεται από το δίκτυο. Το δεύτερο (βλέπε Εικόνα 3, κέντρο) περιλαμβάνει και τον συμβατικό κύκλο για την τροφοδοσία του συστήματος αφαλάτωσης με ηλεκτρικό ρεύμα και θερμότητα. Τέλος για τη μονάδα αντίστροφης όσμωσης (βλέπε Εικόνα 3, δεξιά) ο ηλιακός πύργος παρέχει μόνο το ηλεκτρικό ρεύμα.

Αυτά τα τρία συστήματα μπορούν να βρουν εφαρμογές σε νησιωτικές ή παράκτιες περιοχές της Ελλάδας και στην Κύπρο, που αντιμετωπίζουν προβλήματα έλλειψης νερού.

6. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΥΠΡΟ

Η Ελλάδα και η Κύπρος προσφέρονται όσο λίγες ευρωπαϊκές χώρες για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Στις αρχές του 2008 το κόστος παραγωγής ρεύματος αγγίζει τιμές των 25 λεπτών/kWh. Η εμπειρία των καινούργιων ηλιακών μονάδων με πύργο στην Ευρώπη δείχνουν μια συνεχή μείωση του κόστους, το οποίο μπορεί μελλοντικά να κυμανθεί σε επίπεδα κάτω των 10 λεπτών ανά κιλοβατώρα. Έως το 2020 υπολογίζεται ότι το κόστος παραγωγής ρεύματος θα φτάσει τα 5 λεπτά ανά κιλοβατώρα.

Η τεχνολογία του ηλιακού πύργου για την Ελλάδα ή την Κύπρο έχει πολλά πλεονεκτήματα διότι:

- επιτυγχάνει έναν υψηλό αριθμό ωρών λειτουργίας σε συνδυασμό με
 - ο υβριδικά συστήματα ή με
 - ο θερμικούς συσσωρευτές
- συντελεί στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σε μη διασυνδεδεμένα συστήματα
- έχει σύμφωνα με μια μελέτη του Γερμανικού Κέντρου Κίνησης στην Ατμόσφαιρα και στο Διάστημα (DLR) από το έτος 2004 το υψηλότερο δυναμικό εξοικονόμησης κόστους
- έχει τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης για μεγάλες μονάδες, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και της χρήσης του συμβατικού κύκλου
- μειώνει την εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα
- το ηλιοστατικό πεδίο δεν επιβαρύνει τις καλλιέργειες (λαχανικά) ή τα βοσκοτόπια
- είναι φιλική προς το περιβάλλον καθώς τα μέσα μεταφοράς της θερμότητας είναι μη επιβλαβή
- έχει υψηλή αξιοπιστία, καθώς τα περισσότερα τμήματα του εργοστασίου είναι από συμβατικούς κύκλους
- επιτρέπει την τοποθέτηση των μονάδων και σε μη πεδινά εδάφη

Ιδανικές είναι πεδινές και ημιπεδινές περιοχές της Νότιας Ηπειρωτικής Ελλάδας, η Κρήτη και η Ρόδος. Στην ηπειρωτική Ελλάδα υπάρχει η δυνατότητα χρήσης της τεχνολογίας του ηλιακού πύργου για μεγάλα συστήματα άνω των 10 MW. Στην Κύπρο ιδανικές περιοχές είναι στο κέντρο του νησιού και στις παράκτιες περιοχές της Λεμεσού, του Ακρωτηρίου, της Λάρνακας και των ανατολικών ακτών μέχρι την Αμμόχωστο.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο ηλιακός πύργος αποτελεί μια ανταγωνιστική τεχνολογία. Ήδη σε ευρωπαϊκές χώρες λειτουργούν ή δημιουργούνται τέτοιες εγκαταστάσεις για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Το οικονομικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό της τεχνολογίας του ηλιακού πύργου για την Ελλάδα και την Κύπρο είναι αρκετά υψηλό. Υπάρχουν πολλές περιοχές στην Ελλάδα και

στην Κύπρο, στις οποίες μπορούν να τοποθετηθούν ηλιακοί πύργοι είτε για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος είτε για αφαλάτωση.

Στις δύο αυτές χώρες την Νοτιοανατολικής Μεσογείου, με ένα αξιόλογο ηλιακό δυναμικό, είναι επιτακτική ανάγκη η ανάπτυξη της τεχνολογίας του ηλιακού πύργου, η οποία αποτελεί μια ανταγωνιστική ηλιακή τεχνολογία και ήδη σε άλλα κράτη της Μεσογείου αποτελεί πρώτη προτεραιότητα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ομιλία Υπουργού Εμπορίου, Βιομηχανίας και Τουρισμού κ. Αντώνη Πασχαλίδη στη συζήτηση με θέμα Λόγος και Αντίλογος περί Ενεργειακής Πολιτικής, 20.5.2008
2. Σ. Αλεξόπουλος: Η τεχνολογία του ηλιακού πύργου και προοπτικές στην Ελλάδα, Ο κόσμος της Ενέργειας, τεύχος 11, σελ. 28-29, Απρίλιος - Ιούνιος 2007
3. Α. Ματζαράκης, Β. Κατσούλης: Διάρκεια των ωρών της ηλιοφάνειας στον ελληνικό χώρο. 7^ο Πανελλήνιο (Διεθνές) Συνέδριο Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Φυσικής της Ατμόσφαιρας Λευκωσία, 28-30 Σεπτέμβρη 2004
4. Γ. Τσιλιγκιρίδης: Το δυναμικό των εγχώριων ενεργειακών πόρων, Πρακτικά 5^{ου} Εθνικού Συνεδρίου για τις ΑΠΕ, σελ. 165-199, Αθήνα, 6-8 Νοεμβρίου 1996
5. Praxistest für neuartiges Sonnenkraftwerk Solarturm Jülich: Strom aus gebündelten Licht, BMU, Berlin, 4. Juli 2006
6. B. Hoffschmidt: Solarthermische Kraftwerke aus NRW, Rede am Cluster Energieforschung NRW, Essen, 16.6.2008

ΠΡΟΤΑΣΗ ΓΙΑ ΣΧΕΔΙΟ ΠΡΟΤΥΠΟΥ - ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕΓΑΛΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Κ. Βορόπουλος, Ε. Μαθιουλάκης και Β. Μπελεσιώτης

Εργαστήριο Ηλιακών –Ενεργειακών Συστημάτων» - ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»
15310 – Αγία Παρασκευή Αττικής
τηλ. 210-6503815, fax. 210-6544592, E-mail: sollab@ipta.demokritos.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αφορά πρόταση του «Εργαστηρίου Ηλιακών –Ενεργειακών Συστημάτων» του ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ» για την διαμόρφωση Σχεδίου Προτύπου Τεχνικής Οδηγίας Σχεδιασμού και Εγκατάστασης Κεντρικών Ηλιακών Συστημάτων (Κ.Η.Σ.). Παρουσιάζει όλες τις απαραίτητες ενέργειες που πρέπει να ακολουθηθούν από τον σχεδιαστή του κεντρικού ηλιακού συστήματος και τις απαιτήσεις του κάθε τμήματος αυτού, αρχίζοντας από την προκαταρκτική ανάλυση, προχωρώντας στην μελέτη σκοπιμότητας, συνεχίζοντας με τον λεπτομερή σχεδιασμό και τελειώνοντας με την ανάπτυξη των πακέτων σχεδιασμού και κατασκευής. Παρουσιάζει επίσης όλες τις απαραίτητες ενέργειες που πρέπει να ακολουθηθούν από τον εγκαταστάτη του ηλιακού συστήματος και τις απαιτήσεις του κάθε τμήματος αυτού, όπως ανασκόπηση/αναθεώρηση σχεδιασμού, άδειες και εγκρίσεις, παραγγελία/αποθήκευση υλικών, υλοποίηση εγκατάστασης, αρχικοί έλεγχοι, δοκιμές σωστής λειτουργίας και εκπαίδευση χρηστών. Τέλος, προτείνεται διαδικασία που μπορεί να ακολουθηθεί μέσω των αρμόδιων φορέων και οργανισμών για την επεξεργασία, έγκριση και ανάπτυξη σχετικού Προτύπου ή Τεχνικής Οδηγίας στην Ελλάδα, καθώς και ενέργειες για τη ευρεία διάδοσή της στους υποψήφιους χρήστες.

Λέξεις κλειδιά: Θερμικό Ηλιακό Σύστημα, Σχεδίαση, Εγκατάσταση, Τεχνικές Προδιαγραφές

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ελλάδα κατέχει πρωταρχική θέση στον κόσμο όσον αφορά την εκμετάλλευση της θερμικής ηλιακής ενέργειας. Η εκμετάλλευση όμως αυτή περιορίζεται σχεδόν αποκλειστικά στην εγκατάσταση τυποποιημένων οικιακών θερμοσιφωνικών συστημάτων, τομέα που παρουσιάζει τα τελευταία χρόνια ένα φυσιολογικό κορεσμό [1]. Αντίθετα, παραμένει αναξιοποίητος ο τομέας των Κεντρικών Ηλιακών Συστημάτων (Κ.Η.Σ), εν μέρει λόγω της αρνητικής εμπειρίας από υφιστάμενες εγκαταστάσεις. Είναι επίσης κοινά αποδεκτό ότι η απόδοση και η αξιοπιστία των Κ.Η.Σ. εξαρτάται σημαντικά από τον σωστό σχεδιασμό τους και την τεχνικά ορθή εγκατάστασή τους, βάσει προτυποποιημένων και κοινά αποδεκτών διαδικασιών και οδηγιών. Η αναγκαιότητα ανάπτυξης τέτοιων διαδικασιών κρίνεται συνεπώς ουσιαστική για την χώρα μας, λαμβάνοντας επίσης υπόψη την διαφορετικότητα των ακολουθούμενων διαδικασιών και τεχνικών σε άλλες χώρες.

Η ύπαρξη ανεγνωρισμένης, κοινά αποδεκτής και εγκεκριμένης από αρμόδιους φορείς τεχνικής οδηγίας σχεδιασμού και εγκατάστασης Κ.Η.Σ, στην χώρα μας, σύμφωνα με την οποία θα πρέπει να γίνεται ο σχεδιασμός και η εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων, θα συμβάλλει ουσιαστικά στην βελτίωση της ποιότητας αυτών, προωθώντας παράλληλα τα

οφέλη που προσφέρουν τα συστήματα αυτά στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας μας αλλά και στην προστασία του περιβάλλοντος γενικότερα.

2. Η ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ Κ.Η.Σ.

Η Ελλάδα κατέχει πρωταρχική θέση στον κόσμο όσον αφορά την χρήση θερμικών ηλιακών συστημάτων. Οι τεχνολογίες στον τομέα των θερμικών ηλιακών είναι ώριμες, ιδιαίτερα στην Ελλάδα όπου ο κατασκευαστικός κλάδος εμφανίζεται ιδιαίτερα δυναμικός.

Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί αρκετά το ενδιαφέρον για την τοποθέτηση Κ.Η.Σ. από συγκεκριμένους χρήστες στην Ελλάδα, γεγονός που έχει ήδη οδηγήσει στην εγκατάσταση και λειτουργία τέτοιων συστημάτων, κυρίως σε ξενοδοχειακές μονάδες, σχολεία, νοσοκομεία, φυλακές, δημόσια κτίρια, συγκροτήματα γραφείων, κ.λ.π. Η τοποθέτηση των Κ.Η.Σ. στις παραπάνω εφαρμογές ενθαρρύνεται και βοηθείται σημαντικά από την ύπαρξη στην χώρα μας απαραίτητης διαπιστευμένης εργαστηριακής υποδομής για την αξιολόγηση των θερμικών ηλιακών βάσει σχετικών προτύπων καθώς και την ύπαρξη της σχετικής τεχνογνωσίας στον τομέα αυτό. Επιπρόσθετα, αρκετές εγκαταστάσεις ενισχύονται από την πολιτεία μέσω αντίστοιχων προγραμμάτων χρηματοδότησης.

Παρόλα αυτά, πολλές φορές παρατηρείται το φαινόμενο σε πολλές εφαρμογές Κ.Η.Σ. να παρουσιάζονται σημαντικά προβλήματα απόδοσης και αξιοπιστίας, γεγονός που αυξάνει την δυσπιστία των ήδη αλλά και πιθανών μελλοντικών χρηστών των συστημάτων αυτών.

Υπάρχουν διάφορες αιτίες στις οποίες μπορεί να αποδοθεί το παραπάνω φαινόμενο, μία από τις οποίες είναι ο κακός σχεδιασμός του Κ.Η.Σ. Είναι φανερό ότι το Κ.Η.Σ. αποτελεί ένα σύνολο συσκευών και διατάξεων, οι οποίες όσο ποιοτικές και αποδοτικές και αν είναι, εάν δεν μπορούν να συνεργαστούν σωστά λόγω κακού σχεδιασμού στην εκάστοτε εφαρμογή είναι λογικό να μην αποδώσουν τα αναμενόμενα. Επιπρόσθετα, η προβληματική συμπεριφορά των εγκαταστάσεων σχετίζεται συχνά με λάθη κατή την τοποθέτηση, τα οποία ακυρώνουν στην πράξη τα όποια πλεονεκτήματα ακόμα και των σωστά σχεδιασμένων προϊόντων.

Η αναγκαιότητα επομένως της ανάπτυξης οδηγιών σχεδιασμού και εγκατάστασης Κ.Η.Σ. κρίνεται συνεπώς επιτακτική για την χώρα μας, δεδομένου επίσης ότι σε πολλές άλλες χώρες -ευρωπαϊκές και μη- ήδη υπάρχουν και ακολουθούνται ανάλογες τεχνικές οδηγίες.

3. Η ΑΚΟΛΟΥΘΟΥΜΕΝΗ ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΣΕ ΑΛΛΕΣ ΧΩΡΕΣ

Αναγνωρίζοντας την σημασία του σωστού σχεδιασμού και εγκατάστασης των Κ.Η.Σ., πολλές χώρες της Ε.Ε., αλλά και εκτός Ευρώπης, έχουν αναπτύξει και εφαρμόζουν σχετικές διαδικασίες.

Οι διαδικασίες που έχουν αναπτυχθεί παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις τόσο στις οδηγίες όσο και στην εφαρμογή τους. Υπάρχουν χώρες στις οποίες έχει αναπτυχθεί και ήδη λειτουργεί σχήμα πιστοποίησης εγκαταστατών θερμικών ηλιακών συστημάτων, ενώ σε άλλες χώρες αυτό αποτελεί τμήμα ευρύτερου σχήματος πιστοποίησης συσκευών Α.Π.Ε. Σε κάποιες περιπτώσεις τα σχήματα είναι προαιρετικά ενώ σε άλλες απαιτείται η εφαρμογή τους για περιπτώσεις χρηματοδότησης [2,3].

Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι τεχνικές οδηγίες και σχήματα πιστοποίησης είναι σχετικά πρόσφατα ενώ παρατηρείται το φαινόμενο να τροποποιούνται διαρκώς με βάση τις τρέχουσες εξελίξεις της τεχνικής.

4. ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ

4.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ

Η Τεχνική Οδηγία αφορά τον σχεδιασμό και την εγκατάσταση Κ.Η.Σ. τόσο σε νέα όσο και σε υπάρχοντα κτίρια, που χρησιμοποιούνται για θέρμανση νερού και χώρων, που λειτουργούν με υγρό, με ελάχιστο όγκο δεξαμενής αποθήκευσης 3800 lt ή ελάχιστη επιφάνεια συλλεκτών 65 m². Περιέχει τεχνικές οδηγίες και συστάσεις για το τι πρέπει να γίνει και να προσεχθεί κατά την όλη διαδικασία του σχεδιασμού και την εγκατάσταση των Κ.Η.Σ.

Η Τεχνική Οδηγία απευθύνεται κυρίως σε σχεδιαστές Κ.Η.Σ. αλλά και από μηχανικούς, μελετητές και κατασκευαστές στην φάση του σχεδιασμού. Επίσης θα χρησιμοποιείται κυρίως από εγκαταστάτες Κ.Η.Σ. αλλά και από μηχανικούς, μελετητές και κατασκευαστές στην φάση της εγκατάστασης.

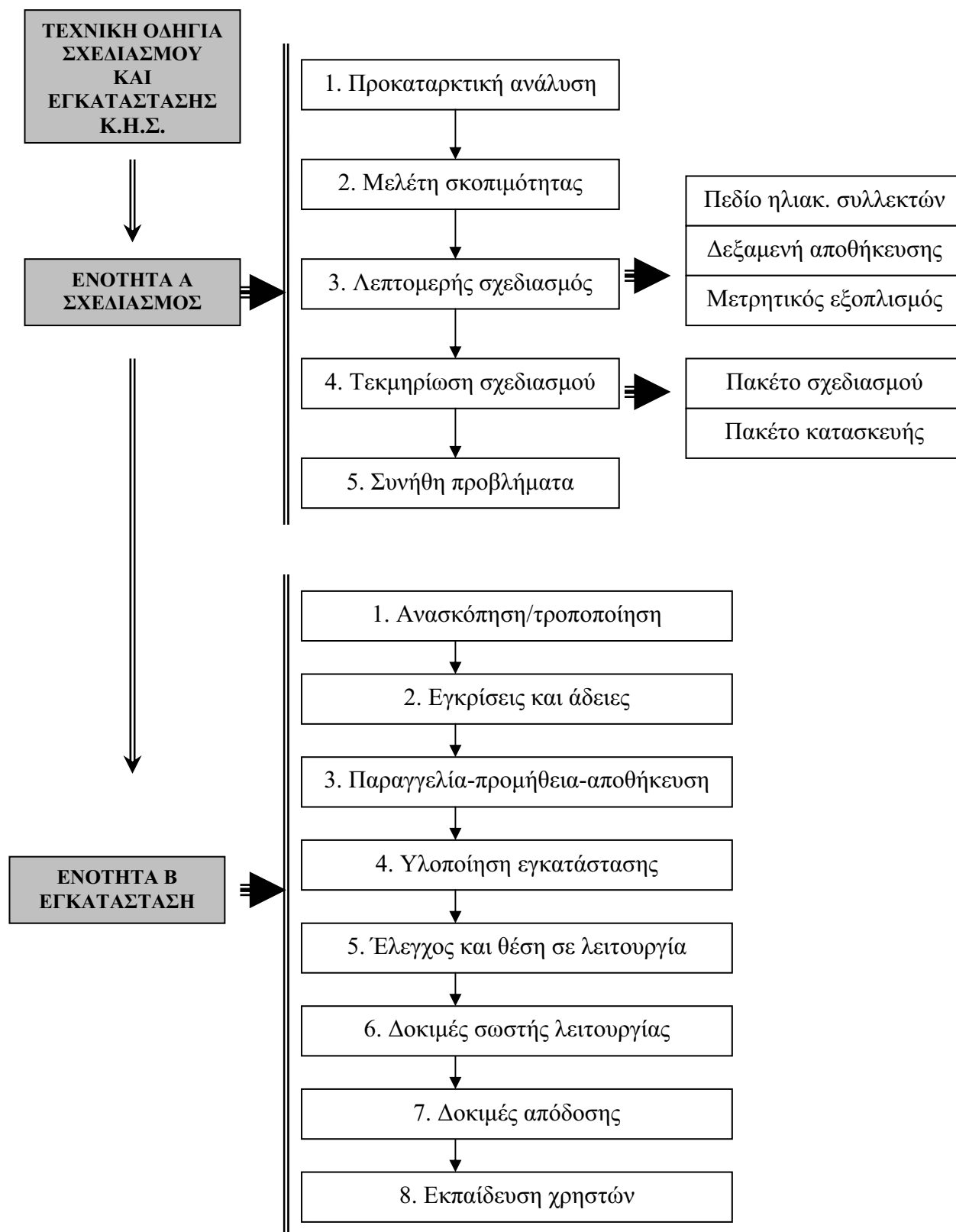
Οι διαδικασίες της Τεχνικής Οδηγίας θα είναι βασισμένες και αναπτυγμένες στην βάση ήδη αναπτυγμένων αντίστοιχων διαδικασιών άλλων οργανισμών (π.χ. ASHRAE) [4] και στην υπάρχουσα τεχνογνωσία του ΕΗ-ΕΣ του ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ» [5,6].

4.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ

Η Τεχνική Οδηγία αποτελείται από δύο κύριες ενότητες (Σχήμα – 1). Η πρώτη ενότητα καλύπτει την διαδικασία του σχεδιασμού Κ.Η.Σ., η οποία διακρίνεται σε τέσσερα μέρη: την προκαταρκτική ανάλυση, την μελέτη σκοπιμότητας, τον λεπτομερή σχεδιασμό και την ανάπτυξη των πακέτων σχεδιασμού και κατασκευής. Η δεύτερη ενότητα καλύπτει την διαδικασία της εγκατάστασης των Κ.Η.Σ και περιλαμβάνει τις προκαταρκτικές ενέργειες (ανασκόπηση / τροποποίηση σχεδιασμού), την απόκτηση αδειών και εγκρίσεων, την προμήθεια και αποθήκευση υλικών, την υλοποίηση της εγκατάστασης, την θέση σε λειτουργία, τις δοκιμές σωστής λειτουργίας και την εκπαίδευση χρηστών. Σημειώνεται ότι η δομή της Τεχνικής Οδηγίας έχει αναπτυχθεί με τέτοιο τρόπο ώστε οι διαδικασίες και οι ενέργειες που καθορίζει γίνονται με λογική σειρά ως προς τη υλοποίηση. Έτσι, κάποιες ενέργειες πρέπει να περατωθούν ώστε να ξεκινήσουν οι επόμενες, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να υλοποιούνται περισσότερες των μία ενεργειών ταυτόχρονα. Όλες οι ενέργειες καταγράφονται και ελέγχονται από αντίστοιχα Φύλλα Ελέγχου (Check Lists).

4.3 ΠΡΩΤΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ – ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ Κ.Η.Σ.

Η προκαταρκτική ανάλυση αποτελεί το πρώτο μέρος της Τεχνικής Οδηγίας για τον σχεδιασμό Κ.Η.Σ και είναι μια απλή ανάλυση για να προσδιοριστεί εάν είναι σκόπιμη η εγκατάσταση του Κ.Η.Σ για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Περιέχει πρακτικούς κανόνες, πίνακες και διαγράμματα που χρησιμοποιούνται για την αρχική αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Από την ανάλυση προσδιορίζεται ο τύπος του ηλιακού συστήματος, γίνεται μια χονδρική εκτίμηση του φορτίου, καθορίζεται η θέση και το μέγεθος των συλλεκτών ενώ γίνεται και μια αρχική εκτίμηση του κόστους.



Σχήμα – 1: Γενικό διάγραμμα ενεργειών της Τεχνικής Οδηγίας Σχεδιασμού και Εγκατάστασης κεντρικών ηλιακών συστημάτων

Η διαδικασία σχεδιασμού συνεχίζει με την μελέτη σκοπιμότητας. Ο σχεδιαστής αναθεωρεί τα δεδομένα που προέκυψαν από την προκαταρκτική ανάλυση, τα επιβεβαιώνει και προσθέτει επιπλέον πληροφορίες σχετικές με την εξοικονόμηση ενέργειας και στοιχεία του φορτίου. Με αυτά τα δεδομένα και χρησιμοποιώντας υπολογιστικά προγράμματα, ο σχεδιαστής προσδιορίζει το ακριβές μέγεθος του πεδίου των συλλεκτών. Ακολουθεί η ανάλυση του κόστους για τον προσδιορισμό της οικονομικότητας του σχεδιασμού. Τέλος, ο σχεδιαστής ετοιμάζει την περιγραφή του συστήματος και εάν το σύστημα κρίνεται οικονομικό, προχωρά στην επόμενη φάση.

Ο λεπτομερής σχεδιασμός αποτελεί το τρίτο μέρος της Τεχνικής Οδηγίας για τον σχεδιασμό Κ.Η.Σ. και περιέχει οδηγίες και συστάσεις σχετικά με την ανάπτυξη των αναλυτικών διαγραμμάτων του συστήματος, τον αναλυτικό σχεδιασμό των τμημάτων του πεδίου συλλεκτών, της δεξαμενής αποθήκευσης και του συστήματος ελέγχου. Αναπτύσσονται τα αναλυτικά σχέδια και διαγράμματα των τμημάτων του συστήματος, γίνονται οι αναλυτικοί υπολογισμοί και ο λεπτομερής σχεδιασμός αυτών. Τα στοιχεία αφορούν την διάταξη, τύπος, αριθμός, κλίση και προσανατολισμός συλλεκτών, βάσεις στήριξης συλλεκτών, υλικό, διαστάσεις και διάταξη σωληνώσεων, σχεδιασμός και χωρητικότητα δεξαμενών, εναλλάκτες θερμότητας, υδραυλικές συνδέσεις, μέσο μεταφοράς θερμότητας, αντλίες, δοχείο διαστολής, βαλβίδες και βάνες, μόνωση, λοιπά υδραυλικά εξαρτήματα και διατάξεις, πλήρης μετρητικός εξοπλισμός, όργανα, αισθητήρια, κ.λ.π. Γίνεται τέλος ο τελικός υπολογισμός θερμικής συμπεριφοράς του συστήματος και ο τελικός καθορισμός του κόστους. Στην φάση αυτή μπορεί να γίνουν αναθεωρήσεις. Με την ολοκλήρωση του τελικού σχεδιασμού γίνεται η επιβεβαίωση της απόδοσης και του κόστους του συστήματος.

Οι εκτιμήσεις / υπολογισμοί που γίνονται στα τρία πρώτα μέρη της Τεχνικής Οδηγίας πραγματοποιούνται στην βάση φύλλων ελέγχου ενεργειών, τα οποία δίνονται σε αντίστοιχα παραρτήματα.

Με την ολοκλήρωση του σχεδιασμού αναπτύσσονται τα πακέτα σχεδιασμού και κατασκευής. Το πακέτο σχεδιασμού συνοψίζει τις αναλύσεις που έχουν ολοκληρωθεί κατά την φάση της μελέτης σκοπιμότητας και την φάση του λεπτομερούς σχεδιασμού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον χρήστη του συστήματος και περιέχει στοιχεία όσον αφορά την ανάλυση των θερμικών φορτίων του Κ.Η.Σ, της θερμικής συμπεριφοράς του, της διαστασιολόγησης του πεδίου συλλεκτών, της δεξαμενής αποθήκευσης και των σωληνώσεων, τα αποτελέσματα τυχόν σημαντικών αποκλίσεων από τον αρχικό σχεδιασμό, την εκτίμηση του κόστους κατασκευής, την οικονομική αξιολόγηση του συστήματος, την περιγραφή του συστήματος και όλα τα λεπτομερή σχέδια. Το πακέτο κατασκευής περιέχει τα αποτελέσματα του λεπτομερούς σχεδιασμού του συστήματος. Περιέχει το σύνολο των κατασκευαστικών σχεδίων και των σχεδίων εγκατάστασης, τις προδιαγραφές κατασκευής, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και προδιαγραφές του εξοπλισμού και τις διαδικασίες εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης του συστήματος. Το πακέτο κατασκευής αποτελεί την βάση για την σύνταξη του πακέτου για τον διαγωνισμό ανάδειξης του αναδόχου υλοποίησης.

Το τελευταίο μέρος της Τεχνικής Οδηγίας για τον σχεδιασμό Κ.Η.Σ. αφορά προβλήματα που είναι συνήθη στα κεντρικά ηλιακά συστήματα, τα οποία αποδίδονται σε σχεδιαστικά λάθη ή σε σχεδιαστικές αποφάσεις που δεν είναι βέλτιστες (διαστασιολόγηση). Επίσης αφορά προβλήματα που προέρχονται από λάθη ή αποφάσεις που σχετίζονται επίσης με την κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση του συστήματος (προστασία, λειτουργία). Σε κάθε περίπτωση, η Τεχνική Οδηγία αναφέρει τις πιθανές συνέπειες που μπορεί να προκληθούν από

το κάθε πρόβλημα και δίνει συστάσεις σχετικά με την αντιμετώπιση ή λύση του προβλήματος.

4.4 ΔΕΥΤΕΡΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ – ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ Κ.Η.Σ.

Η ανασκόπηση του σχεδιασμού του Κ.Η.Σ., η οποία αποτελεί το πρώτο μέρος της Τεχνικής Οδηγίας για την εγκατάσταση του Κ.Η.Σ., πραγματοποιείται για την εύρεση τυχόν παραλήψεων ή λαθών. Έχει κυρίως εφαρμογή στην περίπτωση που ο εγκαταστάτης του ηλιακού συστήματος είναι διαφορετικός από τον μελετητή ή κατασκευαστή που σχεδίασε το σύστημα. Δίνει συστάσεις για την πραγματοποίηση της ανασκόπησης στην γενική περιγραφή του ηλιακού συστήματος, στα κατασκευαστικά σχέδια και σχεδιαγράμματα λειτουργίας, στις προδιαγραφές της θέσης εγκατάστασης, στις προδιαγραφές των τμημάτων του ηλιακού συστήματος και στο εγχειρίδιο λειτουργίας και συντήρησης του ηλιακού συστήματος. Μετά την ανασκόπηση ακολουθεί η επιθεώρηση της θέσης εγκατάστασης. Εάν κριθεί αναγκαίο, η ανασκόπηση μπορεί να οδηγήσει σε αναθεώρηση σημείων της μελέτης σχεδιασμού.

Όπως κάθε άλλη εργασία εγκατάστασης, έτσι και η εγκατάσταση των Κ.Η.Σ. υπόκειται σε διάφορους κώδικες, κανονισμούς και εγκρίσεις, τοπικού ή εθνικού χαρακτήρα. Η Τεχνική Οδηγία για την εγκατάσταση του Κ.Η.Σ. στο δεύτερο μέρος της δίνει συστάσεις σχετικά με τη διερεύνηση της νομικής πλευράς του θέματος με την παροχή πληροφοριών και την απόκτηση των απαραίτητων αδειών και εγκρίσεων από τους αρμόδιους φορείς. Μπορεί να αφορά κανονισμούς σχετικούς με την πιθανότητα πρόκλησης μόλυνσης του πόσιμου νερού της εφαρμογής, απαγορεύσεις λόγου του μεγάλου μεγέθους των πλαισίων στήριξης των συλλεκτών, απαιτήσεις και προδιαγραφές πυρασφάλειας, προσβάσεις σε διαδρόμους διαφυγής σε περίπτωση γεγονότων έκτακτης ανάγκης, απαιτήσεις στεγανότητας της οροφής του κτιρίου, απαιτήσεις αισθητικής του κτιρίου, ειδικές απαιτήσεις αντισεισμικότητας και χορήγηση ειδικών αδειών για το μπλοκάρισμα των δρόμων από φορτηγά και γερανούς κατά την φάση εκφόρτωσης των εξαρτημάτων και μεταφορά τους στην θέση της εγκατάστασης.

Οδηγίες σχετικά με την παραγγελία, την παράδοση εντός των χρονοδιαγραμμάτων και την ασφαλή αποθήκευση των υλικών του Κ.Η.Σ. δίνονται στο επόμενο μέρος της Τεχνικής Οδηγίας.

Στο σημείο αυτό θεωρείται ότι έχουν γίνει όλες οι απαραίτητες ενέργειες, έτσι ώστε να είναι δυνατή η έναρξη των εργασιών εγκατάστασης του ηλιακού συστήματος. Η Τεχνική Οδηγία στο παρόν μέρος της δίνει συστάσεις σχετικά με το τι πρέπει να ληφθεί υπόψη και πρέπει να προσεχθεί κατά την εγκατάσταση του Κ.Η.Σ. Λαμβάνει υπόψη στοιχεία όπως το χρονοδιάγραμμα εγκατάστασης, εξωτερικές εργασίες εδάφους/οροφής για τοποθέτηση βάσεων συλλεκτών, τις εσωτερικές εργασίες για τοποθέτηση ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και τις εργασίες τοποθέτησης σωληνώσεων, το απαραίτητο προσωπικό, την επίδραση των εργασιών εγκατάστασης σε άλλα εγκατεστημένα συστήματα και στους κατοίκους του κτιρίου, την συναρμολόγηση ορισμένων υποσυστημάτων επί τόπου, την προετοιμασία της θέσης εγκατάστασης. Δίνει στην συνέχεια οδηγίες και συστάσεις σχετικά με την εγκατάσταση όλων των τμημάτων του Κ.Η.Σ. (μηχανολογικά, ηλεκτρικά, στατικά, μετρητικός εξοπλισμός, κ.λ.π). Τέλος, δίνονται οδηγίες και συστάσεις για το καθαρισμό, την πλήρωση και την δοκιμή πίεσης σε όλες τις σωληνώσεις της εγκατάστασης καθώς και την σήμανση όλου του εξοπλισμού.

Κατά την εγκατάσταση του συστήματος πρέπει να γίνουν διάφοροι έλεγχοι για τα διαπιστωθεί εάν το σύστημα έχει εγκατασταθεί σύμφωνα με την μελέτη σχεδιασμού και τα

αντίστοιχα σχέδια. Η Τεχνική Οδηγία στο σημείο αυτό δίνει οδηγίες και συστάσεις για ελέγχους που πρέπει να γίνουν με την ολοκλήρωση της εγκατάστασης, Αυτοί περιλαμβάνουν την οπτική επιθεώρηση του συστήματος, ελέγχους μετά την πλήρωση του συστήματος και πριν την θέση του σε λειτουργία, την θέση του συστήματος σε λειτουργία και την καταγραφή των βασικών λειτουργικών δεδομένων.

Η Τεχνική Οδηγία στην συνέχεια δίνει οδηγίες και συστάσεις για τις ενέργειες που πρέπει να γίνουν σχετικά με τις δοκιμές που πραγματοποιούνται στο σύστημα έτσι ώστε να διαπιστωθεί ότι αυτό λειτουργεί κανονικά, στην βάση φύλλων ελέγχου. Οι δοκιμές αφορούν την κανονική εκκίνηση και απενεργοποίηση, την κανονική λειτουργία για παραγωγή ζεστού νερού, την απενεργοποίηση λόγω υπερθέρμανσης και την προστασία από τον παγετό.

Επόμενο μέρος της Τεχνικής Οδηγίας είναι οι αναφορές σχετικά με τις δοκιμές που πρέπει να γίνουν στο σύστημα έτσι ώστε να διαπιστωθεί ότι αυτό λειτουργεί σύμφωνα με την μελέτη σχεδιασμού. Οι δοκιμές είναι η δοκιμή Θερμικής Απόδοσης του συστήματος και η δοκιμή Συλλογής Ενέργειας, οι οποίες πραγματοποιούνται το σύστημα στην βάση Φύλλων Ελέγχου.

Για κάθε δοκιμή, σε αντίστοιχα παραρτήματα, δίνονται στοιχεία σχετικά με τον μετρητικό εξοπλισμό, τις συνθήκες δοκιμών, τις διαδικασίες, τους υπολογισμοί και την ανάλυση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων.

Η τεχνική Οδηγία σχετικά με την εγκατάσταση του Κ.Η.Σ. περιέχει τέλος αναφορές σχετικά με την εκπαίδευση των χρηστών του ΚΗΣ, τον στόχο των σεμιναρίων, ποιοι πρέπει να συμμετέχουν, πότε πρέπει να γίνονται, τι περιέχουν καθώς και τις διαδικασίες εκπαίδευσης χρηστών και συντηρητών του συστήματος.

5. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ

Η Τεχνική Οδηγία, για να είναι κοινά αποδεκτή και εφαρμόσιμη από όλους, πρέπει να είναι εγκεκριμένη από τους αρμόδιους φορείς. Στην παράγραφο αυτή προτείνεται διαδικασία που θα μπορούσε να ακολουθηθεί για την βέλτιστη ανάπτυξη και εφαρμογή της στην χώρα μας.

Η όλη διαδικασία θα μπορούσε να γίνει σε δύο φάσεις, όπου η πρώτη αφορά την ανάπτυξη και η δεύτερη την εφαρμογή της. Κατά την πρώτη φάση, μια αντίστοιχη επιτροπή του ΕΛΟΤ, η οποία θα απαρτίζεται από γνώστες του αντικειμένου, θα επεξεργαστεί το Σχέδιο Προτύπου, όπως αυτό ήδη αναπτύχθηκε από το «Εργαστήριο Ηλιακών – Ενεργειακών Συστημάτων» του ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ» στην βάση της παρούσας εργασίας. Προτείνεται να ακολουθηθεί η κανονική διαδικασία των Τεχνικών Επιτροπών του ΕΛΟΤ για την ανάπτυξη Προτύπων, το τελικό στάδιο της οποίας θα είναι το οριστικό κείμενο του Προτύπου Τεχνικής Οδηγίας Εγκατάστασης Κ.Η.Σ.

Η δεύτερη φάση της οδηγίας θα αφορά την διάδοση της οδηγίας καθώς και την εκπαίδευση των εγκαταστατών αλλά και άλλων ενδιαφερομένων. Αυτό μπορεί να γίνει με την οργάνωση ειδικών σεμιναρίων από αρμόδιους φορείς, όπως ο ΕΛΟΤ ή το ΤΕΕ. Τα σεμινάρια αυτά μπορούν να απευθύνονται κυρίως στους εγκαταστάτες των Κ.Η.Σ. αλλά και σε άλλους τεχνικούς οι οποίοι με κάποιο τρόπο εμπλέκονται στην εγκατάσταση των συστημάτων αυτών.

Παράλληλα θα ξεκινήσει η ενημέρωση των αρμόδιων φορέων της πολιτείας για την υποχρεωτική εφαρμογή της οδηγίας, ως όρος στα πλαίσια εθνικών προγραμμάτων στήριξης για εγκαταστάσεις Κ.Η.Σ.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάπτυξη Προτύπου Τεχνικής Οδηγίας Σχεδιασμού και Εγκατάστασης Κεντρικών Ηλιακών Συστημάτων, θεωρώντας την υφιστάμενη κατάσταση στην χώρα μας όσον αφορά την υπάρχουσα τεχνογνωσία, τον κατασκευαστικό κλάδο και την θέση της χώρας μας στον τομέα των θερμικών ηλιακών, θα εξασφαλίσει τον βέλτιστο σχεδιασμό τους αλλά και την άρτια εγκατάστασή τους, βάσει προτυποποιημένων διαδικασιών, παρέχοντας όλα τα οφέλη που αυτό συνεπάγεται όσον αφορά την ποιότητα και την αξιοπιστία τους. Η Τεχνική Οδηγία, η οποία θα καλύπτει το σύνολο της διαδικασίας σχεδιασμού και εγκατάστασης των συστημάτων, μπορεί να αποτελέσει απαιτούμενος όρος στα πλαίσια εθνικών προγραμμάτων εγκατάστασης Κ.Η.Σ. για την καλύτερη εφαρμογή της.

7. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. ESTIF “Sun In Action”, European Commission – DG XVII, ISBN 92-827-8720-6, EU, part I 1996, part II 2003
2. European Commission, SOLTHERM Project, “Quality Issues – Solar Thermal Installers”, www.soltherm.org
3. Solar Rating & Certification Corporation, “OG-300 Solar Water Heating System Installation Guidelines”, www.solar-rating.org
4. ASHRAE, “Active Solar Heating Systems Installation Manual”, ISBN 0-910110-78-6, USA, 1991
5. Β. Μπελεσιώτης, Ε. Μαθιουλάκης, «Θερμικά Ηλιακά Συστήματα – Ανάλυση και Σχεδιασμός», ΕΗ-ΕΣ/ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ», υπό έκδοση
6. European Commission, ALTENER Project “Dissemination of a European design tool for large solar hot water systems and upgrading into a certified instrument for the Netherlands”, Contract No: XVII/4.1030/Z/96-018, 1997-1999

ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΗΛΙΑΚΟ ΟΙΚΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΑΙΣΘΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΒΑΡΥΝΣΗΣ

Ε. Μαθιουλάκης και Β. Μπελεσιώτης

Εργαστήριο Ηλιακών & άλλων Ενεργειακών Συστημάτων, ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»,
15310 Αγία Παρασκευή Αττικής, e-mail : sollab@ipta.demokritos.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα έρευνα αφορά το σχεδιασμό, την κατασκευή και την ενεργειακή αξιολόγηση ενός νέου ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού χαμηλής αισθητικής επιβάρυνσης. Το σύστημα αυτό χαρακτηρίζεται από πλήρη αυτονομία, μειωμένη αισθητική επιβάρυνση λόγω της τοποθέτησης της δεξαμενής σε χαμηλό ύψος και ικανοποιητική ενεργειακή απόδοση. Η κυκλοφορία του θερμικού φορέα μεταξύ του ηλιακού συλλέκτη και της δεξαμενής γίνεται από κατάλληλα διαστασιολογημένο κυκλοφορητή χαμηλής ισχύος, τροφοδοτούμενο από επίσης κατάλληλα επιλεγμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο, με παράλληλη ελαχιστοποίηση των βοηθητικών ηλεκτρονικών διατάξεων. Παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας του συστήματος και συζητούνται οι δυνατές εναλλακτικές τεχνολογικές λύσεις. Περιγράφεται το πρωτότυπο που κατασκευάστηκε, αναλύονται τα πειραματικά αποτελέσματα από την λειτουργία του και αξιολογούνται οι συνολικές του ενεργειακές επιδόσεις. Συζητούνται τέλος τα σχετικά μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα του σε σύγκριση με ένα αντίστοιχο θερμοσιφωνικό σύστημα.

Λέξεις κλειδιά: Θερμικό ηλιακό σύστημα, ενεργειακή αξιολόγηση

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην Ελλάδα, όπως και στις υπόλοιπες μεσογειακές χώρες, όπου η συντριπτική πλειοψηφία των εγκατεστημένων συστημάτων είναι θερμοσιφωνικά, ένα από κυριότερα εμπόδια στην παραπέρα διάδοση των θερμικών ηλιακών είναι η αισθητική επιβάρυνση που προκαλούν, όταν αυτά τοποθετούνται στις οροφές των κατοικιών, κυρίως λόγω της αναγκαστικής τοποθέτησης των δεξαμενών θερμού νερού σε σημείο υψηλότερο του συλλέκτη. Δεν είναι άλλωστε λίγες οι περιπτώσεις που η επιβάρυνση αυτή οδηγεί στην απόρριψη της θερμικής ηλιακής ενέργειας, ειδικότερα σε οικισμούς ή περιοχές για τις οποίες είναι σε ισχύ συγκεκριμένοι αρχιτεκτονικοί περιορισμοί ή ακόμα στις περιπτώσεις μεμονωμένων χρηστών οι οποίοι δεν επιθυμούν να θυσιάσουν την αισθητική της κατοικίας τους για τα όποια ενεργειακά ανταλλάγματα.

Η βασική επιδίωξη μείωσης της αισθητικής επιβάρυνσης, μέσω της τοποθέτησης της ηλιακής δεξαμενής με τρόπο που να μην υπερβαίνει σε ύψος το επάνω μέρος του συλλέκτη, ακυρώνει το θερμοσιφωνικό χαρακτήρα του συστήματος και αναδεικνύει το πρόβλημα του τρόπου προώθησης του θερμικού φορέα, η κυκλοφορία του οποίου διασφαλίζει τη μεταφορά της συλλεγόμενης ηλιακής ενέργειας από τον συλλέκτη στη δεξαμενή. Η χρήση τυπικού συστήματος εξαναγκασμένης κυκλοφορίας συνιστά αποδεκτή και δοκιμασμένη εναλλακτική λύση, ειδικότερα όταν επιδιώκεται κάλυψη φορτίων θέρμανσης νερού και χώρων σε συνδυασμό με χρήση συμβατικής βοηθητικής πηγής, παρουσιάζει όμως ορισμένα μειονεκτήματα: σχετικά υψηλό κόστος αγοράς και συντήρησης, απαίτηση για αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, καθώς και πιθανές επιπλοκές από εσφαλμένη λειτουργία του συστήματος ελέγχου.

Η λύση που εξετάστηκε στα πλαίσια της παρούσας έρευνας συνίσταται στη χρήση μικρού Φ/Β στοιχείου το οποίο θα τροφοδοτεί με την αναγκαία ηλεκτρική ενέργεια ένα μικρό κυκλοφορητή συνεχούς ρεύματος. Πρόκειται δηλαδή για ένα σύστημα βεβαιασμένης κυκλοφορίας, το οποίο όμως δεν απαιτεί την σύνδεση σε συμβατικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον χαρακτηρίζεται από ένα αξιοσημείωτο ταυτοχρονισμό μεταξύ συλλογής θερμικής ηλιακής ενέργειας στον συλλέκτη και κυκλοφορίας του θερμικού φορέα.

Παρά το προφανές ενδιαφέρον της λύσης αυτής και το ότι κατά καιρούς έχουν εμφανιστεί ορισμένα εμπορικά προϊόντα, η συστηματική της διερεύνηση δεν φαίνεται να έχει απασχολήσει τη σχετική βιβλιογραφία. Πιθανή αιτία είναι τα προβλήματα κόστους και αξιοπιστίας που συνοδεύουν τη χρήση ηλεκτρονικών διατάξεων μετατροπής συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο, δεδομένου ότι μέχρι πρόσφατα μόνο AC αντλίες μικρής δυναμικότητας ήταν εμπορικά διαθέσιμες σε λογικές τιμές. Τα τελευταία όμως χρόνια υπήρξε ραγδαία ανάπτυξη στους κινητήρες μικρής ισχύος, συνεχούς ρεύματος, τεχνολογίας *brushless*, όπου οι γνωστές «ψήκτρες» έχουν αντικατασταθεί με ηλεκτρονικούς διακόπτες οι οποίοι ενεργοποιούνται από αισθητήρες θέσης (αισθητήρες hall), κυρίως λόγω της εκτεταμένης χρήσης τους στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές για την περιστροφή μαγνητικών δίσκων. Παράλληλα αναπτύχθηκαν, ως παράπλευρο προϊόν, και αντίστοιχες αντλίες συνεχούς ρεύματος, ιδιαίτερα χαμηλών απαιτήσεων συντήρησης και κόστους συμβατού με αυτό των θερμικών ηλιακών συστημάτων, οι οποίες άλλωστε χρησιμοποιούνται ευρέως για τη ψύξη ηλεκτρονικών διατάξεων [1, 2].

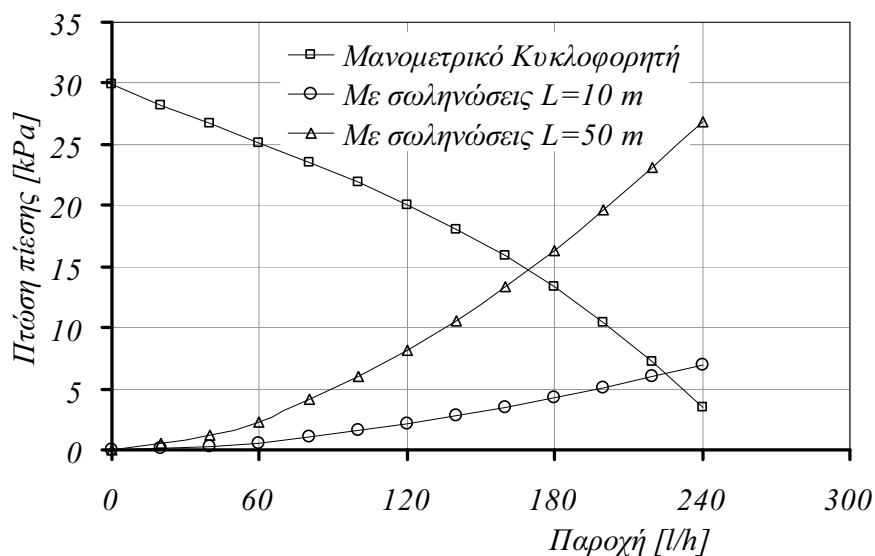
Στους στόχους της παρούσας διερεύνησης περιλαμβάνονται η σχεδίαση και ο ενεργειακός χαρακτηρισμός ενός θερμικού ηλιακού συστήματος εξαναγκασμένης κυκλοφορίας με χρήση ζεύγους Φ/Β γεννήτριας και κυκλοφορητή DC ιδιαίτερα μικρής ισχύος, σε απευθείας σύνδεση, χωρίς δηλαδή την παρεμβολή άλλων ηλεκτρονικών διατάξεων.

2. ΤΟ ΘΕΡΜΙΚΟ ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

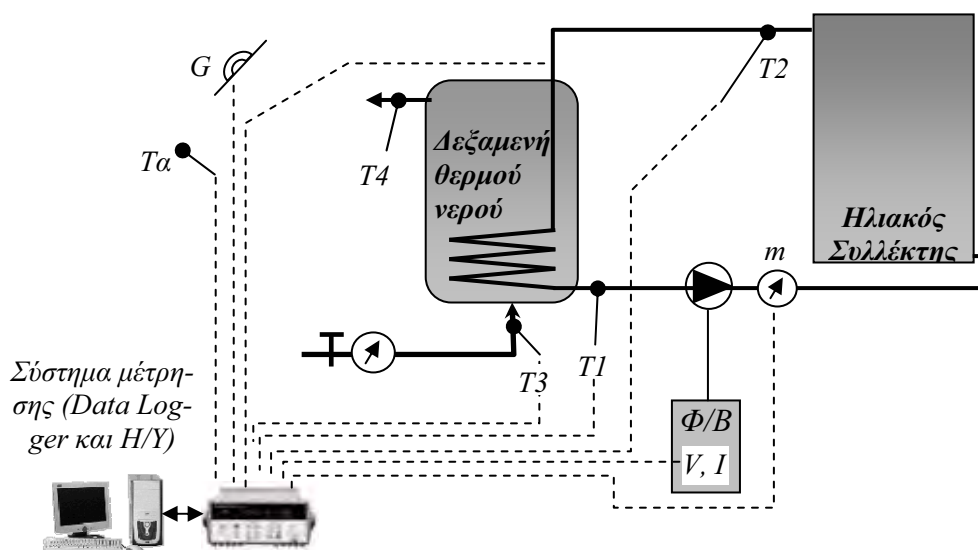
Για τις ανάγκες της έρευνας σχεδιάστηκε ένα πρωτότυπο ηλιακό σύστημα σε διάφορες εκδοχές, χρησιμοποιώντας ένα κοινό επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, ημι-επιλεκτικής βαφής, επιφάνειας παραθύρου $A_c=2.16 \text{ m}^2$, και μια δεξαμενή όγκου $V_s=170 \text{ l}$ με εσωτερικό πολυσωλήνιο εναλλάκτη θερμότητας. Η δεξαμενή τοποθετήθηκε σε κατακόρυφη θέση, με το υψηλότερο άκρο της να είναι χαμηλότερα από το υψηλότερο άκρο του συλλέκτη. Ως γεννήτριες ρεύματος χρησιμοποιήθηκαν εναλλακτικά δύο πάνελ ονομαστικής τάσης 12 V, ένα μέγιστης ισχύος 13 Wp και ένα άλλο των 5 Wp, συνολικής επιφάνειας $0,13 \text{ m}^2$ και $0,06 \text{ m}^2$ αντίστοιχα.

Χρησιμοποιήθηκε κυκλοφορητής τύπου *brushless* ονομαστικής τάσης 12 V, με μόνο κινούμενο μέρος το μαγνητικά οδηγούμενο στροφείο. Αν και η ονομαστική της ισχύς είναι 24 W, ο κυκλοφορητής αυτός έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει από μόλις 1 W. Στην περίπτωση που ο συγκεκριμένος κυκλοφορητής συνδεθεί με Φ/Β γεννήτρια, παρέχεται προαιρετικά η δυνατότητα αξιοποίησης της λειτουργίας στο σημείο μέγιστης ισχύος της γεννήτριας.

Στο Σχήμα 1 δίδεται η τυπική καμπύλη του κυκλοφορητή, σε συνδυασμό με την αναμενόμενη πτώση πίεσης στο κύκλωμα του θερμικού φορέα μεταφοράς της θερμότητας, για δύο διαφορετικές υποθετικές αποστάσεις συλλέκτη - δεξαμενής (διαφορετικά μήκη σωληνώσεων, ίδιος συλλέκτης, ίδια δεξαμενή). Από το διάγραμμα αυτό, αλλά και από τους σχετικούς υπολογισμούς, συνάγεται εύκολα ότι ο συγκεκριμένος κυκλοφορητής είναι κατάλληλος για ένα ευρύ φάσμα συνδυασμών συνολικής συλλεκτικής επιφάνειας και απόστασης της δεξαμενής - πεδίου συλλεκτών, δεδομένου ότι η συνιστώμενη παροχή του θερμικού φορέα είναι της τάξης των $50 \text{ l h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ [3]. Σημειώνεται ότι η υψομετρική διαφορά δεξαμενής - συλλεκτών δεν επηρεάζει την παροχή, στο βαθμό που το κύκλωμα είναι κλειστό και, κατά συνέπεια, το μανομετρικό του κυκλοφορητή καλείται να αντισταθμίσει μόνο την πτώση πίεσης στις σωληνώσεις.



Σχήμα 1. Τυπική καμπύλη του κυκλοφορητή (στα 12 V DC) και πτώση πίεσης στο κύκλωμα συλλέκτης - δεξαμενή



Σχήμα 2. Θερμικό ηλιακό σύστημα και πειραματική εγκατάσταση

Το σύστημα όπως διαμορφώθηκε τελικά φαίνεται παραστατικά στο Σχήμα 2, μαζί με τον εξοπλισμό μετρήσεων των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου από τον συλλέκτη ($T1$ και $T2$), των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου από την δεξαμενή ($T3$ και $T4$), της παροχής m θερμικού φορέα στον συλλέκτη, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_a , της ηλιακής ακτινοβολίας G , του ρεύματος I που παρέχεται από το Φ/B και την τάση με την οποία παρέρχεται το ρεύμα αυτό. Υπολογίζονται επίσης η προσδιδόμενη από το Φ/B ηλεκτρική ισχύς PeI , η θερμική ισχύς Pth και η θερμότητα Qth που συσσωρεύεται στη δεξαμενή.

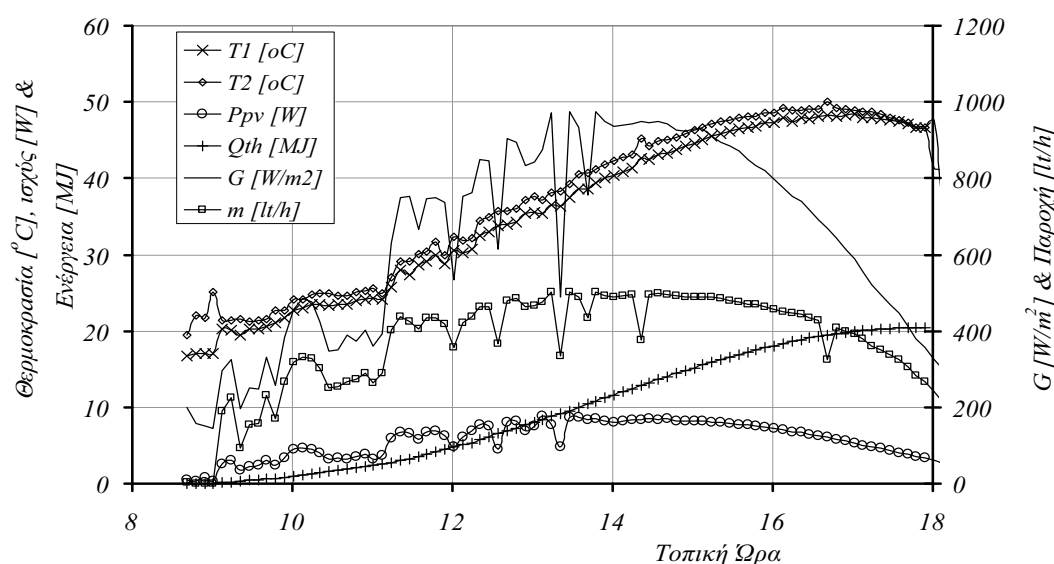
Για λόγους αξιοπιστίας και απλότητας στην κατασκευή, δεν χρησιμοποιήθηκε κανενός είδους εξοπλισμός ελέγχου του κυκλοφορητή, εκμεταλλευόμενοι την ικανότητα του συστήματος να

αυτορυθμίζει την κυκλοφορία του θερμικού φορέα. Πράγματι, τα φαινόμενα συλλογής θερμικών ηλιακών κερδών στο συλλέκτη και ενεργοποίησης του κυκλοφορητή από την Φ/Β γεννήτρια συμβαδίζουν χρονικά. Θεωρητικά βέβαια μπορούν να υπάρξουν και σύντομες χρονικές περίοδοι κυκλοφορίας του θερμικού φορέα με την θερμοκρασία στην δεξαμενή να είναι υψηλότερη αυτής του συλλέκτη, αυτές όμως κρίθηκαν ότι δεν θα επιβαρύνουν σημαντικά το συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Ροές μάζας και ενέργειας

Το σύστημα μετρήθηκε κατά τη διάρκεια μεγάλου αριθμού ημερήσιων κύκλων λειτουργίας, καθένας από τα οποίους περιελάμβανε ομογενοποίηση της ηλιακής δεξαμενής το πρωί, συσσώρευση της συλλεγόμενης ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας και, το βράδυ, απομάστευση της ενέργειας που συλλέχθηκε με επαναφορά της δεξαμενής στην αρχική θερμοκρασία. Σημειώνεται ότι τα σενάρια μετρήσεων που υλοποιήθηκαν είναι αυτά που προβλέπονται από τα σχετικά διεθνή πρότυπα για την ενεργειακή αξιολόγηση θερμικών ηλιακών συστημάτων [4, 5].

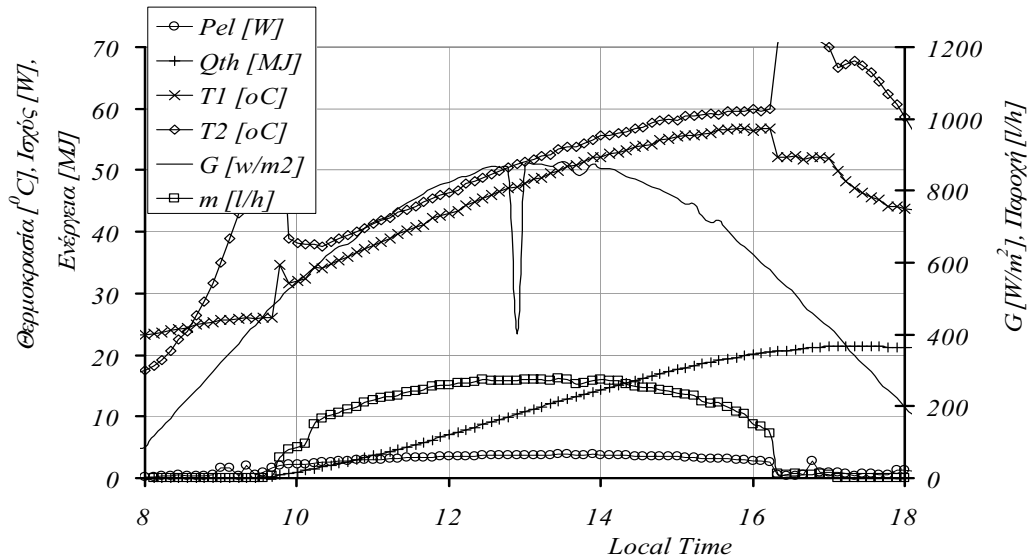


Σχήμα 3: Αποτελέσματα τυπικής σχετικά ηλιοφανούς ημέρας (Φ/Β γεν. 13 W)

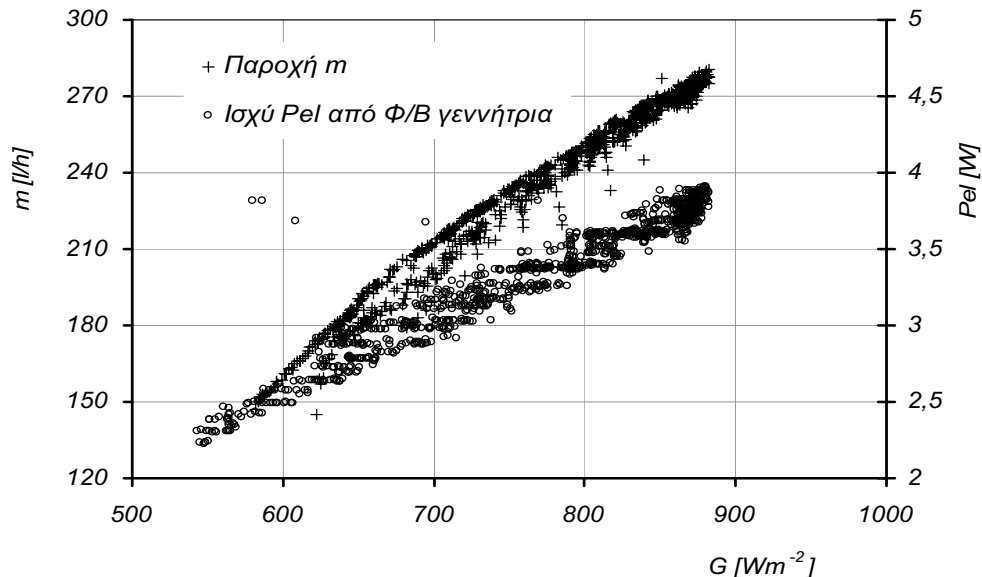
Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται αποτελέσματα από μια τυπική ημέρα, με το σύστημα να υποστηρίζεται από τη Φ/Β γεννήτρια των 13 W, ενώ στο Σχήμα 4 τα αντίστοιχα αποτελέσματα είναι με την γεννήτρια των 5 W. Από το σύνολο των πειραματικών δεδομένων μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα αρχικά συμπεράσματα όσον αφορά την εν γένει λειτουργία του συστήματος:

- Τόσο η μεγαλύτερης ισχύος Φ/Β γεννήτρια των 13 W, όσο και η μικρότερη των 5 W, εξασφαλίζουν μια πολύ ικανοποιητική κυκλοφορία του θερμικού φορέα. Από τα αποτελέσματα προκύπτει για παράδειγμα ότι μόλις 4 W ηλεκτρικής ισχύος είναι αρκετά για να διασφαλιστεί μια ροή της τάξης των $90\text{--}120\text{ l h}^{-1}\text{ m}^{-2}$, υπερδιπλάσια δηλαδή αυτής που συνήθως υιοθετείται σε ένα συμβατικό σύστημα βεβιασμένης κυκλοφορίας. Για το συγκεκριμένο

σύστημα ικανοποιητική ροή υπάρχει και με μόλις 2 W, με λογικό συμπέρασμα το ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί Φ/Β γεννήτρια μικρότερης ισχύος. Το ερώτημα όμως είναι εάν και κατά πόσο υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμες Φ/Β γεννήτριες αυτού του μεγέθους. Σε κάθε περίπτωση το συγκεκριμένο ζεύγος Φ/Β γεννήτριας - κυκλοφορητή φαίνεται να είναι επαρκές και για μεγαλύτερα συστήματα, συλλεκτικής επιφάνειας μέχρι και 6 m², υπό την προϋπόθεση της σωστής σχεδίασης του υδραυλικού κυκλώματος ώστε να αποφευχθεί η υπερβολική πτώση πίεσης στις σωληνώσεις και στον εναλλάκτη.



Σχήμα 4: Αποτελέσματα τυπικής ηλιοφανούς ημέρας (Φ/Β γεν. 5 W)



Σχήμα 5: Παροχή θερμικού φορέα και ισχύς που παρέχεται από την Φ/Β γεννήτρια ως συνάρτηση της ηλιακής ακτινοβολίας

- Παρά την απουσία διάταξης ελέγχου, παρατηρείται ικανοποιητική αυτορύθμιση του συστήματος. Διαπιστώνεται δηλαδή ένας αξιοσημείωτος ταυτοχρονισμός μεταξύ συλλογής

θερμότητας από τον συλλέκτη και ενεργοποίησης του κυκλοφορητή, με την παροχή του θερμικού φορέα να μεταβάλλεται ανάλογα με την διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια (Σχήμα 5). Συνδυάζονται κατά κάποιο τρόπο, τα πλεονεκτήματα ενός θερμοσιφωνικού ηλιακού συστήματος (αυτορυθμιζόμενη λειτουργία) με αυτά ενός συστήματος εξαναγκασμένης κυκλοφορίας.

- Δεν παρατηρήθηκαν σε καμία περίπτωση μετρήσιμες αρνητικές ροές θερμικής ενέργειας προς τη δεξαμενή, λειτουργία δηλαδή του κυκλοφορητή με τη θερμοκρασία στην έξοδο του συλλέκτη να είναι μικρότερη από αυτή της εισόδου. Υπό την έννοια αυτή, η παρουσία μιας θερμοστατικής διάταξης ρύθμισης (όπως αυτές που συνήθως χρησιμοποιούνται στα θερμικά ηλιακά συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας) δεν φαίνεται να είναι αναγκαία.

Αν και η προσομοίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του συστήματος στη βάση των θεωρητικών σχέσεων που περιγράφουν τη λειτουργία του Φ/Β, του κυκλοφορητή, του συλλέκτη και της δεξαμενής, είναι εφικτή, η πολυπλοκότητα των σχέσεων αυτών και η έλλειψη επαρκών πληροφοριών σε σχέση με βασικά τους χαρακτηριστικά, καθιστά το εγχείρημα ιδιαίτερα πολύπλοκο. Αντίθετα, οι μονοσήμαντες σχέσεις μεταξύ ηλιακής ακτινοβολίας από τη μία πλευρά και ισχύος που παρέχεται από την Φ/Β γεννήτρια ή παροχής από την άλλη (Σχήμα 5), επιτρέπει μια απλούστερη προσέγγιση βασισμένη στην ταυτοποίηση των εν λόγω σχέσεων με τη βοήθεια μετρήσεων σύντομης χρονικής διάρκειας και την εν συνεχεία χρήση τους για την προσομοίωση σε οποιοδήποτε συνθήκες.

3.2. Ενεργειακές επιδόσεις του συστήματος

Επιχειρήθηκε η αξιολόγηση των ενεργειακών επιδόσεων του συστήματος, σύμφωνα με τις διαδικασίες που προβλέπονται από τα σχετικά διεθνή πρότυπα, καταγράφοντας, μεταξύ άλλων, την αποδιδόμενη από το σύστημα ενέργεια στο τέλος της ημέρας Q , τη διαφορά DT μεταξύ της αρχικής θερμοκρασίας της δεξαμενής και της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας περιβάλλοντος και, τέλος, την ολική προσπίπτουσα στο επίπεδο του συλλέκτη ηλιακή ενέργεια H [4, 5]. Ορισμένα αποτελέσματα από χαρακτηριστικές ημέρες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 που ακολουθεί.

Η απευθείας σύγκριση των επιδόσεων μεταξύ του συστήματος με τη Φ/Β γεννήτρια των 13 W και αυτού με τη γεννήτρια των 5 W, δεν είναι δυνατή λόγω των διαφορετικών κλιματικών συνθηκών που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια των αντίστοιχων ημερών δοκιμών. Μπορεί όμως να γίνει έμμεσα, συγκρίνοντας την ενεργειακή απολαβή που μετρήθηκε με το Φ/Β των 13 W με αυτή που υπολογίζεται από τη χαρακτηριστική εξίσωση πρόσπτωσης-απολαβής του συστήματος, όπως αυτή προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των δοκιμών με το Φ/Β των 5 W. Από τη σύγκριση αυτή δεν προέκυψαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο διαμορφώσεων. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το ότι η μέση ταχύτητα του θερμικού φορέα στην περίπτωση της γεννήτριας των 5 W είναι ήδη αρκετά υψηλή και η περαιτέρω αύξησή της με τη χρήση της γεννήτριας των 10 W δεν προσφέρει ένα ουσιαστικό πλεονέκτημα [3, 6].

Η επεξεργασία του συνόλου των αποτελεσμάτων επιτρέπει την εκτίμηση της αναμενόμενης ενεργειακής απολαβής για κάθε δυνατή τοποθεσία λειτουργίας. Η απολαβή αυτή για την περιοχή των Αθηνών και με ελάχιστη θερμοκρασία απομάστευσης τους 40°C , στις συνθήκες δηλαδή που προβλέπονται από τον εθνικό Κανονισμό Πιστοποίησης, είναι 560 kWh/m^2 . Η απολαβή αυτή μπορεί να θεωρηθεί πολύ ικανοποιητική, αν ληφθεί μάλιστα υπόψη ότι χρησιμοποιήθηκε συλλέκτης με ημι-επιλεκτική βαφή.

Πίνακας Ι: Ημερήσια ενεργειακή απολαβή για χαρακτηριστικές ημέρες λειτουργίας

Ημερ.	DT [K]	H [MJ]	Q [MJ]	Ονομαστική ισχύς Φ/B
15/4/2008	3,16	24,26	21,28	13 W
12/4/2008	7,80	14,75	14,54	13 W
10/4/2008	2,97	21,90	20,15	13 W
11/4/2008	4,63	15,21	14,22	13 W
9/4/2008	3,52	22,12	20,38	13 W
1/5/2008	-0,51	26,75	23,32	5 W
2/5/2008	5,41	25,79	22,68	5 W
3/5/2008	4,25	26,51	22,28	5 W
4/5/2008	3,13	20,75	16,22	5 W
6/5/2008	-0,18	23,37	16,95	5 W
7/5/2008	-1,61	10,24	5,49	5 W
9/5/2008	3,83	19,12	16,29	5 W
13/5/2008	1,80	24,58	21,21	5 W
6/9/2008	3,40	23,00	22,82	5 W
10/9/2008	3,68	21,07	23,27	5 W
11/9/2008	2,48	22,28	24,54	5 W
12/9/2008	2,32	21,26	22,39	5 W
13/9/2008	3,46	13,89	17,02	5 W
14/9/2008	4,02	21,62	21,90	5 W
15/9/2008	0,68	16,01	17,48	5 W

4. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η συνολική αξιολόγηση του συστήματος οφείλει να συμπεριλάβει, εκτός από την ενεργειακή του απόδοση, και άλλα σημαντικά στοιχεία όπως η λειτουργικότητα, η αξιοπιστία των τεχνικών λύσεων που υιοθετήθηκαν και τα στοιχεία κόστους.

Στο επίπεδο της λειτουργικότητας τα πλεονεκτήματα είναι προφανή: δυνατότητα τοποθέτησης του συλλέκτη σε κεραμοσκεπές, δυνατότητα τοποθέτησης της δεξαμενής πίσω ή και σε απόσταση από τον συλλέκτη (για παράδειγμα σε κατώτερο όροφο), αυτορυθμιζόμενη λειτουργία χωρίς ανάγκη σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρισμού. Αναμφίβολα όμως το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι η χαμηλή αισθητική επιβάρυνση.

Στο επίπεδο της αξιοπιστίας δεν προδικάζεται οποιοδήποτε μειονέκτημα σε σχέση με ένα αντίστοιχο θερμοσιφωνικό σύστημα το οποίο θα χρησιμοποιούσε τους ίδιους συλλέκτες και την ίδια δεξαμενή. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι το υπό διερεύνηση σύστημα δεν εμφανίζει τα φαινόμενα αντίστροφης ροής που τόσο συχνά χαρακτηρίζουν τα θερμοσιφωνικά συστήματα. Σε σχέση όμως με ένα αντίστοιχο βεβιασμένης κυκλοφορίας παρουσιάζει ορισμένα προφανή πλεονεκτήματα που σχετίζονται με την απλότητα στη λειτουργία, καθώς και με την απουσία αισθητηρίων, διατάξεων ελέγχου και πρόσθετων ρυθμίσεων που συχνά είναι αιτία δυσλειτουργιών. Στην πράξη, το μόνο ιδιαίτερο σημείο από το οποίο θα μπορούσαν να προκύψουν προβλήματα αξιοπιστίας είναι ο κυκλοφορητής, τα χαρακτηριστικά όμως του οποίου διασφαλίζουν μια απριόρι απρόσκοπτη λειτουργία για πολλά χρόνια.

Το πραγματικά στοιχείο κόστους δεν μπορούν να προσδιοριστούν με ακρίβεια στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, δεδομένου ότι πρόκειται για ένα πρωτότυπο σύστημα και το πραγματικό κόστος θα είναι αρκετά διαφορετικό στην περίπτωση ενός προϊόντος που θα κατασκευάζονταν σε γραμμή παραγωγής. Από τα διαθέσιμα στοιχεία μπορεί ωστόσο να εκτιμηθεί ότι το κόστος θα ήταν ελαφρά μεγαλύτερο ενός αντίστοιχου θερμοσιφωνικού και μικρότερο ενός αντίστοιχου εξαναγκασμένης κυκλοφορίας.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η απάντηση στο βασικό ζητούμενο της έρευνας, που αφορά την επιβεβαίωση ότι μία μικρής ισχύος Φ/Β γεννήτρια, της τάξης των λίγων watts, απευθείας συνδεδεμένη με κατάλληλο κυκλοφορητή συνεχούς ρεύματος, είναι ικανή να διασφαλίσει την απαραίτητη κυκλοφορία του θερμικού φορέα σε ένα τυπικό θερμικό ηλιακό σύστημα, είναι σαφώς καταφατική. Το σύστημα που αξιολογήθηκε χαρακτηρίζεται από απλότητα στην κατασκευή και την τοποθέτηση, αυτορυθμιζόμενη λειτουργία και ικανοποιητικές ενεργειακές επιδόσεις. Το σημαντικότερο όμως πλεονέκτημα είναι στην χαμηλή αισθητική επιβάρυνση που συνεπάγεται η τοποθέτηση του στην ατομική κατοικία, λόγω της δυνατότητας τοποθέτησης της ηλιακής δεξαμενής σε απόσταση από το συλλεκτικό πεδίο.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή υποστηρίχτηκε από την ΓΓΕΤ, στα πλαίσια εκτέλεσης ερευνητικού έργου Διακρατικής Συνεργασίας που υλοποιήθηκε σε συνεργασία με την επιχείρηση ΓΑΜΠΕΡΑΚΗΣ Γ & ΣΙΑ Ο.Ε (Γ' ΚΠΣ, 2000-2006, Δράση: Διεθνής Επισημονική και Τεχνολογική Συνεργασία)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Malcolm Stone (1995), *Electric motors for small pump applications*, World Pumps, 1995 (346), Pages 40-43.
- [2] James H. W, Beaty L. K. (1998), *Electric Motor Handbook*, McGraw-Hill Professional
- [3] Duffie J. A. and Beckman W. A. (1991). In 2nd edn, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley, New York.
- [4] ISO (1995), ISO 9459-2: Solar Heating – Domestic water heating systems – Part 2: Outdoor test methods for system performance characterization and yearly performance prediction of solar-only systems, ISO Editions, Switzerland.
- [5] CEN (2006). EN 12976-2: Thermal Solar Systems and Components. Factory Made Systems – Part 2: Test Methods, CEN Editions, Brussels.
- [6] Belessiotis V. and Mathioulakis E. (2002), Analytical approach of thermosyphon solar domestic hot water systems performance, *Solar Energy*, 72(4), Pages 307-315

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ INPUT-OUTPUT ΣΕ ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ

Ε. Καλούδης¹, Ι. Γ. Καούρης², Ε. Μαθιουλάκης¹ και Β. Μπελεσιώτης¹

¹ Εργαστήριο Ηλιακών & άλλων Ενεργειακών Συστημάτων, ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»,
15310 Αγία Παρασκευή Αττικής, e-mail : sollab@ipta.demokritos.gr

² Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τ.Κ. 26500 Πάτρα, e-mail: caouris@helios.mech.upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η συγκριτική αξιολόγηση δύο μεθόδων ενεργειακού χαρακτηρισμού Ηλιακών Συστημάτων Θέρμανσης Νερού (ΗΣΘΝ), της Δυναμικής Μεθόδου (DST) και της μεθόδου Input Output (CSTG). Εν πρώτοις περιγράφεται η αρχή λειτουργίας της κάθε μεθόδου και η αντίστοιχη μεθοδολογία εκτέλεσης των δοκιμών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα δεδομένα από τη δοκιμή ενός ΗΣΘΝ, ακολουθώντας το πειραματικό πρωτόκολλο και των δύο μεθόδων. Αφού υπολογισθούν οι χαρακτηριστικές παράμετροι του συστήματος για κάθε μια από τις δύο μεθόδους, διεξάγεται πρόβλεψη της ετήσιας ενεργειακής απολαβής με διαδικασίες για τυπικές κλιματολογικές συνθήκες. Τέλος, παρουσιάζεται συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων, τόσο σε επίπεδο αποτελεσμάτων, όσο και σε επίπεδο λειτουργικότητας και ευχρηστίας.

Λέξεις κλειδιά: Θερμικά ηλιακά συστήματα, Μέθοδοι δοκιμών

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αξιόπιστη αποτύπωση των ενεργειακών επιδόσεων ηλιακών θερμικών συστημάτων συνιστά ζητούμενο, τόσο για τον κατασκευαστή, ο οποίος επιθυμεί να γνωρίσει τις επιδόσεις και τις ενδεχόμενες παθολογίες του προϊόντός του, όσο και για τον υποψήφιο χρήστη, ο οποίος θέλει να βασίσει τις επιλογές του σε πραγματικά στοιχεία κόστους – οφέλους. Με βάση τις παραπάνω ανάγκες έχουν δημιουργηθεί διάφορες μέθοδοι ενεργειακής αξιολόγησης ηλιακών θερμικών συστημάτων, οι οποίες οφείλουν να είναι κοινά αποδεκτές σε διεθνές επίπεδο, ειδικότερα δε εφόσον πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στα πλαίσια της πιστοποίησης και της ενεργειακής σήμανσης των προϊόντων. Οι δυο μέθοδοι που τυγχάνουν ευρείας διεθνούς αποδοχής όντας ενταγμένες σε διεθνή πρότυπα, είναι η Δυναμική μέθοδος [1], [2] και η μέθοδος Input Output [2], [3]. Όπως είναι φυσιολογικό, τίθεται ζήτημα σύγκρισης των 2 μεθόδων. Σε αυτή την κατεύθυνση κινήθηκε και το ευρωπαϊκό πρόγραμμα ‘Bridging the gap’ κατά το οποίο, σε διάφορα ευρωπαϊκά εργαστήρια αξιολογήθηκε ένας μεγάλος αριθμός ηλιακών θερμικών συστημάτων [4]. Η σύγκριση όμως έγινε αποκλειστικά για την πρόβλεψη της ετήσιας ενεργειακής απολαβής. Η παρούσα εργασία επιδιώκει και την σύγκριση σε επίπεδο λειτουργικότητας και χρηστικότητας. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, στο Εργαστήριο Ηλιακών και άλλων Ενεργειακών Συστημάτων του ΕΚΕΦΕ ‘Δημόκριτος’ εγκαταστάθηκε ένα ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού στο οποίο πραγματοποιήθηκαν σειρές μετρήσεων και για τις δυο μεθόδους (Δυναμική, Πρόσπτωσης - Απολαβής) ενεργειακού χαρακτηρισμού, όπως ακριβώς προβλέπεται μέσα από το πειραματικό πρωτόκολλο της κάθε μιας.

2. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΩΝ

2.1 Μέθοδος Input Output

2.1.1 Αρχή λειτουργίας Input output

Η μέθοδος, αντιμετωπίζει τη λειτουργία του συστήματος συνολικά και όχι σαν άθροισμα επιμέρους θερμικών διεργασιών. Περιλαμβάνει μια σειρά από ημερήσιες δοκιμές σε ολόκληρο το σύστημα, μαζί με μια σύντομη χρονικά δοκιμή για τον προσδιορισμό του βαθμού της ανάμειξης της δεξαμενής κατά τη διάρκεια της απομάστευσης και άλλη μια νυχτερινή δοκιμή για τον προσδιορισμό του συντελεστή απωλειών της δεξαμενής. Η απόδοση ενός οικιακού ηλιακού συστήματος παραγωγής ζεστού νερού αντιπροσωπεύεται από την εξίσωση $Q = a_1 H_d + a_2 (T_{a(day)} - T_{mains}) + a_3$ (όπου: Q [MJ] η ενέργεια που προστίθεται στη δεξαμενή κατά τη διάρκεια της ημέρας, H_d [MJ/m²] η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του συλλέκτη, $T_{a(day)}$ [°C] η μέση ημερήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος, T_{mains} [°C] η θερμοκρασία της δεξαμενής στην αρχή της ημέρας, που συμπίπτει με τη θερμοκρασία δικτύου) οι συντελεστές της οποίας υπολογίζονται με βάση τις παραπάνω μετρήσεις. Με βάση την εξίσωση της απόδοσης και του συντελεστή απωλειών της δεξαμενής, γίνεται και ο υπολογισμός της μακροχρόνιας απολαβής του συστήματος.

2.1.2 Διαδικασία Δοκιμών

2.1.2.1 Υπολογισμός της ημερήσιας απόδοσης

Η διαδικασία αυτή αποτελείται από ένα αριθμό ημερήσιων δοκιμών που είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Στην αρχή κάθε ημερήσιας δοκιμής το σύστημα ομογενοποιείται με παροχή νερού γνωστής θερμοκρασίας (T_{mains}). Από τις 06.00 μέχρι της 18.00 (ηλιακή ώρα και ανεξάρτητα από την ώρα δύσης του ήλιου, αυτό ελαττώνει την εξάρτηση με το μήκος κάθε ημέρας) το σύστημα αφήνεται να λειτουργήσει μετρώντας παράλληλα και την ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ο συλλέκτης H_d (input). Οι ημερήσιες δοκιμές πρέπει να έχουν ένα εύρος όσον αφορά τις τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (8 MJ/m² – 25 MJ/m²) και τις τιμές ($T_{a(day)} - T_{mains}$) από -5 °C έως +20 °C ώστε με αυτόν τον τρόπο οποιαδήποτε εξάρτηση του συστήματος από αυτές τις παραμέτρους να εντοπιστεί. Στο τέλος της ημέρας απομαστεύεται νερό με όγκο ίσο με 3 φορές τον όγκο της δεξαμενής, ενώ ταυτόχρονα εισέρχεται στη δεξαμενή κρύο νερό σταθερής θερμοκρασίας T_{mains} (ίδιας θερμοκρασίας με αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την πρωινή ομογενοποίηση της δεξαμενής). Με αυτή την διαδικασία της απομάστευσης υπολογίζεται η ενέργεια Q (output) που αποθήκευσε το σύστημα στη διάρκεια της ημέρας.

2.1.2.2 Υπολογισμός του βαθμού ανάμειξης στη δεξαμενή κατά τη διάρκεια της απομάστευσης

Το νερό της δεξαμενής ζεσταίνεται και ομογενοποιείται σε θερμοκρασία άνω των 60 °C, ενώ ο συλλέκτης είναι σκεπασμένος. Πραγματοποιείται απομάστευση όγκου νερού ίσου με 3 φορές τον όγκο της δεξαμενής (V_s). Το κρύο νερό T_{mains} που εισέρχεται στη δεξαμενή πρέπει να είναι σταθερής θερμοκρασίας κάτω από 30 °C. Με αυτή τη διαδικασία υπολογίζεται η κατανομή απομάστευσης, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της μακροχρόνιας απολαβής αλλά και σαν κριτήριο για τον βαθμό διαστρωμάτωσης της δεξαμενής.

2.1.2.3 Υπολογισμός των θερμικών απωλειών της δεξαμενής

Ο συντελεστής θερμικών απωλειών της δεξαμενής U_s , καθορίζεται από μια ξεχωριστή σειρά μετρήσεων κατά την οποία καταγράφεται η πτώση της θερμοκρασίας του νερού της δεξαμενής κατά τη διάρκεια της νύχτας, αφού η δεξαμενή προηγουμένως έχει γεμίσει με

ζεστό νερό. Μια πανομοιότυπη σειρά μετρήσεων πραγματοποιείται αλλά με τον συλλέκτη αποσυνδεδεμένο, ώστε εξασφαλίζετε το γεγονός ότι δεν υπάρχει ανάστροφη ροή κατά τη διάρκεια της νύχτας.

2.1.3 Προσδιορισμός της μακροχρόνιας απολαβής του συστήματος

Έχοντας προσδιορίσει τους συντελεστές της εξίσωσης $Q=a_1H_d+a_2(T_{a(day)}-T_{mains})+a_3$, υπάρχει πλέον η δυνατότητα να υπολογισθεί για οποιαδήποτε ημέρα του χρόνου η απόδοση του συστήματος, με βάση τα κλιματολογικά δεδομένα κάθε ημέρας και τον όγκο του ζεστού νερού που καταναλώνεται. Η μακροχρόνια απολαβή υπολογίζεται από το άθροισμα της προσφερόμενης από το σύστημα ενέργειας, για κάθε ημέρα (μέθοδος day by day), για το χρονικό διάστημα στο οποίο γίνεται ο υπολογισμός. Στους υπολογισμούς συμπεριλαμβάνονται και η απώλεια ενέργειας κατά τη διάρκεια της νύχτας λόγω θερμικών απωλειών της δεξαμενής, άλλα και η ενέργεια που ενδέχεται να έχει παραμείνει στη δεξαμενή από την προηγούμενη ημέρα.

2.2 Δυναμική Μέθοδος

2.2.1 Αρχή Λειτουργίας Δυναμικής Μεθόδου

Σύμφωνα με τη δυναμική μέθοδο, ένα ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού μπορεί να περιγραφεί με μια διαφορική εξίσωση οι όροι της οποίας αντιπροσωπεύουν τις επιμέρους διεργασίες του συστήματος. Στόχος είναι ο υπολογισμός των συντελεστών του κάθε όρου της εξίσωσης (παράμετροι συστήματος). Αυτό επιτυγχάνεται αφήνοντας το σύστημα να δουλέψει σε μια ευρεία περιοχή συνθηκών λειτουργίας (ώστε να ελαττωθούν οι τυπικές αποκλίσεις στις παραμέτρους του συστήματος που υπολογίζονται) και στη συνέχεια ένα λογισμικό υπολογίζει τις παραμέτρους του συστήματος χρησιμοποιώντας κατάλληλα μαθηματικά εργαλεία για τη προσαρμογή των παραμέτρων σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις. Στη συνέχεια οι αναγνωριζόμενες παράμετροι χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της μακρόχρονης λειτουργίας του συστήματος που εξετάζεται, για οποιεσδήποτε κλιματικές συνθήκες και συνθήκες φορτίου χρησιμοποιώντας τοπικά κλιματολογικά δεδομένα εισόδου.

2.2.2 Διαδικασία Δοκιμών

2.2.2.1 Μετρήσεις ημερήσιας σειράς δοκιμών (Ssol)

Μια σειρά δοκιμών αποτελείται από ένα αριθμό συνεχόμενων ημερήσιων μετρήσεων με συνεχή λειτουργία του συστήματος. Αυτό γίνεται σύμφωνα με ένα λογισμικό που βασίζεται σε δυο ειδικές ημερήσιες λειτουργικές συνθήκες που ονομάζονται Test A και Test B. Αυτές οι ημερήσιες δοκιμές λαμβάνουν υπόψη τους τις ειδικές διαστάσεις του συστήματος όπως π.χ. όγκος δεξαμενής και επιφάνεια συλλέκτη. Για τη σειρά μετρήσεων Ssol απαιτούνται τουλάχιστον 3 ημέρες τύπου A (οι οποίες είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να διατηρούν το σύστημα του συλλέκτη κρύο και κατά συνέπεια να λειτουργεί σε υψηλές αποδόσεις) και άλλες 3 ημέρες τύπου B (οι οποίες διατηρούν το σύστημα του συλλέκτη σε υψηλή θερμοκρασία ώστε να λειτουργεί σε χαμηλές αποδόσεις), ενώ η ημερήσια ακτινοβολία στη επιφάνεια του συλλέκτη πρέπει να υπερβαίνει τα 12 MJm^{-2} .

2.2.2.2 Απώλειες δεξαμενής (Sstore)

Αυτή η σειρά μετρήσεων έχει σαν σκοπό τον υπολογισμό του συντελεστή απωλειών της δεξαμενής. Αρχικά ομογενοποιείται η δεξαμενή και στη συνέχεια θερμαίνεται ύστερα από λειτουργία του συστήματος κάτω από τις συνθήκες που ορίζονται από τη σειρά Test B.

Κατόπιν με σκεπασμένο τον συλλέκτη αφήνουμε να ψυχθεί η δεξαμενή για 36 με 48 ώρες. Στο τέλος της δόκιμης ομοιογενοποιείται η δεξαμενή.

2.2.3 Αναγνώριση Παραμέτρων του Συστήματος

Η αναγνώριση των παραμέτρων του συστήματος επιτυγχάνεται με χρήση του λογισμικού Insitu Software package – version 2.7 [5] με διαδικασία δυναμικής προσαρμογής (Dynamic Fitting Procedure), χρησιμοποιώντας όλα τα δεδομένα από όλες τις σειρές μετρήσεων.

2.2.4 Προσδιορισμός της μακροχρόνιας απολαβής του συστήματος

Γνωρίζοντας τις παραμέτρους του συστήματος, είναι εφικτή η πρόβλεψη της ενεργειακής κατάστασης έχοντας σαν δεδομένα εισόδου, κλιματολογικά δεδομένα μιας περιοχής. Έτσι για τον προσδιορισμό της μακροχρόνιας απολαβής του συστήματος χρησιμοποιείται ένα αντίστοιχο υπολογιστικό πρόγραμμα με αυτό που χρησιμοποιήθηκε για την αναγνώριση των παραμέτρων με τη διαφορά ότι α) δέχεται την παραδοχή ότι η θερμοκρασία του νερού της δεξαμενής είναι μεγαλύτερη από αυτή του νερού του δικτύου β) Θεωρεί ένα θερμοστατικό αναδευτήρα ο οποίος ελαττώνει τη θερμοκρασία του φορτίου T_L στη θερμοκρασία ζήτησης T_D γ) Το κύκλωμα του συλλέκτη σταματάει για θερμοκρασίες αποθήκευσης που ξεπερνούν τους 100 °C.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Για την σύγκριση των 2 μεθόδων επιλέχθηκε ένα θερμοσιφωνικό σύστημα το οποίο αποτελείται από ένα επίπεδο συλλέκτη επιλεκτικής βαφής, με συνολικό εμβαδόν 2.45 m² και εμβαδόν απορροφητή 2.31 m² και μια δεξαμενή αποθήκευσης νερού όγκου 201 [lt]. Σε αυτό το σύστημα πραγματοποιήθηκε μια σειρά μετρήσεων με τη μέθοδο Input Output και δυο σειρές μετρήσεων (Sequence 1, Sequence 2) με τη Δυναμική μέθοδο. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ηλιακών και άλλων Ενεργειακών Συστημάτων του ΕΚΕΦΕ ‘Δημόκριτος’.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Προσδιορισμός χαρακτηριστικών παραμέτρων του συστήματος

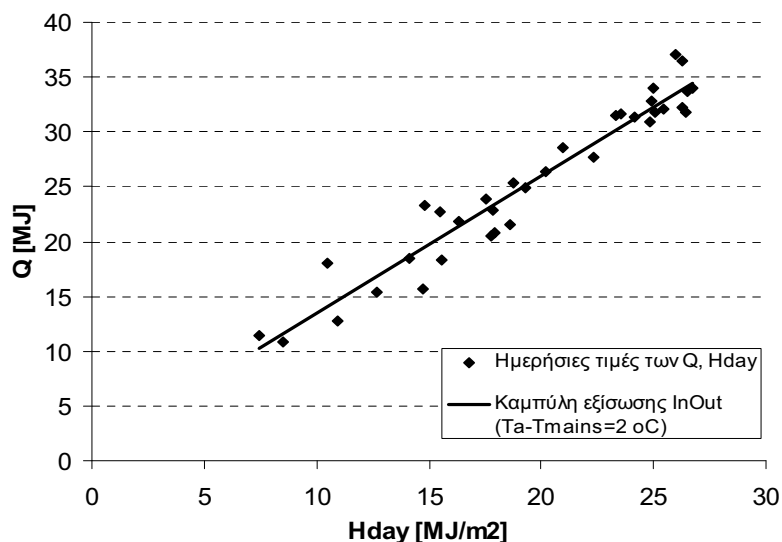
4.1.1 Μέθοδος Input Output

Κάθε μια από τις ημερήσιες δοκιμές της μεθόδου αντιπροσωπεύει ένα σημείο στη γραφική παράσταση (Σχήμα 1) μεταξύ της ημερήσιας ενεργειακής απολαβής (Q) και της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας (H_d).

Οι συντελεστές a_1 , a_2 , a_3 της εξίσωσης $Q = a_1 H + a_2 (T_{a(day)} - T_{mains}) + a_3$ για το σύστημα καθορίζονται από τα αποτελέσματα των δοκιμών χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Στην παραπάνω εξίσωση ο συντελεστής a_1 [m²] δείχνει το πόσο αποδοτικό είναι το σύστημα ανά μονάδα επιφάνειας. Ο συντελεστής a_2 [MJ K⁻¹] σχετίζεται με τις θερμικές απώλειες του συστήματος κατά τη διάρκεια της ημέρας και τέλος ο συντελεστής a_3 [MJ] λαμβάνει υπ όψιν του φαινόμενα αδράνειας.

Πίνακας 1: Συντελεστές της εξίσωσης απόδοσης του συστήματος

$Q = a_1 H + a_2 (T_{a(day)} - T_{mains}) + a_3$							
a_1	a_2	a_3	Σa_1	σa_2	σa_3	R^2	σQ
1.235	0.610	0.069	0.027	0.054	0.545	0.987	0.879



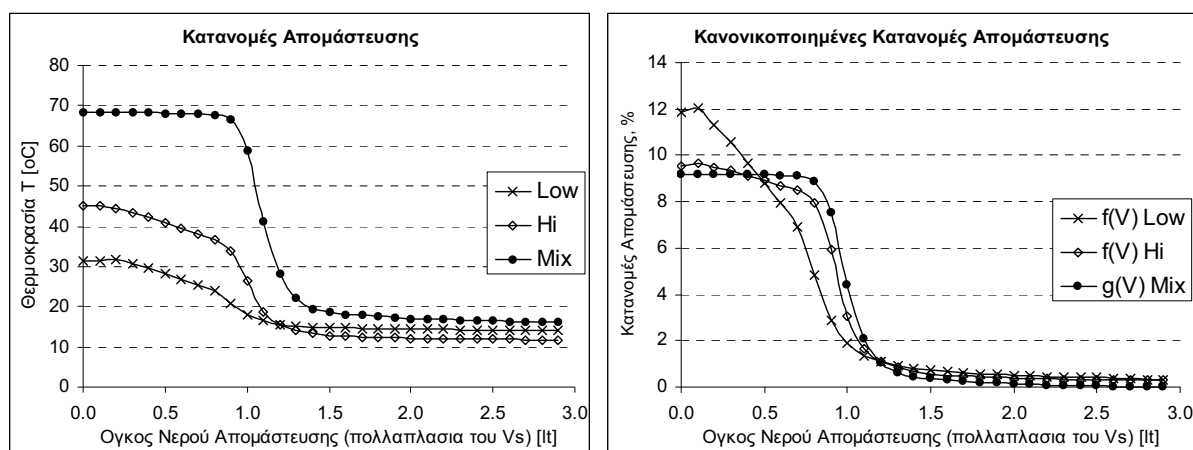
Σχήμα 1: Η καμπύλη απόδοσης του συστήματος

Οι δυο δοκιμές για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμικών απωλειών της δεξαμενής έδωσαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

$U_{se} = 2.4 \text{ (W K}^{-1}\text{)}$ για τη δοκιμή απωλειών με το συλλέκτη συνδεδεμένο.

$U_s = 2.3 \text{ (W K}^{-1}\text{)}$ για τη δοκιμή απωλειών χωρίς το συλλέκτη συνδεδεμένο.

Από τις ημερήσιες δοκιμές επιλέγονται 2 ημέρες, μια με σχετικά χαμηλή ακτινοβολία $8 \text{ MJ/m}^2 - 16 \text{ MJ/m}^2$ (Low) και μια ημέρα με σχετικά υψηλή ακτινοβολία $16 \text{ MJ/m}^2 - 25 \text{ MJ/m}^2$ (High), για τις οποίες μαζί με την κατανομή απομάστευσης από τη δοκιμή ανάμειξης (Mix) χαράσσονται τα διαγράμματα κατανομών απομάστευσης. Για τις ίδιες περιπτώσεις σχεδιάζεται και το αντίστοιχο διάγραμμα κανονικοποιημένων κατανομών ($f(V)$ Low, $f(V)$ High και $g(V)$ Mix). Οι κανονικοποιημένες κατανομές χρησιμοποιούνται από τη μέθοδο υπολογισμού της ετήσιας ενεργειακής απολαβής.



Σχήμα 2: Κατανομές απομάστευσης και κανονικοποιημένες κατανομές απομάστευσης

4.1.2 Δυναμική μέθοδος

Οι παράμετροι του συστήματος οι οποίες υπολογίζονται (Πίνακας 2) από το λογισμικό της Δυναμικής μεθόδου είναι, η ενεργός επιφάνεια συλλέκτη ($A_c^* \text{ [m}^2\text{]}$), ο ενεργός συντελεστής θερμικών απωλειών συλλέκτη ($u_c^* \text{ [W m}^{-2} \text{ K}^{-1}\text{]}$), ο ολικός θερμικός συντελεστής απωλειών

δεξαμενής (U_{sc} [$W K^{-1}$]), η θερμική χωρητικότητα δοχείου αποθήκευσης (C_s [$MJ K^{-1}$]), ο συντελεστής ανάμειξης απομάστευσης (D_L , παίρνει την τιμή 0 εάν δεν υπάρχει καθόλου ανάμειξη και μέγιστη τιμή το 5 για πλήρως αναμεμειγμένη δεξαμενή) και η παράμετρος διαστρωμάτωσης του ηλιακού κυκλώματος (S_c)

Πίνακας 2 : Παράμετροι του συστήματος από την Δυναμική μέθοδο

Παράμετροι Συστήματος	Sequence 1	Sequence 2
A_C^* [m^2]	1.568	1.696
u_C^* [$W m^{-2} K^{-1}$]	6.481	8.347
U_{sc} [$W K^{-1}$]	2.171	2.411
C_s [$MJ K^{-1}$]	0.967	0.966
D_L	0.065	0.106
S_c	0.206	0.263

4.2 Πρόβλεψη ετήσιας ενεργειακής απολαβής

Οι υπολογισμοί για την ετήσια ενεργειακή απολαβή έγιναν με τις παραδοχές ότι κάθε ημέρα στις 18.00 γίνεται μια απομάστευση για διάφορους όγκους νερού (80, 110, 140, 170, 200, 250, 300 [lt]) θερμοκρασίας 45 °C. Χρησιμοποιήθηκαν τα κλιματολογικά δεδομένα 4 πόλεων: Athens (38.0° N), Davos (46.5° N), Wuerzburg (49.5° N), Stockholm (59.2° N). Στον **Πίνακας 3** παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα της μεθόδου Input Output και των 2 σειρών δοκιμών της Δυναμικής μεθόδου (Seq1, Seq2).

Πίνακας 3: Αποτελέσματα για την πρόβλεψη της ετήσιας ενεργειακής απολαβής

Ημερήσια Κατανάλωση [lt/day]	Ετήσια Ενεργειακή Απολαβή [MJ]											
	Athens (38,0° N)			Davos (46,5° N)			Wuerzburg (49,5° N)			Stockholm (59,2° N)		
	In	Out	Seq1	In	Out	Seq1	In	Out	Seq1	In	Out	Seq1
80	2319.3	3216.7	3185.1	3169.2	4446.6	4320.4	2215.6	3185.1	3112.6	2065.1	3090.5	3008.5
110	3180.7	4320.4	4257.4	4088.5	5708.0	5581.9	2903.8	4099.7	4005.1	2699.8	3973.5	3878.9
140	4233.3	5298.0	5235.0	5356.2	6717.2	6591.0	3780.8	4856.6	4761.9	3522.0	4698.9	4604.3
170	5025.2	6212.6	6149.5	6121.2	7505.6	7411.0	4320.6	5424.2	5361.1	4088.5	5298.0	5235.0
200	5814.1	7000.9	6937.9	7046.0	8073.2	8073.2	4957.3	5865.7	5834.2	4699.6	5739.5	5739.6
250	6708.0	8041.7	8041.7	7467.8	8609.3	8703.9	5387.9	6338.7	6401.8	5125.6	6181.0	6244.1
300	7343.4	8640.9	8767.0	7628.1	8798.6	8987.8	5584.2	6527.9	6654.1	5294.5	6370.3	6496.4

5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

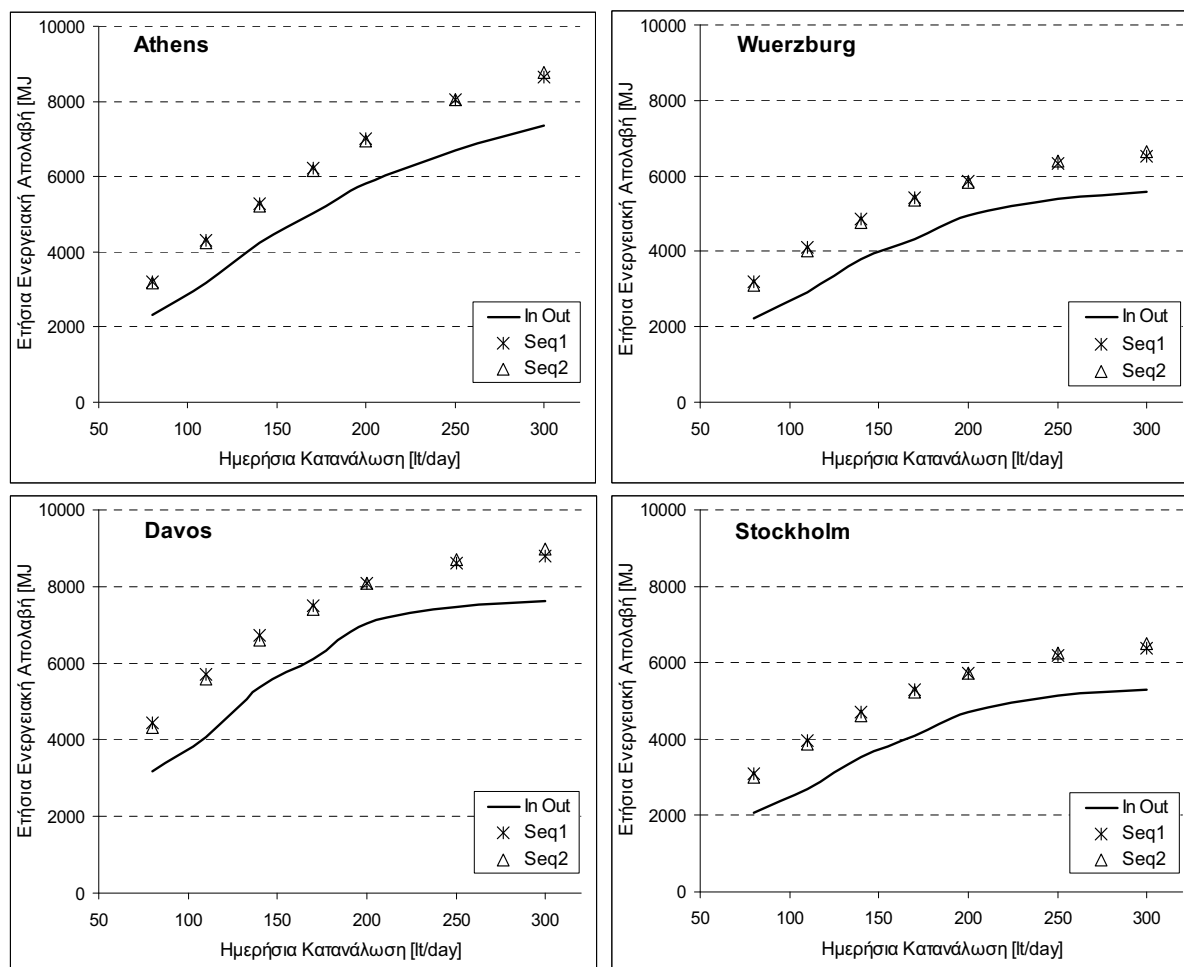
Σκοπός της παρούσας εργασίας δεν είναι να αναδείξει ποια από τις 2 μεθόδους είναι καλύτερη και πιο αξιόπιστη στην πρόβλεψη της πραγματικής απόδοσης ενός συστήματος. Κάτι τέτοιο εξάλλου θα απαιτούσε τη μελέτη περισσότερων ηλιακών συστημάτων και σε χρονικά διαστήματα πολύ μεγαλύτερα. Αυτή η εργασία όμως εξετάζει τις δυο μεθόδους ως προς τη λειτουργία τους, τη χρηστικότητα τους, παρουσιάζοντας κάποια από τα βασικά τους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Η σύγκριση για όλες τις παραμέτρους του συστήματος που υπολογίζει η κάθε μέθοδος δεν είναι εφικτή, αφού δεν υπάρχει απόλυτη αντιστοιχία μεταξύ τους. Όμως για τον συντελεστή απωλειών της δεξαμενής, είναι δυνατόν να γίνει άμεση σύγκριση. Έτσι, με τη μέθοδο Input Output υπολογίστηκε ίσος με $U_{sc}=2.4$ ($W K^{-1}$) και με την Δυναμική μέθοδο $U_{sc(1)}= 2.17$ ($W K^{-1}$) και $U_{sc(2)}=2.41$ ($W K^{-1}$) δηλαδή σφάλμα 10.6% και 0.4% αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι οι

τιμές είναι αρκετά κοντά και κατά συνέπεια οι δυο μέθοδοι, όσον αφορά τη συγκεκριμένη παράμετρο, συμπίπτουν.

5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων για την ετήσια ενεργειακή απολαβή

Τα αποτελέσματα για την ετήσια ενεργειακή απολαβή για τις 4 πόλεις (Athens, Davos, Wuerzburg, Stockholm) που υπάρχουν στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Πρόβλεψη της ετήσιας ενεργειακής απολαβής για 4 πόλεις.

Όπως είναι φανερό υπάρχει μια απόκλιση στην ενεργειακή απολαβή μεταξύ των 2 μεθόδων, η οποία είναι της τάξης του 21 %. Πολλοί είναι οι παράγοντες στους οποίους μπορεί να οφείλεται αυτή η διαφορά. Κατ' αρχήν είναι η αβεβαιότητα της κάθε μεθόδου η οποία είναι για την Input Output $\pm 5\%$ για ηλιόλουστες περιοχές και $\pm 10\%$ για περιοχές με συχνή συννεφιά [6] και για την Δυναμική μέθοδο $\pm 5\%$ στις περισσότερες περιπτώσεις και $\pm 10\%$ για ειδικές περιπτώσεις [7]. Εκτός από τα σφάλματα στις μετρήσεις των οργάνων, υπάρχουν παράγοντες σφάλματος για κάθε μέθοδο που οφείλονται στην αρχή λειτουργίας της κάθε μεθόδου και στον τρόπο με τον οποίο γίνονται οι υπολογισμοί. Για παράδειγμα η μέθοδος Input Output χρησιμοποιεί μέσες ημερήσιες τιμές, άρα δεν μπορεί να λάβει υπόψη της φαινόμενα μικρότερης χρονικής κλίμακας, όπως την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας, πάρα το ότι η μορφή της κατανομής αυτής επηρεάζει την ενεργειακή απολαβή. Μια ακόμη παράμετρος σφάλματος της Input Output για την ετήσια απολαβή είναι και η παραδοχή ότι στην αρχή της κάθε ημέρας η δεξαμενή θεωρείται ομογενοποιημένη. Αντίστοιχα για τη Δυναμική μέθοδο, τίθεται το ζήτημα ότι δεν απαιτεί ένα

σχετικά μεγάλο αριθμό ημερών, το οποίο έχει σαν συνέπεια το σύστημα να μη δοκιμάζεται για ένα μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας. Επίσης, παράγοντας σφάλματος είναι και οι παραδοχές (παράγραφος 2.2.4) που κάνει για τον υπολογισμό της ετήσιας απολαβής. Ακόμα, σημαντικό ρόλο για την απόκλιση των αποτελεσμάτων είχε και το γεγονός ότι το σύστημα δοκιμάστηκε σε διαφορετικές χρονικές περιόδους (χειμώνας και άνοιξη για την μέθοδο Input Output και καλοκαίρι για τη Δυναμική μέθοδο).

5.2 Σύγκριση ως προς τη λειτουργικότητα

Ένα άλλο επίπεδο σύγκρισης των δυο μεθόδων αφορά τη λειτουργικότητα και την ευχρηστία τους για το εκάστοτε εργαστήριο δοκιμών που τις εφαρμόζει. Κατ' αρχήν ο εργαστηριακός εξοπλισμός που απαιτείται για την πραγματοποίηση μιας σειράς δοκιμών είναι περίπου ο ίδιος και για τις 2 μεθόδους. Ένα θετικό της Δυναμικής μεθόδου είναι ότι απαιτεί λιγότερες ημέρες δοκιμών και το ποιο σημαντικό ότι οι τιμές της ακτινοβολίας δεν χρειάζεται να εμφανίζουν διασπορά, σε αντίθεση με την Input Output η οποία απαιτεί να υπάρχει ένα εύρος στις ημερήσιες ακτινοβολίες το οποίο δεν είναι πάντα εύκολο, ειδικά σε χώρες με έντονη και μεγάλη διάρκεια ηλιοφάνειας (π.χ. Ελλάδα, Κύπρος). Όσον αφορά την επεξεργασία των δεδομένων η Input Output φαίνεται να υπερτερεί για την απλότητα στους υπολογισμούς, ενώ η Δυναμική απαιτεί την ύπαρξη ενός εμπορικού λογισμικού προσομοίωσης, το οποίο δεν είναι ανοικτό για το κοινό, ώστε να μπορεί να μελετηθεί η ακριβής διαδικασία με την οποία γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων.

Οι κατασκευαστές των ηλιακών συστημάτων, σίγουρα πέρα από την απόδοση του συστήματος, θα ήθελαν να γνωρίζουν και δευτερεύοντα στοιχεία που θα τους βοηθούσαν στην βελτιστοποίηση της κατασκευής. Για παράδειγμα από τη γραφική παράσταση της κατανομής απομάστευσης με ανάμειξη βγαίνουν χρήσιμα συμπεράσματα για το βαθμό διαστρωμάτωσης της δεξαμενής. Ακόμα, στην Input Output πραγματοποιούνται 2 δοκιμές απωλειών της δεξαμενής, μια με το συλλέκτη συνδεδεμένο και μια δοκιμή με το συλλέκτη αποσυνδεδεμένο, το οποίο μπορεί να υποδείξει στον κατασκευαστή αν κατά τη διάρκεια της νύχτας υπάρχει ανάστροφη ροή.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ISO/DIS 9459.5 (1996). Solar Heating – Domestic water heating systems – Part 5: System performance characterization by means of whole-system tests and computer simulation.
2. EN 12976.2 (2006). Thermal Solar Systems and Components. Factory Made Systems – Part 2: Test Methods
3. ISO 9459.2 (1995). Solar Heating – Domestic water heating systems – Part 2: Outdoor test methods for system performance characterization and yearly performance prediction of solar-only systems
4. M.J Carvalho and D.J. Naron (2001). Comparison of test methods for evaluation of thermal performance of preheat and solar-only factory made systems. Solar energy 69, 145-156
5. Dynamic System Testing Program Manual Version 2.5. c/o Spirk1, Germering (1995)
6. Bourges B., Rabl A., Leide B., Carvalho M.J. and Collares Pereira M. (1991) Accuracy of the European solar water heater test procedure. Part 1: Measurement errors and parameter estimates. Solar Energy 47, 1-16
7. Naron D.J. and van der Ree B. (1999). 'Bridging the gap', Final Report of Work Package 1: Definition of Scope, TNO, Delft, The Netherlands

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΑΣ ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ/ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

^{1*}Μ. Σουλιώτης, ¹Ι. Τρυπαναγνωστόπουλος, ^{2*}Σ. Καλογήρου, ²Γ. Φλωρίδης,
^{3*}Μ. Ekhrawat, ³Δ. Τσιπάζ

¹Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ρίο Πάτρας 26504, Ελλάδα

*e-mail: msouliot@physics.upatras.gr

² Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Επιστήμης Υλικών, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου,
P. O. Box 50329, Λεμεσός 3603, Κύπρος

*e-mail: Soteris.kalogirou@cut.ac.cy

³Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,
Θεσσαλονίκη 54224, Ελλάδα

*e-mail: *mekhrawa@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι θερμοσιφωνικές συσκευές επίπεδων ηλιακών συλλεκτών και τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι τα πλέον διαδεδομένα ηλιακά συστήματα τα οποία παράγουν θερμότητα και ηλεκτρισμό, αντίστοιχα. Οι ηλιακές συσκευές υβριδικών θερμικών/φωτοβολταϊκών συσκευών (PV/T) μπορούν ταυτόχρονα να παράγουν θερμότητα και ηλεκτρισμό, κατορθώνοντας να αξιοποιήσουν στο μέγιστο την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία. Συγκεκριμένα με την κατάλληλη σχεδίαση των υβριδικών PV/T ηλιακών συστημάτων είναι δυνατή η εξαγωγή θερμότητας από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, θερμαίνοντας αέρα ή νερό και τελικά να μειώνεται η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων και να διατηρείται η ηλεκτρική τους απόδοση σε ικανοποιητικό επίπεδο. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται η σχεδίαση και τα πειραματικά αποτελέσματα μιας θερμοσιφωνικής υβριδικής μονάδας PV/T. Η συσκευή έχει κατασκευαστεί στο Πανεπιστήμιο Πατρών και μελετάται η ηλεκτρική και θερμική ενέργεια απολαβής κάτω από τις καιρικές συνθήκες της Πάτρας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το μεγαλύτερο μέρος της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας από τα φωτοβολταϊκά (φβ) κύτταρα δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό αλλά σε θερμότητα, η οποία συντελεί στην αύξηση της θερμοκρασίας τους με συνέπεια την μείωση της ηλεκτρικής τους απόδοσης. Η απαγωγή της θερμότητας από τα φβ πλαίσια βοηθά όχι μόνο στη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας τους αλλά μπορεί και να αξιοποιηθεί αυξάνοντας τη συνολική ενεργειακή τους απόδοση. Τα ηλιακά συστήματα που έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν τόσο ηλεκτρική όσο και θερμική ενέργεια είναι τα υβριδικά φωτοβολταϊκά / θερμικά (φβ/θ ή PV/T) συστήματα, τα οποία αναπτύσσονται τα τελευταία χρόνια και έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται σε επιδεικτικές εφαρμογές. Τα υβριδικά συστήματα PV/T συνίστανται από φβ πλαίσια με ενσωματωμένη θερμική μονάδα απολαβής της θερμότητας του φβ, όπου ένα κυκλοφορούν ρευστό χαμηλότερης θερμοκρασίας αυτής του φβ θερμαίνεται ψύχοντάς το. Η χρήση του νερού ως ρευστού απολαβής της θερμότητας είναι αποδοτική όλο το έτος, κυρίως σε χώρες με ήπιο ή θερμό κλίμα. Αυτές οι υβριδικές διατάξεις μπορούν να αξιοποιηθούν για την θέρμανση του νερού σε χαμηλές θερμοκρασίες (μέχρι 40° C) ώστε να επιτυγχάνεται παράλληλα και η διατήρηση

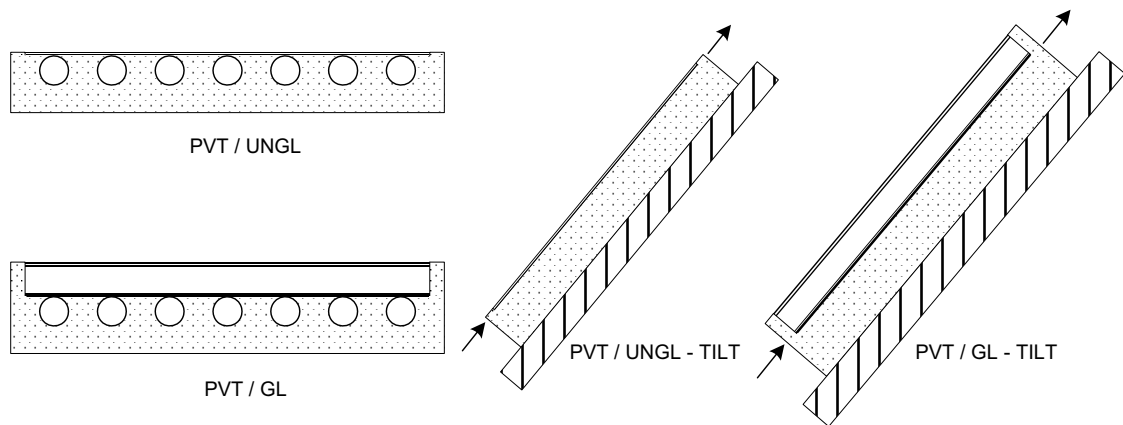
χαμηλής θερμοκρασίας στα φβ πλαίσια. Η απαγωγή θερμότητας με κυκλοφορία αέρα απαιτεί απλούστερη και φθηνότερη διάταξη, αλλά η ψύξη του φωτοβολταϊκού είναι λιγότερο αποδοτική. Όταν ο αέρας του περιβάλλοντος έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη των 20°C τα PV/T συστήματα αέρα έχουν περιορισμένες δυνατότητες εφαρμογής (κυρίως φυσικός αερισμός και θέρμανση αέρα για ορισμένες διεργασίες).

Εκτεταμένες μελέτες τόσο σε συστήματα νερού [1, 2, 3, 4] όσο και σε συστήματα αέρα [1, 5, 6, 7] έχουν πραγματοποιηθεί από το Πανεπιστήμιο Πατρών και διάφοροι τύποι υβριδικών PV/T πρωτοτύπων έχουν διερευνηθεί. Η βελτίωση της συμπεριφοράς των συστημάτων αυτών αποσκοπεί στο να βελτιωθούν τα υπάρχοντα όρια της απόδοσής τους και να κάνουν τα συστήματα αυτά κατάλληλα για συγκεκριμένου τύπου εφαρμογές. Τα υβριδικά συστήματα νερού (PVT/WATER) είναι περισσότερο ακριβά σε σχέση με τα υβριδικά συστήματα αέρα (PVT/AIR) και μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικά όλες τις εποχές του έτους, κυρίως σε περιοχές χαμηλού γεωγραφικού πλάτους όπου η θερμοκρασία του νερού είναι συνήθως κάτω από το όριο των 20 °C. Τα υβριδικά συστήματα νερού μπορούν να εγκατασταθούν σε οριζόντιες ή κεκλιμένες οροφές κτηρίων (Σχήμα 1, δεξιά) ή ακόμα και στις προσόψεις κτηρίων, ανάλογα με την αρχιτεκτονική τους.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η σχεδίαση και η συμπεριφορά υβριδικών συσκευών PV/T νερού (PVT/WATER) που αναπτύχθηκαν στο Εργαστήριο Ηλιακής Ενέργειας του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών. Τα συστήματα δοκιμάστηκαν σε εξωτερικές συνθήκες προκειμένου να καταγραφούν τόσο η ηλεκτρική τους όσο και η θερμική τους συμπεριφορά. Σκοπός των συστημάτων αυτών είναι να παρέχουν ζεστό νερό και ηλεκτρισμό για οικιακές, αγροτικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Δεδομένου του μικρού μεγέθους των συσκευών αυτών, μπορούν να εγκατασταθούν σε μονοκατοικίες, πολυκατοικίες, μικρά ξενοδοχεία, κ.α. Οι συσκευές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά προς τις θερμοσιφωνικές συσκευές επίπεδων ηλιακών συλλεκτών (FPTU) ή των ολοκληρωμένων ηλιακών συσκευών συλλέκτη – αποθήκης θερμότητας (ICS) σε συνδυασμό με απομονωμένα ή διασυνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα. Προκειμένου να αυξηθεί η ενεργειακή απόδοση των συσκευών αυτών μελετήθηκε πειραματικά η δυνατότητα τοποθέτησης διάχυτων ανακλαστήρων [1, 2] μέσω των οποίων αυξάνεται η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων και ταυτόχρονα περιορίζονται οι οπτικές απώλειες, εξαιτίας του επιπρόσθετου γυάλινου καλύμματος. Τέλος, παρουσιάζονται κάποια αποτελέσματα υβριδικών PV/T συστημάτων με ή χωρίς τη χρήση γυάλινου διαφανούς καλύμματος αλλά και σε συνδυασμό αυτών με δεξαμενή νερού, όπου μέσω φυσικής κυκλοφορίας (θερμοσιφωνική ροή), δίνουν μια εικόνα για τη θέρμανση νερού.

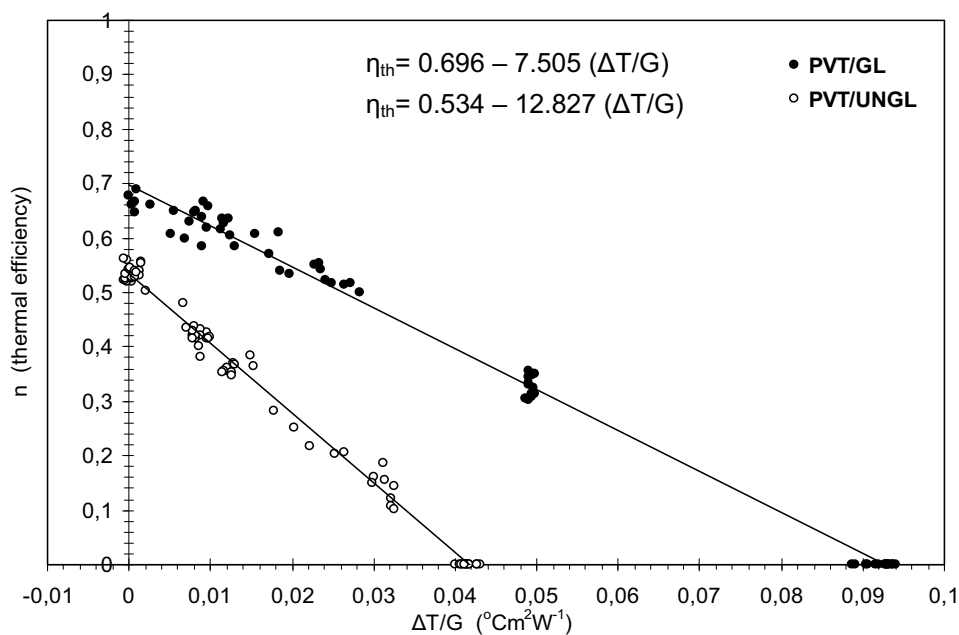
2. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ PVT.

Τα υβριδικά συστήματα PV/T νερού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κάλυψη αναγκών σε θερμό νερό οικιακής χρήσης αλλά και θέρμανσης χώρων, καλύπτοντας ταυτόχρονα και τις ηλεκτρικές ανάγκες των κτηρίων. Τα συστήματα PVT/WATER που μελετούνται αποτελούνται από φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου και η μονάδα απαγωγής θερμότητας είναι ένα μεταλλικό φύλλο χαλκού όπου πάνω σε αυτό έχουν τοποθετηθεί σωλήνες νερού προκειμένου να αποφευχθεί η άμεση επαφή του νερού με την οπίσθια επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου (Σχήμα 1, αριστερά). Ο θερμικός εναλλάκτης βρίσκεται σε θερμική επαφή με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο και συνολικά το σύστημα είναι θερμικά μονωμένο προς το περιβάλλον από την πίσω και πλαϊνή επιφάνειά του.

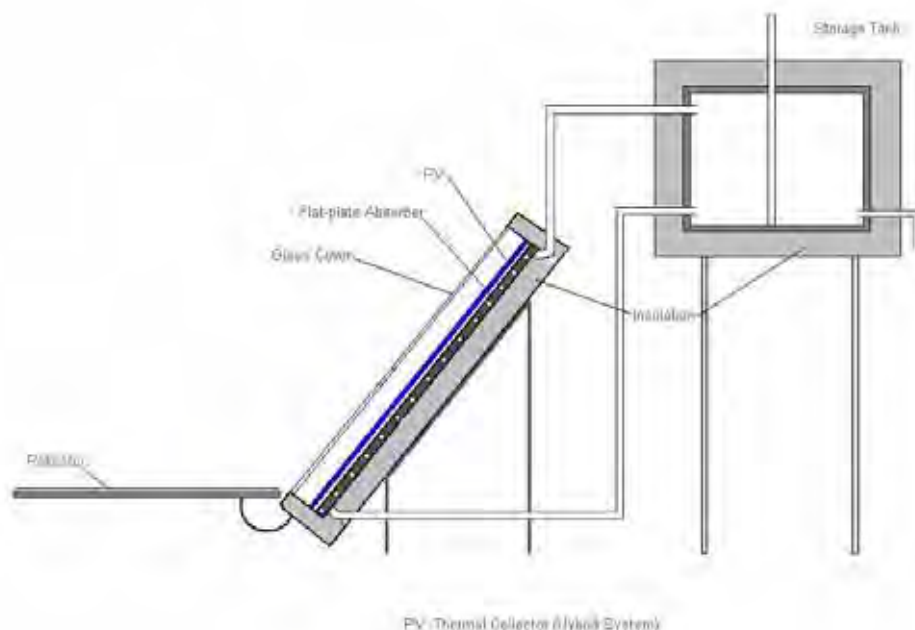


Σχήμα 1: Τομή των πειραματικών συσκευών PV/T (αριστερά) και εγκατάσταση των συστημάτων σε επικλινές οροφές κτιρίων (δεξιά).

Τα υβριδικά συστήματα PV/T χωρίς τη χρήση επιπρόσθετου γυάλινου καλύμματος (PVT/UNGL) παρέχουν ικανοποιητική ηλεκτρική απόδοση (εξαρτωμένων των συνθηκών λειτουργίας), αλλά η θερμική απόδοσή τους περιορίζεται στην περίπτωση υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας κυρίως γιατί οι θερμικές απώλειες από την εμπρόσθια επιφάνεια των πλαισίων είναι υψηλές. Το επιπρόσθετο γυάλινο διαφανές κάλυμμα (PVT/GL) αυξάνει την θερμική απόδοση των συστημάτων σε μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας, αλλά οι επιπρόσθετες οπτικές απώλειες μειώνουν την ηλεκτρική απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Τα υβριδικά συστήματα μπορούν να παρέχουν ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, κατορθώνοντας να εκμεταλλευτούν υψηλότερο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας. Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές δύο τύπων υβριδικών PV/T συστημάτων (PVT/UNGL και PVT/GL) αποτελούμενα από φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου και θερμικούς εναλλάκτες αποτελούμενους από φύλλο χαλκού όπου έχουν ενσωματωθεί σε αυτό χάλκινοι σωλήνες.

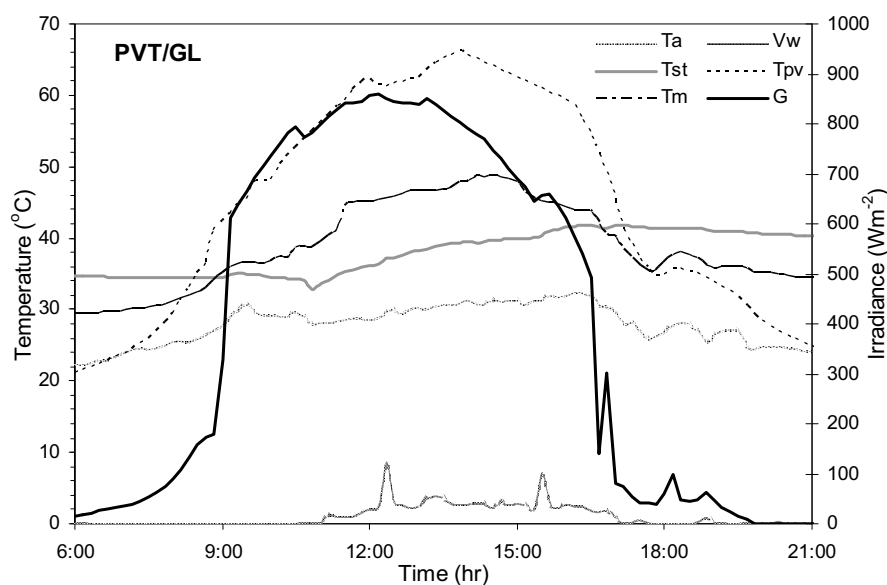


Σχήμα 2: Αποτελέσματα στιγμιαίας θερμικής απόδοσης των PV/T συστημάτων.



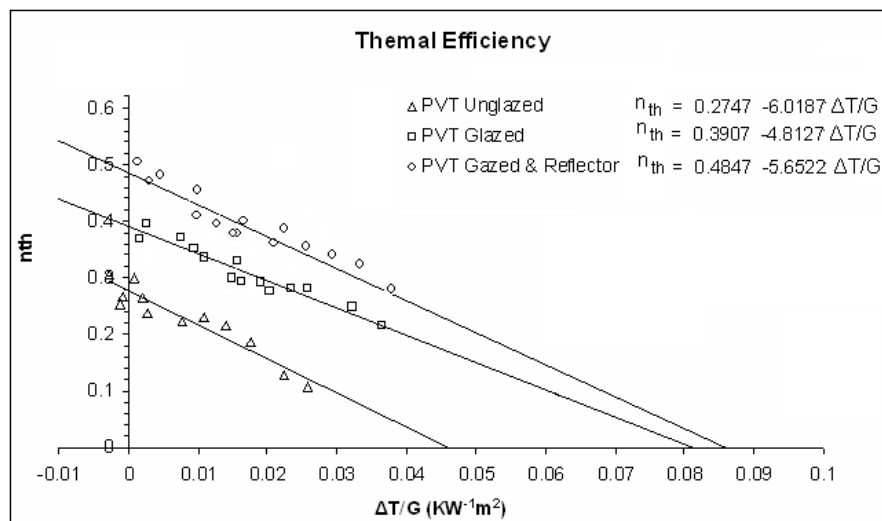
Σχήμα 3: Θερμοσιφωνική συσκευή υβριδικού φωτοβολταϊκού / θερμικού συστήματος PV/T

Χρησιμοποιήθηκαν εμπορικού τύπου φωτοβολταϊκά πλαίσια, με ηλεκτρική απόδοση που κυμαίνονταν μεταξύ 8% και 12%, ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας και τη χρήση ή μη επιπρόσθετου γυάλινου καλύμματος. Στη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς διοχετευόταν σε ένα ηλεκτρικό φορτίο, προσομοιώνοντας έτσι πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Τα αποτελέσματα από τις πειραματικές δοκιμές που αφορούν τη θερμική απόδοση των συσκευών παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 2. Το σύστημα PVT/GL παρουσιάζει μια αξιοσημείωτα υψηλή θερμική απόδοση σε σχέση με το σύστημα PVT/UNGL, αλλά ταυτόχρονα η ηλεκτρική του απόδοση ελαττώνεται εξαιτίας των υψηλότερων οπτικών απωλειών.

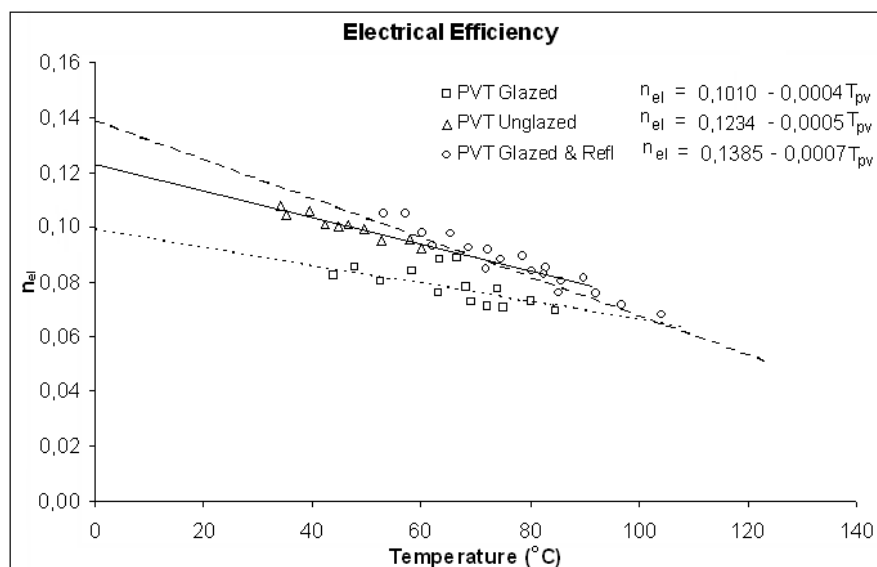


Σχήμα 4: Ημερήσια διαγράμματα μεταβολής θερμοκρασιών, έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και ταχύτητας πνέοντος ανέμου του συστήματος PVT/GL με φυσική κυκλοφορία.

Εκτός από τις πειραματικές δοκιμές σταθερών συνθηκών λειτουργίας, τόσο το σύστημα PVT/GL όσο και το σύστημα PVT/UNGL μελετήθηκαν πειραματικά στη διάρκεια ημερήσιας λειτουργίας τους αφού πρώτα συνδέθηκαν με δεξαμενή νερού με τη χρήση φυσικής και βεβιασμένης κυκλοφορίας νερού. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται σε τομή ο θερμοσιφωνικός τύπος από το υβριδικό PV/T σύστημα. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται αποτελέσματα από την ημερήσια λειτουργία του θερμοσιφωνικού συστήματος PVT/GL όπου δείχνονται οι μεταβολές της μέσης θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_{pv}), της θερμοκρασίας του κυκλοφορούντος νερού (T_m), της θερμοκρασίας του νερού εντός του δοχείου αποθήκευσης (T_{st}), της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (T_a), αλλά και της έντασης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (G) και της ταχύτητας του πνέοντος ανέμου (V_w). Επιπλέον, τα συστήματα δοκιμάστηκαν πειραματικά χρησιμοποιώντας επίπεδους διάχυτους ανακλαστήρες, προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδρασή τους στην περίπτωση της εγκατάστασης των συστημάτων αυτών στις οριζόντιες οροφές κτηρίων [1, 2]. Η επίδραση των διάχυτων ανακλαστήρων κρίθηκε θετική σε όλες τις περιπτώσεις, λαμβανομένου του γεγονότος του επιπρόσθετου χαμηλού κόστους.



Σχήμα 5: Διαγράμματα μεταβολής της θερμικής απόδοσης των συστημάτων PV/T



Σχήμα 6: Διαγράμματα μεταβολής της ηλεκτρικής απόδοσης των συστημάτων PV/T

Οι ανακλαστήρες αυτοί τοποθετούνται μπροστά από τα φωτοβολταικά πλαίσια, όπως άλλωστε δείχνεται στο Σχήμα 3. Στα Σχήματα 5 και 6 παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα της μεταβολής της θερμικής και ηλεκτρικής απόδοσης αντίστοιχα των συστημάτων αυτών όπου η βελτίωση της θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας είναι σαφής. Οι θερμοσιφωνικές συσκευές επίπεδων ηλιακών συλλεκτών παρουσιάζουν υψηλότερες θερμικές αποδόσεις συγκριτικά με τις θερμοσιφωνικές συσκευές των υβριδικών PV/T συστημάτων εξαιτίας του υψηλότερου συντελεστή απορρόφησης της επιφάνειας του επίπεδου συλλέκτη αλλά και της συνολικά καλύτερης θερμικής μόνωσης του θερμοσιφωνικού συστήματος των επίπεδων συλλεκτών. Όμως η ανάγκη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι εξίσου σημαντική και έτσι ο αποτελεσματικός συνδυασμός συστημάτων για παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας μπορεί να αποτελέσει το μέλλον για κάλυψη οικιακών ενεργειακών αναγκών μέσω των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάζονται αποτελέσματα από τις πειραματικές δοκιμές Υβριδικών PV/T συστημάτων νερού όπως αυτά μελετήθηκαν στο Τμήμα Φυσικής στο Πανεπιστήμιο Πατρών. Τα συστήματα αυτά έχουν τη δυνατότητα να εγκατασταθούν σε αυτόνομες κατοικίες ή συγκροτήματα κατοικιών για την κάλυψη αναγκών για ηλεκτρισμό και θερμό νερό χρήσης, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου τόσο η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας όσο και η θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμαίνονται σε υψηλές τιμές. Τα αποτελέσματα από τις πειραματικές δοκιμές έδειξαν ότι τα υβριδικά PV/T συστήματα θερμοσιφωνικού τύπου μπορούν να παρέχουν ικανοποιητικά τόσο ηλεκτρική ενέργεια όσο και θερμική ενέργεια.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας καθώς και το Ίδρυμα Προώθησης της Έρευνας της Κύπρου για τη χρηματοδότηση της έρευνας μέσω του ερευνητικού διακρατικού προγράμματος Ελληνοκυπριακής Συνεργασίας ΚΥ-ΕΛ/0406/10.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th., Souliotis M. and Yianoulis P. 2002. Hybrid Photovoltaic/Thermal solar systems. *Solar Energy* 72, 217-234.
2. Tripanagnostopoulos Y. and Souliotis M., Battisti R. and Corrado A. 2005. Energy, cost and LCA results of PV and hybrid PV/T solar systems. *Progress in Photovoltaics: Research and applications* 13, 235-250.
3. Kalogirou S.A. and Tripanagnostopoulos Y. 2006. Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production. 2006. *Energy Conversion and Management* 47, 3368-3382.
4. Kalogirou S.A. and Tripanagnostopoulos Y. 2007. Industrial application of PV/T solar energy systems. *Applied Thermal Engineering* 27 (8-9) 1259-1270.
5. Tripanagnostopoulos Y. and Souliotis M., Battisti R. and Corrado A. 2006. Performance, cost and Life-cycle assessment study of hybrid PVT/AIR solar systems. *Progress in Photovoltaics: Research and applications* 14, 65-76.
6. Tonui J.K. and Tripanagnostopoulos. 2007. Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. *Renewable Energy* 32, 623-637.
7. Tonui J.K. and Tripanagnostopoulos. 2007. Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements. *Solar Energy* 81, 498-511.

ΗΛΙΑΚΑ ΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΥΠΡΟ

Σωτήρης Καλογήρου

Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Επιστήμης και Μηχανικής Υλικών, Τ. Κ. 50329, 3603 Λεμεσός, Κύπρος

Email: Soteris.kalogirou@cut.ac.cy

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Κύπρος προγραμματίζει στα επόμενα χρόνια να αναπτύξει ηλιακό θερμικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής της τάξεως των 50 MW. Ενόψει αυτού του γεγονότος σε αυτή την μελέτη αναλύονται τα υπάρχοντα συστήματα σε σχέση με τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά, το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας και την έκταση επιφάνειας που απαιτείται, η οποία είναι πολύ σημαντική παράμετρος για την Κύπρο που δεν διαθέτει ερημικές περιοχές. Τα κυριότερα συστήματα που βρίσκονται σε λειτουργία σε διάφορες χώρες σε πλήρη βιομηχανική ή πειραματική μεγάλου μεγέθους βάση είναι τα παραβολικά συστήματα γραμμικής εστίασης, τα παραβολικά συστήματα σημειακής εστίασης (τύπου πιάτου) και τα συστήματα κεντρικής εστίας. Τα πιο υποσχόμενα συστήματα από πλευράς κόστους της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι της κεντρικής εστίας ενώ τα παραβολικά συστήματα σημειακής εστίασης έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να αναπτύσσονται σταδιακά αφού το κάθε σύστημα παράγει περίπου 250 kW με μηχανή τύπου Stirling σε κάθε μονάδα. Τα παραβολικά συστήματα γραμμικής εστίασης και κεντρικής εστίας παράγουν υπέρθερμο ατμό ο οποίος χρησιμοποιείται σε ένα συμβατικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής τύπου Rankine ή ολοκληρωμένου συνδυασμένου κύκλου, δηλαδή αντικαθιστούν το συμβατικό λέβητα με το ηλιακό σύστημα. Και τα τρία συστήματα συγκρίνονται μεταξύ τους για να γίνει η επιλογή του καταλληλότερου για τα δεδομένα της Κύπρου. Από την ανάλυση φαίνεται ότι το παραβολικό σύστημα γραμμικής εστίασης έχει υψηλή ηλιακή-σε-ηλεκτρική απόδοση, χαμηλή απαίτηση σε εμβαδόν ανά εγκατεστημένο MWh και είναι η πιο βιομηχανικά ώριμη τεχνολογία, που μειώνει τα ρίσκα, και ως εκ τούτου είναι το καταλληλότερο για την Κύπρο. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να εγκατασταθεί κοντά στον υφιστάμενο σταθμό του Βασιλικού για τους λόγους που αναφέρονται στην μελέτη αυτή.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Κύπρος δεν διαθέτει επί του παρόντος ενεργειακές πηγές και εξαρτάται εξ' ολοκλήρου από τις εισαγωγές καυσίμων για τις ενεργειακές της ανάγκες. Η μόνη φυσική πηγή ενέργειας που διαθέτει η πατρίδα μας σε μεγάλο βαθμό είναι η ηλιακή ενέργεια, μια και είναι καλά γνωστό ότι το αιολικό δυναμικό της Κύπρου, για μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη αιολικών πάρκων, είναι πολύ χαμηλό. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί απ' ευθείας σε ηλεκτρική, χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά στοιχεία, ή σε θερμική με διάφορους τύπους συλλεκτών αναλόγως της θερμοκρασίας λειτουργίας. Η Κύπρος προγραμματίζει στα επόμενα λίγα χρόνια να αναπτύξει ηλιακό θερμικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής της τάξεως των 50 MW, που είναι μια πολύ καλή κίνηση μια και η ανάπτυξη σε μεγάλο βαθμό φωτοβολταϊκών πάρκων θα είναι πάρα πολύ δαπανηρή. Ενόψει αυτού του γεγονότος, σε αυτή την μελέτη εξετάζονται τα υπάρχοντα συστήματα σε σχέση με τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά, το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας και την έκταση επιφάνειας που απαιτείται, η οποία είναι πολύ σημαντική παράμετρος για την Κύπρο που δεν διαθέτει ερημικές περιοχές. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλοι οι υπάρχοντες ηλεκτροπαραγωγικοί σταθμοί βρίσκονται παραθαλάσσια όπου το κόστος της γης, λόγω της τουριστικής ανάπτυξης, είναι πολύ ψηλό. Εντούτοις ο ηλιακός σταθ-

μός θα πρέπει να τοποθετηθεί κοντά σε ένα από αυτούς τους σταθμούς για εύκολη πρόσβαση στο δίκτυο και για χρήση του νερού της θάλασσας στο συμπυκνωτή.

Τα ηλιακά θερμικά συστήματα περιλαμβάνονται στις πρώτες εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας. Κατά τον δέκατο όγδοο αιώνα ηλιακοί φούρνοι χρησιμοποιούνταν σε όλη την Ευρώπη και την Μέση Ανατολή. Τα πιο σημαντικά παραδείγματα αυτών των συστημάτων περιλαμβάνουν τον ηλιακό φούρνο που κατασκευάστηκε από τον γνωστό Γάλλο χημικό Lavoisier το 1774, διάφορους τύπους συγκεντρωτικών συλλεκτών που κατασκευαστήκαν από τον Γάλλο φυσικό Boufon (1747–1748) και μία πρέσα τυπογραφείου που παρουσιάστηκε στη έκθεση του Παρισιού από τον Mouchot το 1872. Πολλές από τις πρώτες εφαρμογές των ηλιακών θερμικών-μηχανικών συστημάτων ήταν για εφαρμογές μικρής κλίμακας κυρίως για άντληση νερού και ήταν της τάξεως των 100 kW. Κατά τα τελευταία 40 χρόνια κατασκευάστηκαν πολλοί πειραματικοί θερμοηλεκτρικοί ηλιακοί σταθμοί οι οποίοι οδήγησαν στην εμπορικοποίηση μερικών τύπων από αυτούς και συστήματα της τάξεως των 30 με 80 MW βρίσκονται τώρα σε λειτουργία για πολλά χρόνια.

2. ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα ηλιακά θερμικά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής είναι συστήματα που παράγουν μηχανική ενέργεια και στην συνέχεια ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιώντας ηλιακούς συλλέκτες συγκεντρωτικού τύπου. Τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα χρησιμοποιούν καθρέφτες για να παράξουν θερμότητα σε υψηλή θερμοκρασία η οποία στην συνέχεια κινεί ατμοστροβίλους οι οποίοι συνήθως χρησιμοποιούν τον ατμό που παράγεται σε λέβητες με συμβατικά καύσιμα. Μερικά από αυτά τα συστήματα διαθέτουν και τρόπους για αποθήκευση της θερμικής ενέργειας για να μπορούν να εργάζονται σε περιόδους συννεφιάς ή και την νύκτα.

Τα κυριότερα συστήματα που βρίσκονται σε λειτουργία σε διάφορες χώρες σε πλήρη βιομηχανική ή πειραματική βάση μεγάλου μεγέθους είναι τα παραβολικά συστήματα γραμμικής εστίασης, τα παραβολικά συστήματα σημειακής εστίασης (τύπου πιάτου) και τα συστήματα κεντρικής εστίας. Όλα αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες διότι οι κοινοί επίπεδοι συλλέκτες δεν μπορούν να εργαστούν στις υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται, επειδή όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία λειτουργίας τόσο πιο υψηλή είναι η απόδοση των συστημάτων. Από τα τρία αυτά συστήματα τα πιο βιομηχανικά ώριμα είναι τα παραβολικά συστήματα γραμμικής εστίασης λόγω κυρίως της ύπαρξης εννέα μεγάλων συστημάτων, συνολικής απόδοσης 354 MW στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ, που είναι σε λειτουργία για περισσότερα από είκοσι χρόνια. Τα πιο υποσχόμενα συστήματα, από πλευράς κόστους της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, είναι αυτά της κεντρικής εστίας ενώ τα παραβολικά συστήματα σημειακής εστίασης έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να αναπτύσσονται σταδιακά αφού το κάθε σύστημα παράγει περίπου 250 kW με μηχανή τύπου Stirling σε κάθε μονάδα. Τα παραβολικά συστήματα γραμμικής εστίασης και κεντρικής εστίας παράγουν υπέρθερμο ατμό ο οποίος χρησιμοποιείται σε ένα συμβατικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής τύπου Rankine ή ολοκληρωμένου συνδυασμένου κύκλου, δηλαδή αντικαθιστούν το συμβατικό λέβητα με το ηλιακό σύστημα.

Τα ηλιακά θερμικά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής λειτουργούν επιτυχώς από τα μέσα της δεκαετίας του 80 και παρέχουν ηλεκτρισμό σε 100,000 νοικοκυριά. Πρόσφατα ένα νέο σύστημα μπήκε σε λειτουργία που ονομάζεται «Nevada Solar I», το οποίο άρχισε να λειτουργεί στην Νεβάδα των ΗΠΑ, άλλο ένα που ονομάζεται «PS10», άρχισε να λειτουργεί στην Ισπανία ενώ πολλά άλλα παρόμοια συστήματα είναι υπό κατασκευή σε πολλές άλλες χώρες. Φαί-

νεται ότι ειδικά η Ισπανική κυβέρνηση έχει αντιληφθεί το μεγάλο δυναμικό που έχει η ηλιακή θερμική βιομηχανία και επιδοτεί τον ηλεκτρισμό που παράγεται από τον ήλιο με το σχέδιο «feed-in tariff». Όταν το νέο σύστημα «PS20», που είναι υπό κατασκευή μπει σε λειτουργία μαζί με το PS10 θα δίνουν ηλεκτρική ενέργεια σε 200,000 νοικοκυριά (περίπου ίσο με τα μισά νοικοκυριά της Κύπρου). Άλλα τέτοια συστήματα προγραμματίζονται για την Αίγυπτο, Αλγερία και το Μαρόκο.

Επειδή για να εγκατασταθούν αυτά τα συστήματα απαιτούνται μεγάλες εκτάσεις γης αυτά συνήθως τοποθετούνται σε άγονα εδάφη, όπως είναι η έρημος. Σύμφωνα με το οργανισμό Trans-Mediterranean Renewable Energy Corporation (TREN) κάθε τετραγωνικό χιλιόμετρο της ερήμου αποδίδει ηλιακή ενέργεια που ισοδυναμεί με 1.5 εκατομμύρια βαρέλια ισοδύναμου πετρελαίου. Έχει δε υπολογιστεί ότι εάν μια περιοχή της ερήμου έκτασης 65,000 τετραγωνικών χιλιομέτρων, η οποία αντιστοιχεί με το 1% της ερήμου της Σαχάρας, μπορούσε να καλυφθεί με ηλιακά θερμικά συστήματα, θα μπορούσε να παράξει ηλεκτρισμό που ισοδυναμεί με την συνολική κατανάλωση του έτους 2000 για όλο το πλανήτη [1]. Ένα πέμπτο αυτής της περιοχής θα μπορούσε να καλύψει τις ηλεκτρικές ανάγκες όλης της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Παρόμοιες μελέτες στις ΗΠΑ προβλέπουν ότι το ηλιακό δυναμικό των νοτιοδυτικών περιοχών μπορεί να παράξει περίπου 7000 GW το οποίο είναι ίσο με 7 φορές της σημερινής εγκατεστημένης ισχύος σε ηλεκτρική ενέργεια [2].

Κυρίως λόγω των συστημάτων που είναι εγκατεστημένα στην Καλιφόρνια, το οποία λειτουργούν για πάνω από 20 χρόνια, τα παραβολικά συστήματα γραμμικής εστίασης είναι σήμερα η πιο ώριμη τεχνολογία και σήμερα παράγουν ηλεκτρισμό με κόστος περίπου US\$ 0.10/kWh (€0.06/kWh). Η επιτυχία και η ανθεκτικότητα των συστημάτων αυτών έχει αποδείξει την αξιοπιστία της τεχνολογίας αυτής. Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό των παραβολικών συστημάτων γραμμικής εστίασης και των συστημάτων κεντρικής εστίας είναι ότι είναι δυνατό να υπάρξει αποθήκευση της ενέργειας η οποία επιτρέπει στα συστήματα αυτά να εργάζονται κατά την νύκτα και σε συννεφιασμένο καιρό. Για την θερμική αποθήκευση χρησιμοποιείται μπετόν, διάφορα άλατα, κεραμικά και υλικά αλλαγής φάσης. Επίσης αυτά τα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιούν συμβατικά ή ανανεώσιμα καύσιμα σαν εφεδρική μορφή ενέργειας όπως είναι το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, το κάρβουνο και η βιομάζα ή το βιοαέριο. Η ευελιξία που προσφέρει η θερμική αποθήκευση σε συνδυασμό λειτουργίας με εφεδρικές μορφές ενέργειας κάνει τα συστήματα αυτά ικανά να καλύψουν τόσο το βασικό φορτίο όσο και το φορτίο σε ώρες αιχμής, όπως συμβαίνει κατά τους καλοκαιρινούς μήνες το μεσημέρι που υπάρχει μεγάλη κατανάλωση λόγω της χρήσης των κλιματιστικών συσκευών, όπου τα συστήματα αυτά έχουν την μεγαλύτερη παραγωγή.

Ο Πίνακας 1 δίνει μερικά χαρακτηριστικά απόδοσης των διαφόρων τύπων ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων [3]. Τα συστήματα γραμμικής εστίας και κεντρικής εστίας μπορούν να συνδυαστούν με θερμοδυναμικούς κύκλους ατμού από 10 έως 200 MW ηλεκτρικής ισχύος που έχουν θερμική απόδοση κύκλου 30–40%. Οι μηχανές τύπου Stirling συνδυασμένες με παραβολικά συστήματα σημειακής εστίασης έχουν περίπου την ίδια απόδοση η οποία είναι βασικά ίδια με τα συστήματα που χρησιμοποιούν συμβατικό καύσιμο.

Πίνακας 1 Χαρακτηριστικά απόδοσης των διαφόρων ηλιακών συστημάτων					
Τεχνολογία	Εύρος ισχύος (MW)	Συγκέντρωση	Μέγιστη ηλιακή απόδοση (%)	Ηλιακή-σε-ηλεκτρική απόδοση (%)	Χρήση γης (m ² /MWh-y)
Γραμμικής εστίας	10-200	70-80	21	10-15	6-8
Κεντρικής εστίας	10-150	300-1000	20	8-10	8-12
Σημειακή εστίαση	0.01-0.4	1000-3000	29	16-18	8-12

Η συνολική ηλιακή-σε-ηλεκτρική απόδοση, που ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται ως προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, είναι χαμηλότερη από τα συμβατικά συστήματα, διότι τα ηλιακά περιλαμβάνουν την απόδοση της μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα μέσα στον συλλέκτη.

Λόγω των μεγαλύτερων λόγων συγκέντρωσης τα παραβολικά συστήματα σημειακής εστίασης έχουν μεγαλύτερες αποδόσεις από τα συστήματα γραμμικής εστίας και είναι πιο κατάλληλα για απομονωμένα μικρά συστήματα ενώ για μεγαλύτερες εφαρμογές, πολλά τέτοια συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί.

2.1 Παραβολικά συστήματα γραμμικής εστίας

Οι παραβολικοί συλλέκτες γραμμικής εστίας είναι σήμερα η πιο ώριμη ηλιακή τεχνολογία για παραγωγή ενέργειας έως τους 400°C για βιομηχανικές εφαρμογές και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεγαλύτερη εφαρμογή αυτού του είδους συστήματος είναι τα εννιά συστήματα που είναι εγκατεστημένα στην Νότια Καλιφόρνια που είναι γνωστά ως «Solar Electric Generating Systems (SEGS)», και που έχουν συνολική εγκατεστημένη ισχύ ίση με 354 MWe [4]. Το SEGS I είναι 13.8 MWe, τα SEGS II-VII είναι 30 MWe το κάθε ένα και τα SEGS VIII και IX είναι 80 MWe το κάθε ένα. Αυτά έχουν σχεδιαστεί, εγκατασταθεί και λειτουργούν στην έρημο Mojave στην Νότια Καλιφόρνια, το πρώτο από το 1985 και το τελευταίο από το 1991. Αυτά τα εργοστάσια κατασκευάστηκαν σαν αντίδραση στην πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του 70, όταν η Αμερικανική κυβέρνηση έδωσε φορολογικά και επενδυτικά κίνητρα στις εναλλακτικές πηγές ενέργειας της τάξεως των 40% στο συνολικό κόστος. Λόγω της έρευνας και της ανάπτυξης, της οικονομίας λόγω μεγέθους και της συγκεντρωμένης εμπειρίας, υπήρξε πτώση στο κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από US\$ 0.30/kWh το 1985, όταν κατασκευάστηκε το πρώτο εργοστάσιο, σε US\$ 0.14/kWh το 1989, όταν κατασκευάστηκε το έβδομο εργοστάσιο, δηλαδή υπήρξε πτώση μεγαλύτερη του 50% σε τέσσερα χρόνια. Μέχρι σήμερα τα εργοστάσια της Καλιφόρνιας έχουν παράξει περισσότερες από 15,000 GWh ηλεκτρικής ενέργειας από τις οποίες οι 12,000 GWh από το ήλιο [5]. Αυτή η ενέργεια αντιστοιχεί σε κόστος δύο δισεκατομμυρίων Αμερικανικών δολαρίων που πουλήθηκε τα τελευταία 20 χρόνια. Τα εννιά εργοστάσια συνεχίζουν να αποδίδουν όπως πρωτοκατασκευάστηκαν ή και καλύτερα και έχουν μέχρι σήμερα συσσωρεύσει περισσότερα από 180 βιομηχανικά χρόνια λειτουργικής εμπειρίας.

Στα συστήματα αυτά οι παραβολικοί συλλέκτες συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία πάνω στην γραμμική εστία που είναι μεταλλικός σωλήνας στον οποίο κυκλοφορεί συνθετικό λάδι και περικλείεται από γυάλινο σωλήνα. Το συνθετικό λάδι διασωληνώνεται με ένα εναλλάκτη θερμότητας για να παραχθεί ο ατμός που χρησιμοποιείται όπως και στα συμβατικά συστήματα παραγωγής για να περιστρέψει ένα ατμοστρόβιλο που είναι συνδεδεμένος με την ηλεκτρική γεννήτρια. Δηλαδή αντικαθιστούμε τον ατμόλεβητα με το ηλιακό σύστημα. Όπως σε όλα τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στην όλη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρισμού, δεν υπάρχει εκπομπή καυσαερίων. Τα συστήματα που είναι εγκατεστημένα στην Καλιφόρνια είναι υβριδικά και χρησιμοποιούν φυσικό αέριο σαν εναλλακτική μορφή ενέργειας. Τα εργοστάσια μπορούν να δώσουν ενέργεια χρησιμοποιώντας μόνο ηλιακή ενέργεια, μόνο φυσικό αέριο ή συνδυασμό των δύο ανεξάρτητα από τον χρόνο και τις καιρικές συνθήκες. Μία φωτογραφία ενός εργοστασίου SEGS φαίνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Φωτογραφία ενός από τα εργοστάσια SEGS

2.2 Συστήματα κεντρικής εστίας

Οι ενεργειακοί πύργοι ή συστήματα κεντρικής εστίας χρησιμοποιούν χιλιάδες κάτοπτρα που ακολουθούν την πορεία του ήλιου το κάθε ένα ανεξάρτητα, τα οποία ονομάζονται «ηλιοστάτες» και αντανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία σε μια κεντρική εστία που βρίσκεται πάνω σε ένα πύργο. Ο αποδέκτης συλλέγει την ηλιακή θερμότητα και την μεταφέρει σε ένα ειδικό υγρό μεταφοράς θερμότητας που είναι συνήθως υγροποιημένο αλάτι. Το υγρό αλάτι περνά τότε προαιρετικά από το δοχείο αποθήκευσης και τελικά στο σύστημα μετατροπής ενέργειας το οποίο μετατρέπει την θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική η οποία διοχετεύεται στο δίκτυο. Τα συστήματα κεντρικής εστίας είναι συνήθως μεγάλα της τάξεως των 10 MWe ή μεγαλύτερα.

Οι ηλιοστάτες αντανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία στην εστία με το μικρότερο δυνατό κόστος. Μία ποικιλία σχημάτων έχει προταθεί για τις εστίες, που περιλαμβάνουν κυλινδρικούς και κοίλους αποδέκτες. Το βέλτιστο σχήμα του αποδέκτη επηρεάζεται από την ακτινοβολία που μαζεύεται, τις θερμικές απώλειες και την διάταξη του πεδίου των ηλιοστατών. Για τα μεγάλα πεδία ηλιοστατών ο κυλινδρικός αποδέκτης προτιμάται και χρησιμοποιείται με μηχανές που λειτουργούν με το θερμοδυναμικό κύκλο Rankine. Άλλη μία πιθανότητα είναι η χρήση του κύκλου Brayton που απαιτεί θερμοκρασίες της τάξης των 1000°C και σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται κοίλοι αποδέκτες.

Για λειτουργία με αεροστρόβιλο το ρευστό μεταφοράς είναι ο αέρας ο οποίος χρησιμοποιείται σε αποδέκτη που είναι υπό πίεση. Εργοστάσια που χρησιμοποιούν τον συνδυασμένο θερμοδυναμικό κύκλο απαιτούν 30% λιγότερο εμβαδόν συλλέκτη από τους αντίστοιχους κύκλους ατμού. Το πρωτότυπο αυτού του είδους συστήματος έχει κατασκευαστεί σαν μέρος ενός Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος και δοκιμάστηκε με τρεις διαφορετικούς αποδέκτες με αεροστρόβιλο δυναμικότητας 250 kW.

Το Αμερικανικό Τμήμα Ενέργειας σε μία συνεργασία με αμερικανικές βιομηχανίες κατασκεύασαν το πρώτο μεγάλης κλίμακας πειραματικό σύστημα κεντρικής εστίας στην έρημο κοντά στο Barstow, στην Καλιφόρνια που ονομάζεται «Solar One». Το σύστημα λειτούργησε επιτυχώς από το 1982 έως το 1988, και το κύριο αποτέλεσμα του πειράματος ήταν να αποδείξει ότι ο τύπος αυτός των ηλιακών συστημάτων μπορεί να δουλέψει αποδοτικά και να παράξει ηλεκτρισμό από τον ήλιο. Το σύστημα ήταν της τάξεως των 10 MW. Το πρώτο αυτό σύστημα χρησιμοποιούσε νερό/ατμό σαν ρευστό μεταφοράς θερμότητας στον αποδέκτη αλλά παρουσίασε διάφορα λειτουργικά προβλήματα αποθήκευσης και συνεχούς λειτουργίας του ατμοστρόβιλου.

Αυτά τα προβλήματα λυθήκαν με το «Solar Two», το οποίο ήταν μια αναβαθμισμένη έκδοση του Solar One. Το Solar Two λειτούργησε από το 1996 έως το 1999. Το Solar Two έδειξε πως η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί αποδοτικά και οικονομικά σαν θερμότητα σε δεξαμενές υγροποιημένου αλατιού έτσι που η ηλεκτρική ενέργεια να μπορεί να παράγεται και όταν ο ήλιος δεν λάμπει. Το σύστημα Solar Two, χρησιμοποιούσε νιτρικό αλάτι τόσο σαν ρευστό μεταφοράς της ενέργειας όσο και σαν μέσο αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας. Σε αυτό το σύστημα το υγροποιημένο αλάτι διοχετεύεται από την δεξαμενή αποθήκευσης χαμηλής θερμοκρασίας γύρω στους 290°C μέσα από τον αποδέκτη του συστήματος που θερμαίνεται και επιστρέφει στην δεξαμενή αποθήκευσης ψηλής θερμοκρασίας γύρω στους 565°C. Η θερμική αποθήκη έχει δυνατότητα αποθήκευσης μέχρι 3 ώρες. Χρησιμοποιώντας αποθήκευση θερμικής ενέργειας τα συστήματα κεντρικής εστίας είναι δυνατό να λειτουργήσουν για το 65% του χρόνου χωρίς εφεδρικό καύσιμο. Χωρίς αποθήκευση οι ηλιακές τεχνολογίες που είδαμε μέχρι τώρα περιορίζονται σε συντελεστές απόδοσης κοντά στο 25%. Έχει υπολογιστεί ότι με την έρευνα και την τεχνολογική ανάπτυξη που προγραμματίζεται μέχρι το 2020 τα συστήματα αυτά θα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια γύρω στα US\$ 0.04/kWh (€0.026/kWh) [6]. Φωτογραφία του συστήματος Solar Two φαίνεται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2: Φωτογραφία του συστήματος Solar Two

2.3 Παραβολικά συστήματα σημειακής εστίασης

Τα παραβολικά συστήματα σημειακής εστίασης χρησιμοποιούν καθρέφτες σχήματος πιάτου για να συγκεντρώσουν τις ακτίνες του ήλιου στον αποδέκτη που είναι τοποθετημένος στην εστία της παραβολής. Ο αποδέκτης απορροφά την ηλιακή ενέργεια και την μετατρέπει σε θερμική. Αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας ως θερμότητα αλλά η πιο διαδεδομένη εφαρμογή είναι η χρήση της για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η θερμική ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί σε μια κεντρική γεννήτρια για μετατροπή ή μπορεί να μετατραπεί απευθείας σε ηλεκτρική από τοπική γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη με τον αποδέκτη.

Το σύστημα σημειακής εστίασης/θερμικής μηχανής είναι ένα απομονωμένο σύστημα που αποτελείται κυρίως από τον συλλέκτη, τον αποδέκτη και την θερμική μηχανή όπως φαίνεται στην Εικόνα 3. Λειτουργεί συλλέγοντας και συγκεντρώνοντας τις ακτίνες του ήλιου στον αποδέκτη ο οποίος τις μαζεύει, τις μετατρέπει σε θερμική ενέργεια η οποία μεταφέρεται στην θερμική μηχανή. Η θερμότητα μετατρέπεται στην θερμική μηχανή σε μηχανική ενέργεια με ένα τρόπο παρόμοιο με τις συμβατικές θερμικές μηχανές. Μία ηλεκτρική γεννήτρια μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρισμό.



Εικόνα 3: Φωτογραφία του συστήματος σημειακής εστίασης που κατασκευάστηκε από Ευρωπαϊκές εταιρείες (Eurodish) με θερμική μηχανή τύπου Stirling

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου σε δύο άξονες και έτσι είναι τα πιο αποδοτικά συστήματα διότι πάντα είναι επικεντρωμένα στον ήλιο. Ο λόγος συγκέντρωσης των συστημάτων αυτών είναι από 600 έως 2000, και μπορούν να πετύχουν θερμοκρασίες της τάξεως των 1500°C . Παρόλο που θερμικές μηχανές διαφόρων τύπων έχουν δοκιμαστεί με αυτού του είδους τους συλλέκτες, η κυριότερη εφαρμογή είναι με θερμικές μηχανές τύπου Stirling [7, 8].

Το κάθε σύστημα παράγει ηλεκτρισμό από 5 έως 25 kW και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανεξάρτητα ή σε αριθμό συστημάτων για να αυξηθεί η δυναμικότητα του συστήματος. Για ένα σύστημα 650 kW που αποτελείται από 25 συστήματα, 25 kW το κάθε ένα, απαιτείται ένα εκκάριο γης.

Το επίκεντρο στην κατασκευή νέων συστημάτων βρίσκεται στις Ηνωμένες Πολιτείες και στην Ευρώπη και είναι για συστήματα 10 kWe για απομονωμένες εφαρμογές. Τρία τέτοια συστήματα έχουν δοκιμαστεί στο Plataforma Solar de Almeria στην Ισπανία ενώ μέσα από το Ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα EURODISH, έχει κατασκευαστεί ένα οικονομικά αποδοτικό σύστημα δυναμικότητας 10 kW (βλ. Εικόνα 3) για αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το ερευνητικό αυτό πρόγραμμα πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία βιομηχανίας και της ακαδημαϊκής κοινότητας.

3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Και τα τρία συστήματα που αναλύθηκαν σε αυτή τη μελέτη μπορούν να τροφοδοτηθούν με συμβατικό καύσιμο (συνήθως φυσικό αέριο) για να λειτουργούν σε ώρες χαμηλής ηλιοφάνειας ή την νύκτα ενώ από τα τρία συστήματα το μόνο που δεν προσφέρει δυνατότητα αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας είναι το παραβολικό σύστημα σημειακής εστίασης που είναι σημαντικό μειονέκτημα, αφού μπορεί να λειτουργεί μόνο τις ώρες της ηλιοφάνειας και με συμβατικό καύσιμο. Ως εκ τούτου η επιλογή που θα πρέπει να γίνει για την Κύπρο είναι μεταξύ των παραβολικών συστημάτων γραμμικής εστίασης και κεντρικής εστίας, με το πρώτο να έχει υψηλή ηλιακή-σε-ηλεκτρική απόδοση και χαμηλή απαίτηση σε εμβαδόν ανά εγκατεστημένο MWh ενώ το δεύτερο να έχει δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε πολύ χαμηλό κόστος, παρόλο που η απόδοση του είναι λίγο χαμηλότερη και η απαίτηση σε εμβαδόν ανά εγκατεστημένο MWh είναι μεγαλύτερη.

Και τα δύο αυτά συστήματα απαιτούν επίπεδους χώρους ανάπτυξης παρόλο που για το παραβολικό σύστημα γραμμικής εστίασης μπορεί να εγκατασταθεί και σε χώρους με διαφορετικά επίπεδα (σκαλωτά). Λόγω της κυρίως της ώριμης τεχνολογίας που χρησιμοποιούν και των άλλων πλεονεκτημάτων που έχουν προαναφερθεί, ο συγγραφέας πιστεύει ότι το παραβολικό σύστημα γραμμικής εστίασης είναι το καταλληλότερο για την Κύπρο.

Όλοι οι υπάρχοντες ηλεκτροπαραγωγικοί σταθμοί βρίσκονται παραθαλάσσια. Ο ηλιακός σταθμός θα πρέπει να τοποθετηθεί κοντά σε ένα από αυτούς τους σταθμούς για εύκολη πρόσβαση στο δίκτυο και χρήση του νερού της θάλασσας στο συμπυκνωτή. Η τοποθέτηση ενός τέτοιου σταθμού στο εσωτερικό του νησιού δεν είναι εφικτή λόγω της έλλειψης νερού που απαιτείται για την συμπύκνωση του ατμού. Επιπρόσθετα η τοποθέτηση του σταθμού κοντά στην θάλασσα δίνει την δυνατότητα να συνδυαστεί η ηλεκτροπαραγωγή με την παραγωγή αφαλατωμένου νερού που είναι εξ' ίσου αναγκαίο αγαθό για την Κύπρο.

Μία πρώτη εκτίμηση δείχνει ότι η περιοχή κοντά στον σταθμό του Βασιλικού είναι η πιο κατάλληλη για πολλούς λόγους. Οι κυριότεροι είναι ότι ο εν λόγω ηλεκτροπαραγωγικός σταθμός είναι ο μεγαλύτερος της Κύπρου, η γειτνίαση με την θάλασσα, η δημιουργία του τερματικού σταθμού φυσικού αερίου στη περιοχή, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιείται σαν εφεδρικό καύσιμο, η άμεση πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο και τέλος η ορατότητα του συστήματος από τον αυτοκινητόδρομο Λευκωσίας-Λεμεσού για θέμα προβολής της χρήσης ηλιακής ενέργειας στο κοινό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Geyer M., Quaschnig V., *Renewable Energy World*, July-Aug 2000, pp. 184-191, 2000.
2. Wolff G., Gallego B., Tisdale R., Hopwood D., CSP concentrates the mind, *Renewable Energy Focus*, January/February 2008, pp. 42-47, 2008.
3. Muller-Steinhagen H., Trieb F., Concentrating solar power: A review of the technology, *Ingenia*, Vol. 18, pp. 43-50, 2004.
4. Kearney D.W., Price H.W., Solar thermal plants - LUZ concept (current status of the SEGS plants), *Proceedings of the 2nd Renewable Energy Congress*, Reading UK, Vol. 2, pp. 582-588, 1992.
5. Taggart S., Parabolic troughs: CSP's quiet achiever, *Renewable Energy Focus*, March/April 2008, pp. 46-50, 2008.
6. Taggart S., Hot stuff: CSP and the power tower, *Renewable Energy Focus*, May/June 2008, pp. 51-54, 2008.
7. Schwarzbözl P., Pitz-Paal R., Meinecke W., Buck R., Cost-optimized solar gas turbine cycles using volumetric air receiver technology, *Proceedings of the Renewable Energy for the New Millennium*, Sydney, Australia, pp. 171-177, 2000.
8. Chavez J.M., Kolb G.J., Meinecke W., *Second Generation Central Receiver Technologies- A Status Report*. Becker M., Klimas P.C. (Eds.), Verlag C.F. Müller GmbH, Karlsruhe, Germany, 1993.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Γ. Μαρτινόπουλος, Γ. Τσιλιγκιρίδης και Ν. Κυριάκης

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,
Τ.Κ. 54 124, Τ.Θ. 487, Θεσσαλονίκη, e-mail: martin@meng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα συστήματα εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης είναι τα πιο ευρέως διαδεδομένα συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Η Ελλάδα κατέχει σημαντική θέση στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, τόσο όσον αφορά στον εγκαταστημένο αριθμό συλλεκτών όσο και όσον αφορά στην παραγωγή και εξαγωγή ηλιακών συστημάτων. Για να επιτευχθεί μεγαλύτερος βαθμός διείσδυσης των ηλιακών θερμικών συστημάτων στην αγορά, πέρα από την λήψη μέτρων από την πολιτεία, είναι απαραίτητη η βελτίωση της απόδοσης τους, η μείωση του κόστους και η ευκολία εγκατάστασης/χρήσης τους.

Σε μια προσπάθεια για επίτευξη των παραπάνω στόχων αναπτύχθηκε ένας πρότυπος ηλιακός συλλέκτης. Ο συλλέκτης αυτός περιλαμβάνει όλα τα δομικά στοιχεία ενός κλασσικού επίπεδου με μόνη διαφορά ότι αντί ενός μεταλλικού απορροφητή, το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας, το οποίο έχει μαύρο χρώμα, κυκλοφορεί σε μια διαφανή κατασκευή με αποτέλεσμα να λειτουργεί και ως απορροφητής και ως μέσο μεταφοράς θερμότητας.

Στην εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής αξιολόγησης του συλλέκτη σύμφωνα με το πρότυπο ISO-9801. Από τα πρώτα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι η απόδοση του είναι ικανοποιητική, παραπλήσια αυτής των «κλασσικών» ηλιακών συλλεκτών και με δυνατότητες περαιτέρω βελτίωσης μέσω της βελτιστοποίησης των τεχνικών προδιαγραφών και των παραμέτρων λειτουργίας του.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένας από τους βασικούς στόχους της ΕΕ στον τομέα της ενέργειας είναι η αποδέσμευση από τα υγρά καύσιμα και η αύξηση του ποσοστού των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο της κοινότητας αποτελεί ένα εργαλείο για την επίτευξη του στόχου αυτού. Σύμφωνα με τους στόχους που θεσπίστηκαν στην Λευκή Βίβλο το 1997, τα κράτη-μέλη θα πρέπει να έχουν φροντίσει ώστε μέχρι το 2010 η συμμετοχή των ΑΠΕ να έχει φτάσει από το 6% στο 12%, ενώ η ηλεκτροπαραγωγή από τις ΑΠΕ θα πρέπει να αυξηθεί από 14% σε 22% [1]. Η ηλιακή ενέργεια κατέχει μία σημαντική θέση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα ηλιακά συστήματα βρίσκονται στο κέντρο του ενδιαφέροντος, με σημαντικότερα για τον ευρωπαϊκό χώρο τα ηλιακά συστήματα παραγωγής ζεστού νερού χρήσης.

Τα τελευταία χρόνια η ευρωπαϊκή αγορά (Ε.Ε.27+Ελβετία) ηλιακών θερμικών συστημάτων παρουσίασε σημαντική αύξηση με αποτέλεσμα στο τέλος του 2007 η συνολικά εγκατεστημένη επιφάνεια τους να φτάνει τα 21,9 εκατ. m², ή περίπου 15,3 GW_{th}. Η συντριπτική πλειονότητα των συστημάτων αυτών αποτελούνται από επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες [2].

Για την περαιτέρω αύξηση της διάδοσης των ηλιακών θερμικών συστημάτων είναι απαραίτητες τεχνικο-οικονομικές βελτιώσεις, ώστε να είναι ακόμα περισσότερο συμφέρουσα η χρήση τους σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα.

Σε μια προσπάθεια μείωσης του κόστους και βελτίωσης της απόδοσης των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών αναπτύχθηκε ένας πρότυπος ηλιακός συλλέκτης. Ο συλλέκτης αυτός περιλαμβάνει όλα τα δομικά στοιχεία ενός κλασσικού επίπεδου ηλιακού συλλέκτη με μόνη διαφορά ότι αντί ενός μεταλλικού απορροφητή, το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας, το οποίο έχει μαύρο χρώμα, κυκλοφορεί σε μια διαφανή κατασκευή με αποτέλεσμα να λειτουργεί και ως απορροφητής και ως μέσο μεταφοράς θερμότητας.

Για τον πειραματικό προσδιορισμό της ενεργειακής απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη χρησιμοποιήθηκε διάταξη σύμφωνη με τον κανονισμό ISO 9806-1 και στη συνέχεια τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά τυπικών επίπεδων ηλιακών συλλεκτών που κυκλοφορούν στην αγορά.

2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΜΕ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ

Οι κοινοί ηλιακοί θερμοσίφωνες για τη θέρμανση νερού οικιακής χρήσης χρησιμοποιούν επίπεδους συλλέκτες και αποτελούν την πιο διαδεδομένη εφαρμογή για την εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας με μετατροπή σε θερμότητα. Η μέση ετήσια απόδοση μετατροπής είναι περίπου 30 – 40% [3].

Οι επίπεδοι συλλέκτες εκμεταλλεύονται την ολική ακτινοβολία και επιδιώκεται βελτίωση του βαθμού απόδοσης η_R με μείωση των απωλειών ή / και με αύξηση του λόγου της απορροφητικότητας προς την ικανότητα εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας.

Το κεντρικό δομικό στοιχείο ενός τυπικού επίπεδου συλλέκτη αποτελεί η μαύρη μεταλλική απορροφητική επιφάνεια στην οποία γίνεται μετατροπή της απορροφούμενης ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα. Η θερμότητα αυτή μεταφέρεται σε κάποιο ρευστό το οποίο κυκλοφορεί μέσα σε κατάλληλα διαμορφωμένους αγωγούς που είναι ενσωματωμένοι στον απορροφητή. Ο απορροφητής καλύπτεται στην πάνω πλευρά από ένα διαφανές κάλυμμα που μειώνει της απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας προς την ατμόσφαιρα ενώ η πλάτη και τα πλαϊνά του απορροφητή είναι μονωμένα για περιορισμό των απωλειών προς το περιβάλλον. Όλα τα παραπάνω βρίσκονται «συσκευασμένα» σε ένα μεταλλικό συνήθως πλαίσιο που προσφέρει προστασία από τις καιρικές συνθήκες και ακαμψία.

Από τα πρώτα βήματα της εξέλιξης της επιστήμης και της τεχνολογίας των ηλιακών, ένα μεγάλο ποσοστό της προσοχής των σχεδιαστών επικεντρώθηκε στα πολυμερή, εξ αιτίας των ευνοϊκών χαρακτηριστικών τους. Είναι ευρέως διαθέσιμα χαμηλού κόστους υλικά, τα οποία θα μπορούσαν να επιτρέψουν μεγάλη παραγωγή ελαφρών, χαμηλού κόστους συλλεκτών, ανθεκτικών στη διάβρωση και στις χαμηλές θερμοκρασίες.

Αν και από τα μέσα της δεκαετίας του '70, αμέσως μετά τις πετρελαϊκές κρίσεις, έγιναν προσπάθειες για την κατασκευή ηλιακών συλλεκτών από πολυμερή υλικά, η τότε απουσία κατάλληλων χαρακτηριστικών οδήγησε γρήγορα στην εγκατάλειψή τους [4]. Η χρήση τους περιορίστηκε ουσιαστικά στην Β. Αμερική και στην Αυστραλία, για θέρμανση κολυμβητικών δεξαμενών.

Τα τελευταία χρόνια, εξαιτίας των ραγδαίων εξελίξεων στο χώρο των πολυμερών αναζωπυρώθηκε το ενδιαφέρον για κατασκευή αποδοτικών συλλεκτών χαμηλού κόστους κατασκευασμένων από πολυμερή. Ενδεικτικά αναφέρονται κάποιες από αυτές τις προσπάθειες:

- Πλαστικές απορροφητικές επιφάνειες με επιλεκτική επικάλυψη. Η έρευνα είχε επικεντρωθεί στην χρήση των αναπτυσσόμενων συστημάτων για αφαλάτωση [5].
- Σχεδιασμός συλλέκτη με πλαστική απορροφητική επιφάνεια στην οποία το πίσω τοίχωμα του συλλέκτη παίζει τον ρόλο του απορροφητή [6].

Παρά την αυξανόμενη χρήση των πολυμερών υλικών ως τμημάτων ηλιακών συλλεκτών, η

αξιοπιστία τους, η διάρκεια ζωής και συνολικά η μακροπρόθεσμη απόδοσή τους είναι ζητήματα προς έρευνα.

Η χρήση των πολυμερών υλικών μειώνει το βάρος των συλλεκτών κατά 50% σε σύγκριση με έναν παραδοσιακό μεταλλικό συλλέκτη και επιτρέπει την πολύ ευκολότερη εγκατάστασή του [7]. Τα πολυμερή διαφανή καλύμματα προσφέρουν σημαντική δυνατότητα οικονομίας χρησιμοποιούμενα ως άμεσα υποκατάστατα των γυάλινων καλυμμάτων στα παραδοσιακά συστήματα συλλεκτών [8]. Τα απαραίτητα χαρακτηριστικά των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν ως διαφανή καλύμματα περιλαμβάνουν υψηλή διαπερατότητα σε όλο το ηλιακό φάσμα και αντοχή στη μακροπρόθεσμη (10-20 έτη) έκθεση σε συνθήκες λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένων των αυξημένων θερμοκρασιών (55 - 90°C) και του υπεριώδους (UV) ηλιακού φωτός. Επιπρόσθετα πρέπει να διατηρούν τη μηχανική ακεραιότητά τους κάτω από κάθε τύπου καιρικές συνθήκες.

Η χρήση των πολυμερών υλικών για την κατασκευή διάφανων καλυμμάτων ξεκίνησε την δεκαετία του '70. Πολλές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί με βάση τα πολυμερή ως υλικά ηλιακών συλλεκτών. Λεπτόπαχα κυψελοειδή υλικά πολυκαρβονικών υπό μορφή τετραγωνικών κυψελών χρησιμοποιούνται εκτενώς ως υλικά καλυμμάτων συλλεκτών.

Από τα διάφορα πολυμερή ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα διαφανή καλύμματα τετραφθαλικού πολυαιθυλενίου (PET) τα οποία έχουν υψηλή οπτική ευκρίνεια, χαμηλό κόστος και καλές μηχανικές ιδιότητες. Εντούτοις, η συνήθης θερμοκρασία χρήσης του PET είναι αρκετά χαμηλή και η αντίστασή του στην υπεριώδη ακτινοβολία είναι γενικά μικρή. Τα τελευταία χρόνια, τα προϊόντα σταθεροποίησης σε υπεριώδη ακτινοβολία έχουν αναπτυχθεί με την ενσωμάτωση στα χρησιμοποιούμενα φιλμ μεγάλου ποσοστού απορροφητών UV. Το πολυαιθυλενοναφθαλενοδικαρβοξύλιο (PEN) έχει αναπτυχθεί ως μια ακριβότερη εναλλακτική λύση του PET, με βελτιωμένες ως προς αυτό, τις θερμικές και τις μηχανικές ιδιότητες. Παρουσιάζει επίσης αυξημένη αντοχή στην γήρανση κατά την έκθεση του σε UV ακτινοβολία. Ανθεκτικά στη UV ακτινοβολία είναι και τα ακρυλικά, ωστόσο, γενικά δεν μπορούν να αντέξουν στις θερμοκρασίες λειτουργίας των ηλιακών συλλεκτών. Επιπλέον, είναι αρκετά εύθραυστα και επομένως ευαίσθητα σε καταστροφές όπως αυτές που μπορεί να προκαλέσει το χαλάζι. Τέλος, τα πολυκαρβονικά πλαστικά (PC) παρουσιάζουν υψηλή οπτική ευκρίνεια και άριστες μηχανικές ιδιότητες. Εντούτοις, με την παρατεταμένη έκθεση σε UV κιτρινίζουν και χάνουν μέρος των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Πρόσφατα, αναπτύχθηκαν σταθεροποιημένες εκδόσεις του πολυκαρβονικού, είτε θερμικά σταθεροποιημένη μορφή (έχοντας μια σταθερή μέγιστη θερμοκρασία χρήσης 180°C) είτε σταθεροποιημένο και ως προς τη θερμοκρασία και ως προς την υπεριώδη ακτινοβολία [9].

Το επόμενο στάδιο στη χρήση πολυμερών υλικών σε ηλιακούς συλλέκτες είναι ο απορροφητής. Η αρχική πρόκληση για να κατασκευαστεί ένας εναλλάκτης θερμότητας από πολυμερές είναι να επιλεγεί ένα πολυμερές που να είναι [10]:

- συμβατό με το πόσιμο νερό και
- ικανό να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις αυξημένης πίεσης και θερμοκρασίας των συστημάτων ζεστού νερού εσωτερικής χρήσης μέχρι και για 10 έτη, χωρίς μείωση της θερμικής απόδοσης.

Η χρήση των πολυμερών για την κατασκευή των εναλλακτών θερμότητας έχει δυνητικά τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- μειωμένο κόστος υλικών και κατασκευής
- αντίσταση στη διάβρωση και στη επικάλυψη αλάτων. Το τελευταίο οδηγεί σε χαμηλότερες δαπάνες συντήρησης συγκριτικά με εκείνες για τους μεταλλικούς εναλλάκτες θερμότητας
- μειωμένο βάρος και εύκολη εγκατάσταση.

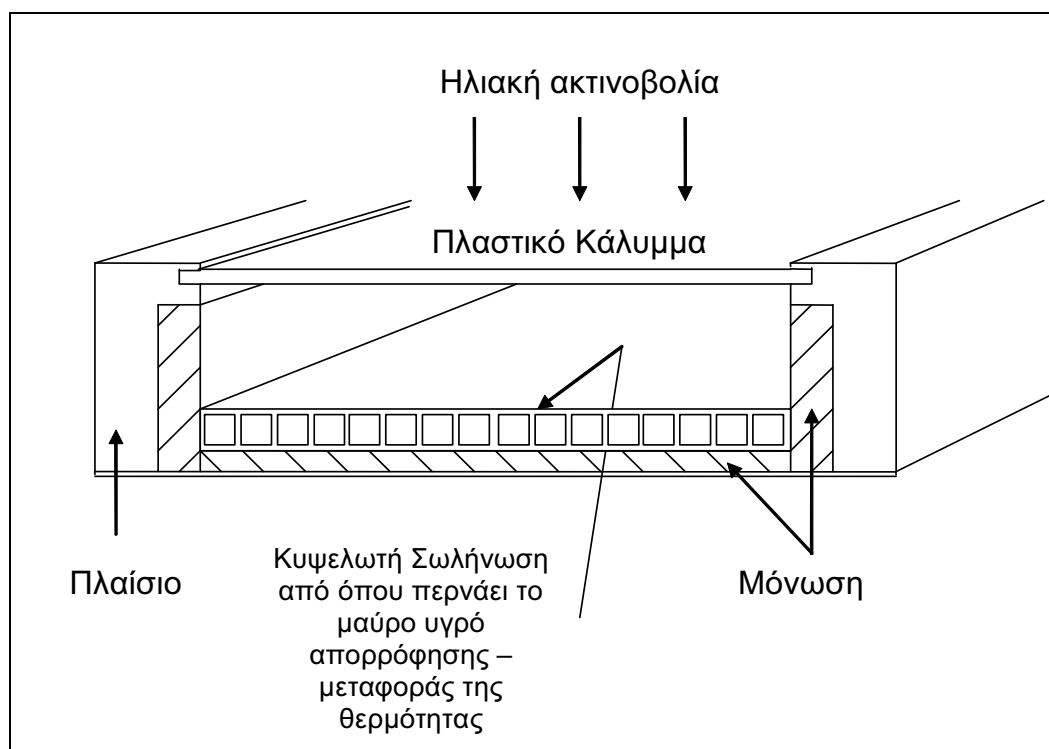
Συνοψίζοντας, τα πολυμερή υλικά που θα χρησιμοποιηθούν σε ηλιακούς συλλέκτες πρέπει να μην είναι υδροσκοπικά, να διατηρούν τις διαστάσεις τους σταθερές σε θερμοκρασίες λειτουργίας των 80 °C για τουλάχιστον 10 έτη χωρίς να παρουσιάζουν εξογκώματα, χαλάρωση ή υδρόλυση σε αυτήν την περίοδο. Επειδή η επίδραση της θερμοκρασίας και της πίεσης στη βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη απόδοση του πολυμερούς είναι κρίσιμη, ο δείκτης θερμότητας, η αντίσταση σε ερπυσμό και η θερμοκρασία στρέβλωσης πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή.

Μεταξύ των καταλληλότερων πολυμερών υλικών για τον σχεδιασμό ενός απορροφητή είναι και εκείνα της ομάδας πολυολεφινών, όπως το πολυαιθυλένιο και το πολυπροπυλένιο και της ομάδας EPDM, γνωστά ως συνθετικά ελαστικά. Από αυτά, οι πολυολεφίνες είναι κυρίως κατάλληλες για την κατασκευή των επίπεδων άκαμπτων απορροφητών, ενώ τα υλικά EPDM είναι κατάλληλα για την παραγωγή εύκαμπτων σωλήνων κυρίως για συλλέκτες χαμηλής θερμοκρασίας όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται για θέρμανση κολυμβητικών δεξαμενών. Η θερμική αγωγιμότητα των ακρυλικών και των παραγώγων αυτών, κυμαίνεται μεταξύ 0,17 και 0,23 W/(mK), ενώ των πολυολεφινών και των EPDM αντίστοιχα, που παρέχουν το πλεονέκτημα του χαμηλού κόστους, μεταξύ 0,35 και 0,15 W/(mK), αντίστοιχα [9].

Οι υψηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας είναι απαραίτητες για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές ηλιακής ενέργειας με συμβατικούς συλλέκτες, και οδηγεί στον επανασχεδιασμό του απορροφητή.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Το προτεινόμενο σύστημα περιλαμβάνει όλα τα συνηθισμένα τμήματα ενός τυπικού συλλέκτη. Η διαφορά είναι ότι αντί ενός μεταλλικού απορροφητή, το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας, το οποίο έχει μαύρο χρώμα, κυκλοφορεί σε μια διαφανή κατασκευή όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Με τον τρόπο αυτό λειτουργεί και ως απορροφητής και ως μέσο μεταφοράς θερμότητας.



Εικόνα 1: Τομή επίπεδου ηλιακού συλλέκτη

Δεδομένου ότι το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας θα ενεργεί και ως μέσο απορρόφησης της ηλιακής ενέργειας και μετατροπής της σε θερμότητα είναι σημαντικό το πολυμερές που θα χρησιμοποιηθεί να έχει δείκτη διάθλασης και διαπερατότητας αλλά και φωτοσταθερότητα παρόμοια ή και καλύτερη από αυτό του γυαλιού, ειδικά στην υπεριώδη ακτινοβολία, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπλέον απαιτείται χαμηλή θερμική αγωγιμότητα ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε η κατασκευή του από κυψελωτό πολυκαρβονικό πλαστικό LEXAN τύπου 2RS των 10mm. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη συνοψίζονται στον Πίνακα 1.

Το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας που έχει μαύρο χρώμα πρέπει να είναι σταθερό σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, να έχει καλή θερμοχωρητικότητα, υψηλή απορροφητικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας και χαμηλό συντελεστή εκπομπής. Επιπλέον πρέπει να εμφανίζει καλά χαρακτηριστικά ροής (ιξώδες) και να μην αφήνει κατάλοιπα στο κύκλωμα κυκλοφορίας. Ως πρώτη προσπάθεια η ερευνητική ομάδα κατέληξε στη χρήση διαλύματος σινικής μελάνης σε νερό σε αναλογία 1:1000.

Πίνακας 1. Τεχνικά Χαρακτηριστικά Συλλέκτη	
Συνολική Επιφάνεια	1,448 m ²
Επιφάνεια Καλύμματος	1,252 m ²
Επιφάνεια Απορρόφησης	1,252 m ²
Αριθμός Καλυμμάτων	1
Υλικό Καλύμματος	3mm συμπαγές διάφανο LEXAN (UV σταθεροποιημένο)
Ρευστό Μεταφοράς	Μίγμα Νερού – Σινικής Μελάνης
Υδραυλική Διάταξη Κυκλοφορίας	Διάφανο κυψελωτό LEXAN (10mm) (UV σταθεροποιημένο)
Αγωγοί Προσαγωγής-Απαγωγής	Ακρυλικοί τετραγωνικής διατομής (8mm)
Βάρος Ρευστού	~14kg
Πίσω Μόνωση	Κυψελωτό LEXAN με nanogel (0,018 W/mK)
Μόνωση Πλαϊνών	PU 30mm (0,03 W/mK)

Τέλος σαν μόνωση στην πίσω πλευρά του συλλέκτη χρησιμοποιήθηκε ένα φύλλο μονωτικού υλικού που βρίσκεται υπό τη μορφή νανο-γέλης (nanogel). Το νανοτζέλ είναι ένα νέο προϊόν που αντιπροσωπεύει την οικογένεια των υδροφοβικών προϊόντων αεροτζέλ πυριτίου. Τα διαφανή μόρια αεροτζέλ επιτρέπουν στο φως να περάσει ενώ χρησιμεύουν και ως μια ιδιαίτερα αποτελεσματική θερμική μόνωση, επιτρέποντας την μείωση του πάχους της μόνωσης και επομένως και του βάρους διατηρώντας ταυτόχρονα την ίδια θερμοπερατότητα.

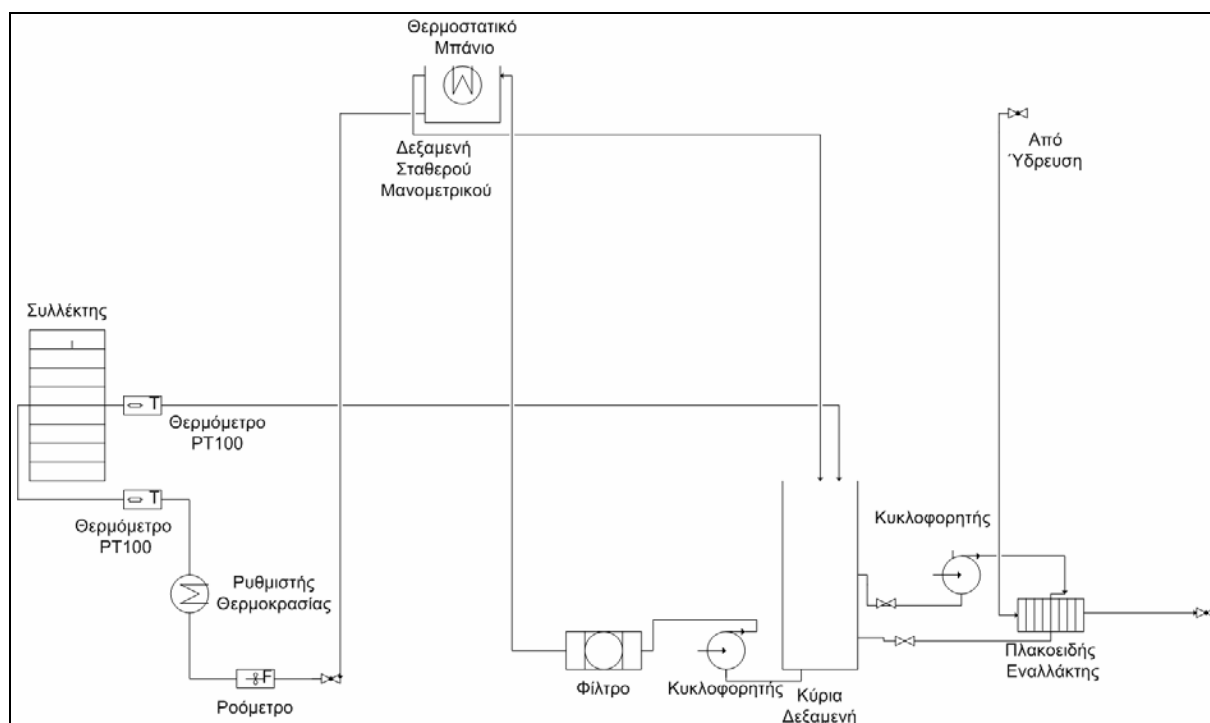
Ο συγκεκριμένος τύπος συλλέκτη συγκεντρώνει πλεονεκτήματα όπως χαμηλό κόστος, χαμηλό βάρος και απλότητα στην κατασκευή.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Για τον πειραματικό προσδιορισμό της ενεργειακής απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη χρησιμοποιήθηκε διάταξη σύμφωνη με τον κανονισμό ISO 9806-1 [11]. Για τη μέτρηση και την καταγραφή των απαραίτητων μεταβλητών χρησιμοποιήθηκε ο μετεωρολογικός σταθμός και η διάταξη (Εικόνα 2) του Εργαστηρίου Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών του ΑΠΘ.

Τα όργανα της μετρητικής διάταξης περιλαμβάνουν:

- Ρόομετρο: OMNI RRH
- Πυρανόμετρο: Eppley PSP
- Θερμοστοιχεία: PT100
- Θερμοστατικό μπάνιο της Julabo ED, με κυκλοφορητή.
- Καταγραφικό της National Instrument τύπου NI-4130



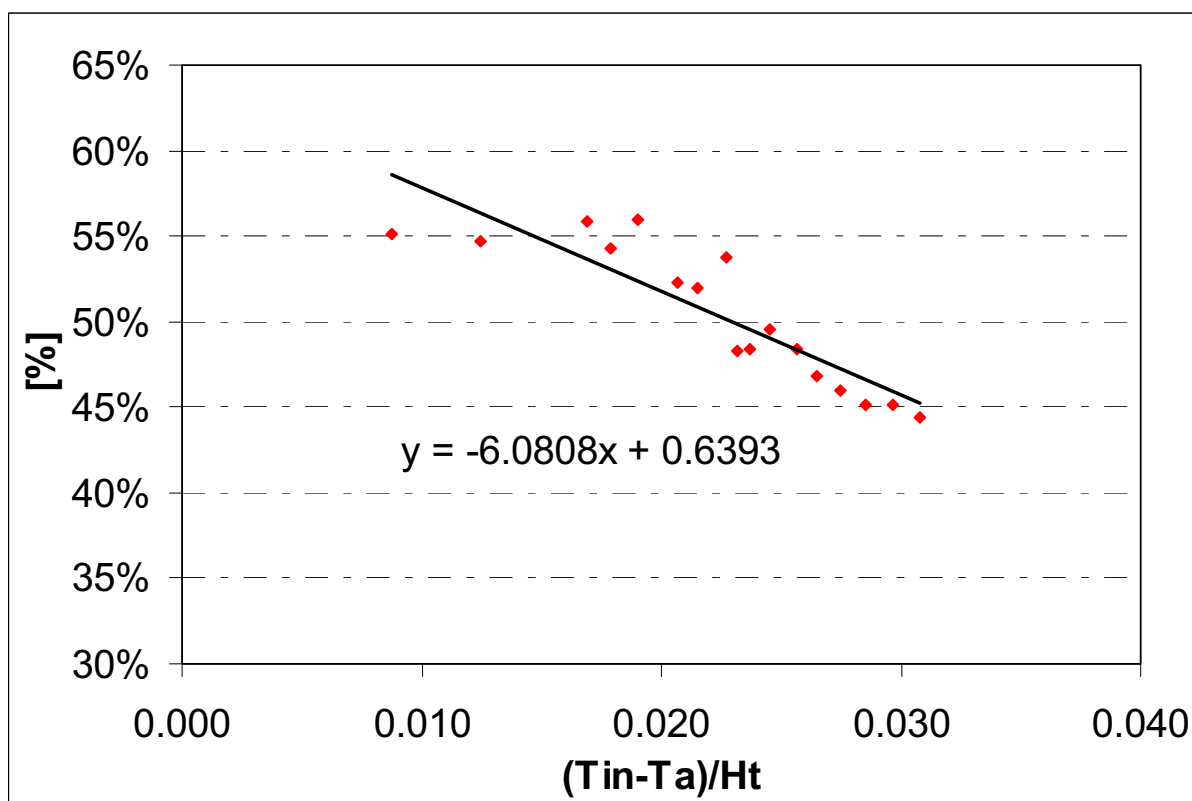
Εικόνα 2: Σχηματικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης μέτρησης

Οι μετρήσεις έγιναν με σταθερή παροχή 1.27l/min η οποία αντιστοιχεί σε παροχή 1.2l/min.m² με θερμοκρασία περιβάλλοντος 18°C και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ~900W/m².

Από τα αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν προέκυψε η γραφική παράσταση της εικόνας 3 η οποία αποδίδει την συμπεριφορά του συλλέκτη και από την οποία προκύπτει ότι τα τεχνικά του χαρακτηριστικά είναι:

- Μέγιστη στιγμιαία απόδοση ($F_r(t_a)$): 63,93%
- Συντελεστής Θερμικών Απωλειών ($F_r U_L$): 6,08 W/m²C

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη είναι συγκρίσιμα με αυτά τυπικών επίπεδων ηλιακών συλλεκτών όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.



Εικόνα 3: Καμπύλη απόδοσης πρότυπου ηλιακού συλλέκτη

Πίνακας 2. Τεχνικά Χαρακτηριστικά Τυπικών Επίπεδων Ηλιακών Συλλεκτών		
Τύπος Συλλέκτη	Μέγιστη στιγμιαία απόδοση	Συντελεστής Θερμικών Απωλειών (W/m ² C)
Χωρίς Κάλυμμα	0,82 – 0,97	10 - 30
Με Κάλυμμα	0,60 – 0,85	3,0 – 8,5
Επίπεδος Βρασμού	0,75 – 0,83	2,5 – 4,5
Σωλήνων Κενού	0,62 – 0,64	0,7 – 2,0

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αν και μέχρι σήμερα έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για την κατασκευή ηλιακών συλλεκτών των οποίων η απορροφητική επιφάνεια είναι κατασκευασμένη από κάποιο πολυμερές, σε μια προσπάθεια περιορισμού του κόστους, εντούτοις λίγες μέχρι τώρα χρησιμοποιούν το ρευστό ως απορροφητική επιφάνεια.

Ο πρότυπος συλλέκτης που κατασκευάστηκε παρουσιάζει παραπλήσια απόδοση με τους ήδη υπάρχοντες με χαμηλότερο όμως κόστος αλλά και βάρος λόγω της αντικατάστασης της μεταλλικής επιφάνειας αλλά και του γυάλινου καλύμματος από πολυμερή.

Στα επόμενα στάδια θα διερευνηθούν παράμετροι σχετικές με την λειτουργία του όπως η σύσταση του υγρού μεταφοράς της θερμότητας, η χρήση θερμοανакλαστικών πλαστικών καλυμμάτων για περαιτέρω βελτιστοποίηση των τεχνικών του χαρακτηριστικών καθώς και η κατασκευή του σε μεγάλο εύρος διαστάσεων.

Επιπρόσθετα, θα διερευνηθούν κατασκευαστικές λύσεις βελτιστοποίησης των σημείων εισόδου και εξόδου του ρευστού στην υδραυλική κατασκευή για μείωση της πτώσης πίεσης και εξασφάλιση βέλτιστης κυκλοφορίας του ρευστού μέσα στα αυλάκια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. European Commission, White Paper: Energy for the future: Renewable sources of energy, 1997.
2. European Solar Thermal Industry Federation, «Solar Thermal Market Statistics in Europe 2007», 2008.
3. EBHE, "Utilisation of solar energy and the role of the Greek Industry"(In Greek), Athens 2001.
4. Landstrom, D., Talbert S., (1979), "Development of a Low-Cost Black Liquid Solar Collector", Washington, US DOE.
5. Rommel, M., Köhl, M., Graf, W., Wellens, C., Brucker, F., Lustig, K., Bahr, P., (1997), "Corrosion-free collectors with selectively coated plastic absorbers", Desalination, Volume 109, Issue 2, May 1997, Pages 149-155
6. Tsilingiris, P.T., (2002), "Back absorbing parallel plate polymer absorbers in solar collector design", Energy Conversion and Management, Vol. 43 No. 1, pp. 135-50.
7. Cristofari, C., Notton, G., Poggi, P. and Louche, A., (2002), "Modelling and performance of a polymer solar water heating collector", Solar Energy, Vol. 72 No. 2, pp. 99-112.
8. Tsilingiris, P.T., (2000), "Heat transfer analysis of low thermal conductivity solar energy absorbers", Applied Thermal Engineering, Vol. 20 No. 14, pp. 1297-314.
9. Wu, C., Mantell, S.C. and Davidson, J., (2004), "Polymers for solar domestic hot water: long-term performance of PB and nylon 6, 6 tubing in hot water", Solar Energy Engineering, Vol. 126 No. 1, pp. 581-6.
10. Raman, R., Mantell, S., Davidson, J., Wu, C., (2000), "A Review of Polymer Materials for Solar Water Heating Systems", Transactions of the ASME, Vol. 122, pp. 91-100.
11. Tsilingiris, P.T., (1997), "Design, analysis and performance of low-cost plastic film large solar water heating systems", Solar Energy, Vol. 60 No. 5, pp. 245-56.
12. ISO, "ISO 9806-1: Test Methods for Solar Collectors".

ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΑΕΡΑ

Χαράλαμπος Τσιουτίης και Σωτήρης Καλογήρου

Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Επιστήμης και
Μηχανικής Υλικών, Τ. Κ. 50329, 3603 Λεμεσός, Κύπρος
E-mail: charalambos.tsioutis@cut.ac.cy, soteris.kalogirou@cut.ac.cy

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτό το άρθρο γίνεται μια ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για τα ηλιακά συστήματα αέρα. Τα ηλιακά συστήματα αέρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ζέσταμα νερού, θέρμανση χώρων και για αποξήρανση καρπών. Εξετάζονται διάφοροι τύποι συλλεκτών αέρα σε σχέση με την κατασκευή και ειδικά την τοποθέτηση του απορροφητή. Βασικά υπάρχουν δυο τύποι ηλιακών συλλεκτών αέρα, μονής διαδρομής και διπλής διαδρομής. Επιπρόσθετα υπάρχουν τα αυτόνομα συστήματα και τα συστήματα που είναι ενσωματωμένα στο κτίριο. Παρουσιάζεται επίσης η βασική θερμική ανάλυση των συλλεκτών αέρα. Αυτή είναι ίδια με την θερμική ανάλυση των συστημάτων νερού εκτός από την απόδοση των πτερυγίων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Γενικά οι ηλιακοί συλλέκτες είναι ένα είδος εναλλάκτη θερμότητας που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε εσωτερική ενέργεια του μέσου μεταφοράς. Οι συλλέκτες αποτελούν το κύριο μέρος ενός ηλιακού συστήματος. Αυτοί απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία, την μετατρέπουν σε θερμότητα και την μεταφέρουν στο ρευστό (συνήθως νερό, αέρα ή λάδι) που κυκλοφορεί στο συλλέκτη. Η συσσωρευμένη ενέργεια μεταφέρεται μέσω του ρευστού είτε άμεσα στο ζεστό νερό ή στον κλιματισμένο χώρο είτε σε κυλίνδρους αποθήκευσης από τους οποίους η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την διάρκεια της νύκτας ή σε περιόδους συννεφιάς. Σε αυτό το άρθρο επικεντρωνόμαστε μόνο στην ανασκόπηση επίπεδων συλλεκτών αέρα.

Τα πλεονεκτήματα των επίπεδων συλλεκτών είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής, η ικανότητα να συλλέγουν άμεση και διάχυτη ακτινοβολία και το γεγονός ότι είναι μόνιμα τοποθετημένα και δεν χρειάζεται να παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου. Οι συλλέκτες τοποθετούνται με κατεύθυνση τον ισημερινό και βλέπουν στο νότο για το βόρειο ημισφαίριο και στο βορά για το νότιο ημισφαίριο. Η κλίση του συλλέκτη να είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος με απόκλιση $\pm 10^\circ - 15^\circ$ ανάλογα με την εφαρμογή.

Είναι γνωστόν ότι η Κύπρος είναι πρωτοπόρος στην χρήση επίπεδων συλλεκτών με νερό ως μέσον μεταφοράς. Αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως για ζέσταμα νερού για οικιακή χρήση [1]. Η χρήση όμως των συλλεκτών αέρα είναι άγνωστη στην Κύπρο. Αυτό το άρθρο σκοπό έχει να υποδείξει τα πλεονεκτήματα των ηλιακών συλλεκτών αέρα και τις πιθανές εφαρμογές τους για να μπορέσουν τα συστήματα αυτά να εισέλθουν στην Κυπριακή αγορά.

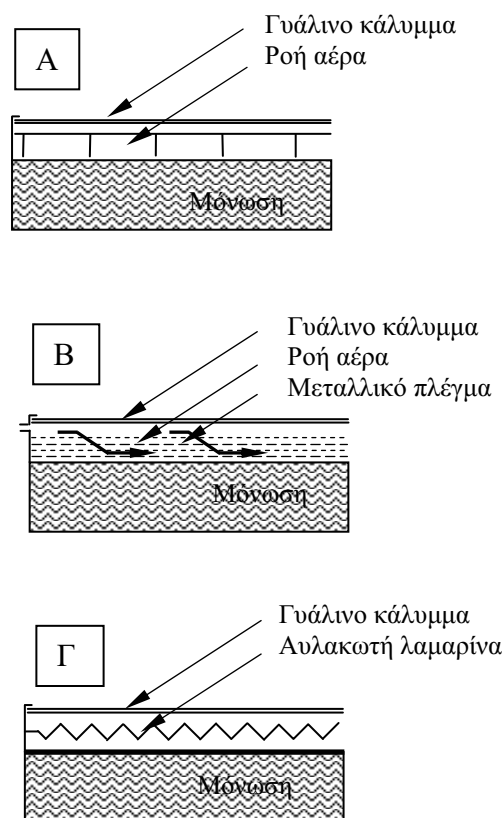
2. ΤΥΠΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΑΕΡΑ

Η κυριότερη διαφορά μεταξύ των συλλεκτών αέρα και νερού είναι στην ανάγκη να σχεδιασθεί ένας απορροφητής που να αντιμετωπίζει το μειονέκτημα της μειωμένης μεταφοράς θερμότητας που προκαλείται από τον χαμηλό συντελεστή ειδικής θερμότητας μεταξύ του αέρα και του απορροφητή ηλιακής ακτινοβολίας.

Σημαντικός αριθμός συλλεκτών αέρα έχουν κατασκευαστεί από πολλούς ερευνητές. Οι διαφορές τους εστιάζονται ως προς την κατασκευή των ακόλουθων μερών:

- Διαπερατότητα του καλύμματος
- Είδος απορροφητή και επιφάνειας συλλέκτη
- Τύπος αεροδιαδρόμων.

Αέρας ή άλλα αέρια μπορούν να ζεσταθούν με την χρήση επίπεδων συλλεκτών ειδικά αν χρησιμοποιηθεί ένα είδος επιμήκυνσης της επιφάνειας (βλ. Εικ. 1Α) για να αντιμετωπίσει τον χαμηλό συντελεστή αγωγιμότητας μεταξύ του μετάλλου και του αέρα [2]. Μέταλλα ή ειδικές ίνες, Εικ. 1Β [2,3], ή λεπτές αυλακωτές μεταλλικές λαμαρίνες, Εικ. 1Γ, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν. Οι πορώδης απορροφητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επιλεγμένες επιφάνειες για αύξηση της απόδοσης. Η αρχική απαίτηση αυτών των συστημάτων είναι η μεγάλη επιφάνεια επαφής μεταξύ της επιφάνειας του απορροφητή και του αέρα. Η ειδική θερμότητα του αέρα είναι λιγότερη από αυτήν του νερού. Άρα χρειάζεται μεγαλύτερη ροή αέρα με επακόλουθο μεγαλύτερες ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια. Όλοι οι τύποι συλλεκτών αέρα που φαίνονται στην Εικ. 1 είναι μονής διαδρομής. Επιπρόσθετα υπάρχουν και συλλέκτες διπλής διαδρομής που περνούν τον αέρα στις δυο κατευθύνσεις του απορροφητή. Αυτοί είναι συνήθως και πιο αποδοτικοί από αυτούς της μονής διαδρομής.

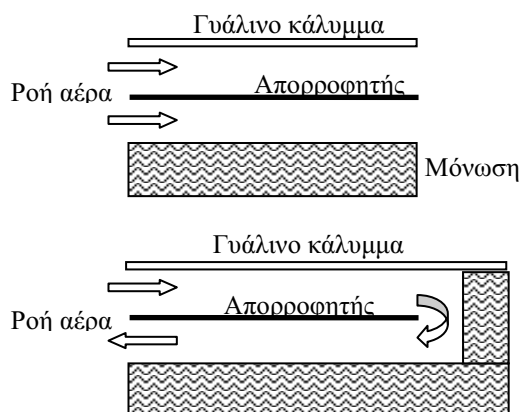


Εικόνα 1: Είδη απορροφητών ηλιακών συλλεκτών αέρα

Σε σχέση με την ροή του αέρα, τέσσερις τύποι παρουσιάζονται:

- Ο αέρας περνά μεταξύ του απορροφητή και του γυαλιού.
- Ο αέρας περνά κάτω από τον απορροφητή.
- Ο αέρας περνά μέσω πορώδους απορροφητή.
- Ο αέρας περνά και από τις δυο πλευρές του απορροφητή (διπλής διαδρομής συλλέκτης).

Όσον αφορά τον τελευταίο τύπο δυο επιλογές είναι πιθανές όπως φαίνονται στην Εικ. 2.



Εικόνα 2: Βασικά σχήματα για συλλέκτες διπλής ροής αέρα

Όσον αφορά τον τρίτο τύπο όπου ο αέρας περνά μέσω ενός πορώδους απορροφητή υπάρχουν πάλι δύο ξεχωριστοί τύποι. Ο ένας φαίνεται στην Εικ. 1B και ο άλλος είναι χωρίς γυαλί, όπου ο αέρας περνά μέσω μικρών οπών στο μεταλλικό απορροφητή, ο οποίος θερμαίνεται από την ηλιακή ενέργεια.

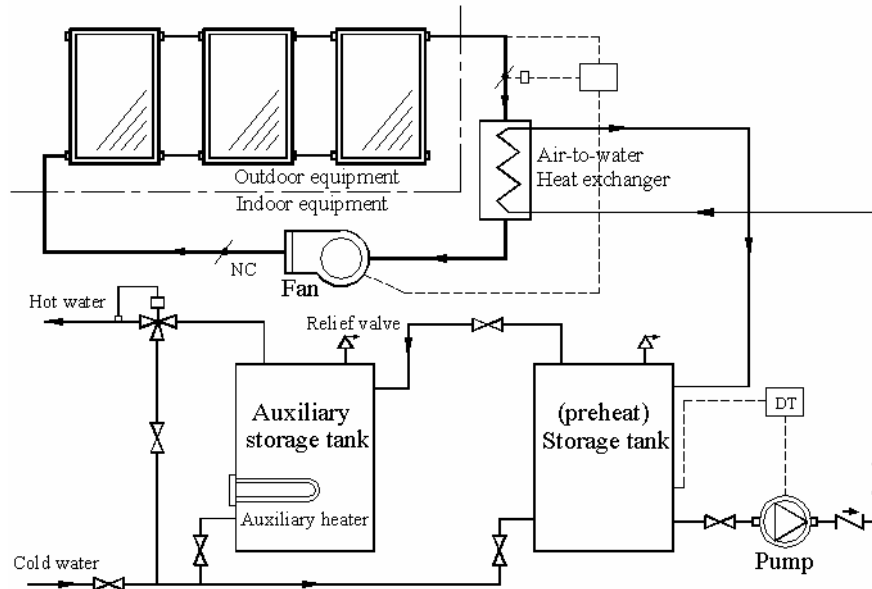
Τα συστήματα αέρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για ζέσταμα νερού όσο και για θέρμανση χώρου. Αυτά τα συστήματα είναι έμμεσου τύπου γιατί ο αέρας κυκλοφορά μέσω αγωγών σε έναν εναλλάκτη αέρα – νερού. Στον εναλλάκτη η θερμότητα μεταφέρεται στο πόσιμο νερό το οποίο επίσης κυκλοφορεί στον εναλλάκτη θερμότητας και επιστρέφει στον κύλινδρο αποθήκευσης. Τα συστήματα θέρμανσης αέρα, παίρνουν τον αέρα του χώρου τον περνούν μέσω των ηλιακών συλλεκτών και τον επιστρέφουν πίσω στον χώρο σε ψηλότερη θερμοκρασία. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται κυρίως διότι τα συστήματα αέρα γενικά χρησιμοποιούνται για προθέρμανση νερού για οικιακή χρήση και με αυτό τον τρόπο η εφεδρική ενέργεια χρησιμοποιείται μόνο στο ένα δοχείο [4].

Το διάγραμμα ενός συστήματος συλλεκτών αέρα με δοχείο αποθήκευσης χαλικιών και εφεδρικό σύστημα θέρμανσης φαίνεται στην Εικ. 4. Οι συλλέκτες αέρα παίρνουν τον αέρα από τον χώρο τον περνούν από τον συλλέκτη και τον διοχετεύουν απευθείας στον χώρο.

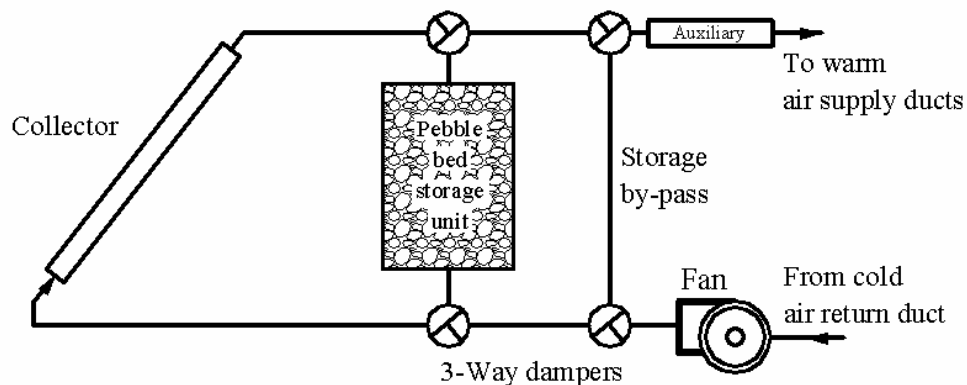
Οι διάφοροι τύποι επιτυγχάνονται με την χρήση συρτών (dampers) όπως φαίνεται στο σχήμα. Συνήθως στα συστήματα αέρα δεν είναι πρακτικό να προσθέτουμε και να αφαιρούμε ενέργεια από το δοχείο αποθήκευσης ταυτόχρονα. Εάν η ενέργεια που δίδεται από την αποθήκευση ή τον συλλέκτη δεν είναι ικανοποιητική για να καλύψει το ζητούμενο φορτίο, εφεδρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ανεβάσει την θερμοκρασία του αέρα και να καλύψει το φορτίο του κτιρίου. Όπως φαίνεται στη Εικ. 4 μπορούμε να παρακάμψουμε τον συλλέκτη και την αποθήκη και να χρησιμοποιήσουμε αποκλειστικά το εφεδρικό σύστημα θέρμανσης για να καλύψουμε τις ανάγκες θέρμανσης. Ένα πιο λεπτομερές διάγραμμα συστήματος θέρμανσης χώρου που ενσωματώνει και σύστημα για ζέσταμα νερού για οικιακή χρήση φαίνεται στη Εικ. 5. Για το ζέσταμα του νερού χρησιμοποιείται ένας θερμικός εναλλάκτης αέρα-σε-νερό. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα δοχείο προθέρμανσης όπως φαίνεται στο σχήμα.

Γενικά, τα πλεονεκτήματα των συλλεκτών αέρα είναι ότι ο αέρας δεν χρειάζεται προστασία από ακραίες θερμοκρασίες (παγετό ή υπερθέρμανση), ο αέρας δεν είναι διαβρωτικό υλικό

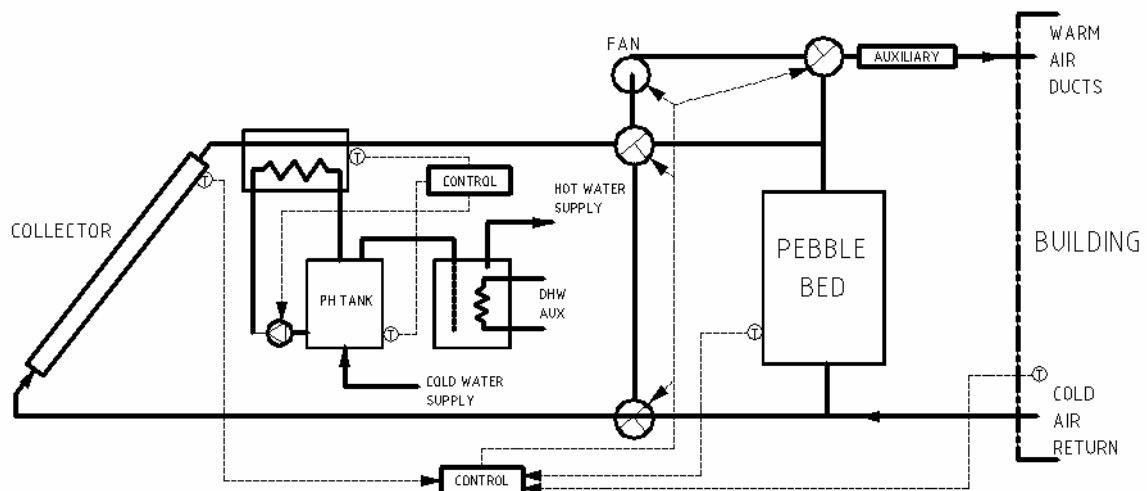
και δεν έχει κόστος. Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται το γεγονός ότι οι αγωγοί και οι ανεμιστήρες μεταφοράς χρειάζονται περισσότερο χώρο από το υδραυλικό σύστημα νερού, οι απώλειες αέρα είναι δύσκολες στον εντοπισμό και υπάρχει μεγαλύτερη απαίτηση σε ηλεκτρική ενέργεια για την λειτουργία των ανεμιστήρων απ' ότι των αντλιών στα υδραυλικά συστήματα.



Εικόνα 3 Σύστημα παραγωγής ζεστού νερού με ηλιακούς συλλέκτες αέρα



Εικόνα 4: Σχεδιάγραμμα του βασικού συστήματος αέρα



Εικόνα 5: Λεπτομερές σχεδιάγραμμα συστήματος αέρα για θέρμανση χώρου

Για τα συστήματα θέρμανσης χώρου, επιπρόσθετα με τα πλεονεκτήματα που προαναφέραμε, άλλα πλεονεκτήματα είναι ο ψηλός βαθμός στρωμάτωσης που συντελείτε στο δοχείο χαλικιών το οποίο οδηγεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες στην είσοδο του συλλέκτη. Επιπρόσθετα, το μέσο μεταφοράς θερμότητας είναι ο αέρας και συστήματα θέρμανσης αέρα είναι συνηθισμένα στα κτίρια. Συστήματα ελέγχου που χρειάζονται για το σύστημα υπάρχουν επίσης στην αγορά.

Πέραν των μειονεκτημάτων των συλλεκτών αέρα που αναφέρθηκαν πιο πάνω, άλλα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν την δυσκολία να χρησιμοποιηθεί για ψύξη, ψηλά κόστα αποθήκευσης και θορυβώδες λειτουργία. Άλλο μειονέκτημα είναι ότι οι συλλέκτες αέρα λειτουργούν με υλικό μεταφοράς θερμότητας με χαμηλή ειδική θερμότητα και ως εκ τούτου χαμηλό F_R από ότι οι συλλέκτες νερού.

3. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΑΕΡΑ

Το διάγραμμα ενός τυπικού επιπέδου συλλέκτη αέρα φαίνεται στη Εικ. 6. Ο αεραγωγός είναι στενός αγωγός με την επιφάνεια της πλάκας απορρόφησης να λειτουργά ως το πάνω κάλυμμα. Η θερμική ανάλυση είναι η ίδια με αυτήν που εφαρμόζεται και στους συλλέκτες νερού εκτός από την απόδοση των πτερυγίων και την αντίσταση των ενώσεων.

Η εξίσωση που δείχνει το ενεργειακό ισοζύγιο σε κομμάτι απορροφητή με εμβαδόν (1.δx) είναι:

$$S(\delta x) = U_t(\delta x)(T_p - T_a) + h_{c,p-a}(\delta x)(T_p - T) + h_{r,p-b}(\delta x)(T_p - T_b) \quad (1)$$

όπου:

$h_{c,p-a}$ = συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από τον απορροφητή στο αέρα δια μεταφοράς (W/m^2-K)

$h_{r,p-b}$ = συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από τον απορροφητή στην πίσω πλάκα του συλλέκτη δια ακτινοβολίας (W/m^2-K)

Το ισοζύγιο ενέργειας του αέρα με όγκο (s.1.δx) δίνει:

$$\left(\frac{\dot{m}}{W}\right)c_p\left(\frac{dT}{dx}\delta x\right) = h_{c,p-a}(\delta x)(T_p - T) + h_{c,b-a}(\delta x)(T_b - T) \quad (2)$$

όπου $h_{c,b-a}$ = συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από την πίσω πλάκα στο αέρα δια μεταφοράς (W/m^2-K).

Το ενεργειακό ισοζύγιο της πίσω πλάκας με εμβαδόν (1.δx) δίνει:

$$h_{r,p-b}(\delta x)(T_p - T_a) = h_{c,b-a}(\delta x)(T_b - T) + U_b(\delta x)(T_b - T_a) \quad (3)$$

Επειδή το U_b είναι πολύ μικρότερο από το U_t , $U_L \approx U_t$. Για αυτό, αγνοώντας το U_b και λύνοντας την εξίσωση (3) για T_b δίνει:

$$T_b = \frac{h_{r,p-b}T_p + h_{c,b-a}T}{h_{r,p-b} + h_{c,b-a}} \quad (4)$$

Αντικαθιστώντας την Εξ. (4) στην Εξ. (1) δίνει:

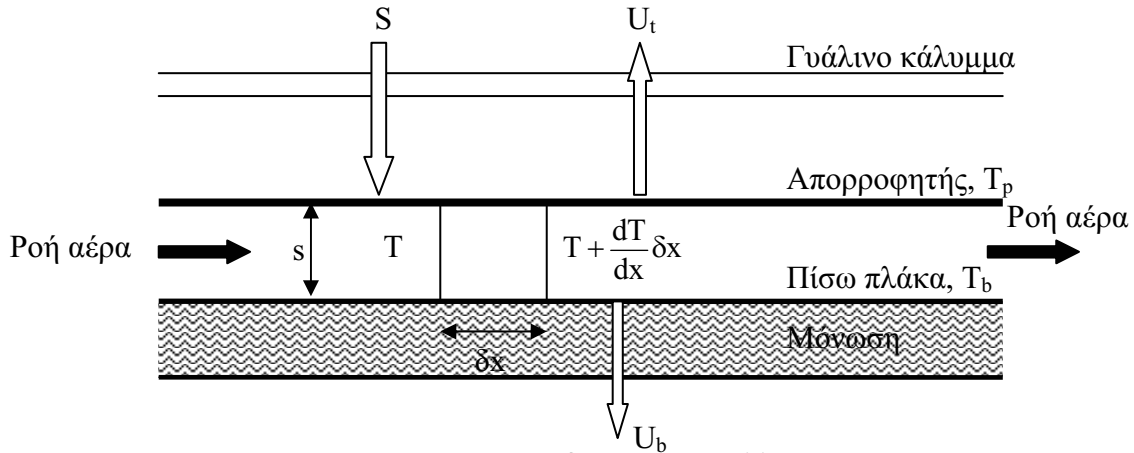
$$T_a(U_L + h) = S + U_L T_a + hT \quad (5)$$

όπου:

$$h = h_{c,p-a} + \frac{1}{\left(1/h_{c,b-a}\right) + \left(1/h_{r,p-b}\right)} \quad (6)$$

Αντικαθιστώντας την Εξ. (4) στην Εξ. (2) δίνει:

$$hT_p = \left(\frac{\dot{m}}{W}\right) c_p \frac{dT}{dx} + hT \quad (7)$$



Εικόνα 6: Σχηματικό διάγραμμα συλλέκτη αέρα

Τελικά, συνδυάζοντας τις Εξ. (5) και (7) δίνει:

$$\left(\frac{\dot{m}}{W}\right) c_p \frac{dT}{dx} = F' [S - U_L (T - T_a)] \quad (8)$$

όπου W = πλάτος του συλλέκτη και F' = συντελεστής απόδοσης του συλλέκτη για συλλέκτες αέρα που δίνεται από:

$$F' = \frac{1/U_L}{(1/U_L) + (1/h)} = \frac{h}{h + U_L} \quad (9)$$

Οι αρχικές συνθήκες της Εξ. (8) είναι $T=T_i$ σε $x=0$. Για αυτό, η συνολική λύση της Εξ. (8) είναι:

$$T = \left(\frac{S}{U_L} + T_a\right) + \frac{1}{U_L} [S - U_L (T_i - T_a)] \exp\left[-\frac{U_L F' x}{(\dot{m}/W) c_p}\right] \quad (10)$$

Αυτή η εξίσωση δίνει την κατανομή θερμοκρασίας του αέρα στον αγωγό. Η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του συλλέκτη δίδεται από την Εξ. (10) για $x=L$ και θεωρώντας ότι $A_c=WL$. Συνεπώς:

$$T_o = T_i + \frac{1}{U_L} [S - U_L (T_i - T_a)] \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m} c_p}\right)\right] \quad (11)$$

Η κερδισμένη ενέργεια από τον αέρα δίνεται από:

$$\frac{Q_u}{W} = \left(\frac{\dot{m}}{W}\right) c_p (T_o - T_i) = \frac{\dot{m} c_p}{A_c U_L} [S - U_L (T_i - T_a)] \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m} c_p}\right)\right] \quad (12)$$

Ο συντελεστής θερμικής απώλειας δίνεται από:

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p}{A_c U_L} \left(1 - \exp \left[- \frac{U_L F' A_c}{\dot{m}c_p} \right] \right) \quad (13)$$

Έτσι η Εξ. (12) δίνει:

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_i - T_a)] \quad (14)$$

Αυτή η εξίσωση είναι βασικά η ίδια με την εξίσωση που δίνει την ωφέλιμη ενέργεια που παίρνουν και οι συλλέκτες νερού.

4. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΑΕΡΑ

Υπάρχουν πολλοί συλλέκτες που έχουν δημιουργηθεί από πολλούς ερευνητές και για πάρα πολλές εφαρμογές. Οι πιο πολλοί είναι πειραματικές συσκευές. Η πλειονότητα των εφαρμογών αφορά θέρμανση χώρου και αποξήρανση καρπών. Στις κτηριακές εφαρμογές οι συλλέκτες αέρα κατασκευάζονται επί τόπου αντικαθιστώντας μέρος της κατασκευής όπως για παράδειγμα την οροφή. Εδώ θα παρουσιαστούν μόνο πρόσφατες μελέτες.

Οι Zhai et al. [5] επεξεργάστηκαν έναν συλλέκτη αέρα οροφής με μονή και διπλή διαδρομή, για ζέσταμα χώρου το χειμώνα και φυσικό εξαερισμό το καλοκαίρι. Απέδειξαν ότι όταν εργάζεται με διπλή κατεύθυνση η στιγμιαία απόδοση του συλλέκτη αυξανόταν κατά μέσον όρο 10%. Αυτό καταδεικνύει ότι ο διπλής κατεύθυνσης υπερέχει του συλλέκτη μονής διαδρομής.

Οι Forson et al. [6] παρουσίασαν μια πειραματική και θεωρητική μελέτη αεριαγωγού με μονή κατεύθυνση με διπλό αγωγό. Στη μελέτη αυτή κατασκευάστηκε ένα εργαλείο ικανό να προβλέπει την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, την ειδική θερμότητα, την μέση ροή αέρα, την μέση θερμότητα αέρα και την σχετική υγρασία στην έξοδο. Φαίνεται ότι η ροή αέρα είναι ο κύριος παράγοντας για τον προσδιορισμό της απόδοσης του συστήματος.

Οι Belusko et al. [7] παρουσίασαν μια μελέτη με συλλέκτη οροφής σε ένα ηλιακά θερμαινόμενο σύστημα με στόχο να ελαττώσει το ολικό κόστος του συστήματος. Αυτό επετεύχθηκε με αυλακωτή μεταλλική οροφή η οποία μετατράπηκε σε συλλέκτη αέρα με την προσθήκη πλαστικού καλύμματος. Με αυτό το σχεδιασμό εξοικονομήθηκε 28% της αρχικής συμβατικής κατανάλωσης ενέργειας μιας αντλίας θερμότητας που χρησιμοποιήθηκε για την θέρμανση του κτιρίου.

Όσον αφορά την αποξήρανση καρπών οι Chemkhi et al. [8] παρουσίασαν μια μελέτη για την θερμική συμπεριφορά των συλλεκτών αέρα σαν πηγή ενέργειας για αποξηραντές. Παρουσίασαν ένα απλό μοντέλο βασισμένο στην εκτίμηση της ειδικής θερμότητας και υπολογίζοντας την εξερχόμενη θερμοκρασία, την ενέργεια που χρειάστηκε και την θερμική απόδοση σε συνάρτηση της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας, προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα του ανέμου και της ροής του αέρα. Το σύστημα δίνει θερμοκρασίες της τάξης των 60°C για δυναμικό σύστημα. Η απόδοση για σύστημα με ελεύθερη ροή είναι 10-15% ενώ στην δυναμική ροή η απόδοση είναι 50-60%.

Ο Esen [9] παρουσίασε μια πειραματική ενεργειακή ανάλυση ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη αέρα με εμπόδια και χωρίς εμπόδια. Η ανάλυση δείχνει ότι ο συλλέκτης διπλής ροής με εμπόδια παρουσιάζεται να έχει καλύτερα αποτελέσματα από αυτόν με χωρίς εμπόδια.

Ο Koyuncu [10] μελέτησε την συμπεριφορά έξι διαφορετικών τύπων συλλεκτών αέρα:

1. Μονό πλαστικό κάλυμμα με σκληρό απορροφητή βαμμένο με μαύρο χρώμα, με πρόσθια είσοδο.
2. Μονό πλαστικό κάλυμμα, επίπεδο απορροφητή βαμμένο μαύρο με πρόσθια είσοδο.
3. Μονό πλαστικό κάλυμμα, με ζίκζακ απορροφητή και πρόσθια είσοδο.
4. Μονό πλαστικό κάλυμμα, με μαύρο επίπεδο απορροφητή και οπίσθιο πέρασμα.
5. Μονό πλαστικό κάλυμμα, με μαύρο ζίκζακ απορροφητή και οπίσθιο πέρασμα.
6. Διπλό πλαστικό κάλυμμα, με μαύρο επίπεδο απορροφητή και οπίσθιο πέρασμα.

Το πιο αποδοτικό σύστημα είναι το Νο 2. Η επίδραση του σχήματος του απορροφητή στην απόδοση του συλλέκτη είναι περιορισμένη.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το άρθρο παρουσιάζεται μια ανασκόπηση συλλεκτών αέρα. Τα συστήματα αέρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ζέσταμα νερού, ζέσταμα χώρου και για αποξήρανση καρπών. Υπάρχουν βασικά δύο τύποι συλλεκτών αέρα, μονής και διπλής ροής. Παρουσιάζεται επίσης η θερμική ανάλυση των συλλεκτών αέρα. Αυτή είναι όμοια με αυτήν των συνηθισμένων συλλεκτών με την χρήση νερού εκτός από την απόδοση των πτερυγίων και την αντίσταση των ενώσεων. Οι εφαρμογές που παρουσιάζονται αφορούν μόνο πρόσφατες δημοσιεύσεις για θέρμανση χώρου και αποξήρανση καρπών που είναι και οι κύριες εφαρμογές των συλλεκτών αέρα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Kalogirou, S., 2001. Solar Water Heating in Cyprus: Facts and Prospects, *Proceedings of Sharjah Solar Energy Conference Incorporating the Regional World Renewable Energy Congress and the 7th Arab Conference on Solar Energy on CD-ROM*, UAE, 2001.
2. Kreider J.F., *The Solar Heating Design Process*, McGraw-Hill Book Company, 1982.
3. Kreider J.F., Kreith F., *Solar Heating and Cooling*, McGraw-Hill Book Company, 1977.
4. Kalogirou, S., Solar Thermal Collectors and Applications, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 30, No. 3, pp. 231-295, 2004.
5. Zhai Z.Q., Dai Y.J., Wang R.Z., Comparison of heating and natural ventilation in a solar house induced by two roof solar collectors, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, pp. 741-757, 2005.
6. Forson F.K., Nazha M.A.A., Rajakaruna H., Experimental and simulation studies on a single pass double duct solar air heater, *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, pp. 1209-10227, 2003.
7. Belusko M., Saman W., Bruno F., Experimental study of a roof integrated solar collector in a solar heating system, *Proceedings of the World Renewable Energy Congress VII on CD ROM*, Cologne, Germany 2002.
8. Chemkhi S., Zagrouba F., Bellagi A., Drying of agricultural crops by solar energy, *Desalination*, Vol. 168, pp. 101-109, 2004.
9. Esesn H., Experimental energy and exergy analysis of a double-flow solar air heater having different obstacles on absorber plates, *Building and Environment*, Vol. 43, pp. 1046-1054, 2008.
10. Koyuncu T., Performance of various design of solar air heaters for crop drying applications, *Renewable Energy*, Vol. 31, pp. 1073-1088, 2006.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΜΕΓΑΛΟΥ ΚΥΒΙΣΜΟΥ

Ε. Καλούδης¹, Η. Παπανικολάου¹, Β. Μπελεσιώτης¹ και Θ. Πανίδης²

¹ Εργαστήριο Ηλιακών & άλλων Ενεργειακών Συστημάτων (ΕΗ-ΕΣ),
ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», 15310 Αγία Παρασκευή Αττικής

² Εργαστήριο Τεχνικής Θερμοδυναμικής, Τμήμα Μηχανολόγων και
Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 26500 Ρίο Πάτρα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται η σύγκριση δύο εναλλακτικών διατάξεων προσαγωγής νερού (διαχύτες) διαφορετικής γεωμετρίας, κατά τη διαδικασία φόρτισης κυλινδρικής δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας μεγάλου κυβισμού, με ζεστό νερό, με στόχο την αποτίμηση των ενεργειακών απωλειών στην κάθε περίπτωση. Αρχικά συγκρίνονται πειραματικά δεδομένα με αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση της διαδικασίας με ένα εμπορικό λογισμικό υπολογιστικής ρευστομηχανικής (ANSYS), με σκοπό την επαλήθευση του μοντέλου. Στη συνέχεια, οι δύο διαχύτες συγκρίνονται μόνο υπολογιστικά (ώστε να εξασφαλίζεται η ύπαρξη πανομοιότυπων συνθηκών λειτουργίας) για την εύρεση του αποδοτικότερου ενεργειακά διαχύτη.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην εργασία μελετάται η φόρτιση μιας κυλινδρικής δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας μεγάλου κυβισμού που αποτελεί τμήμα μιας μεγάλης κλίμακας θερμικής ηλιακής εγκατάστασης, η οποία περιλαμβάνει ένα πεδίο ηλιακών συλλεκτών το οποίο τροφοδοτεί με ζεστό νερό (μη σταθερής θερμοκρασίας) τη δεξαμενή. Ένα από τα ζητούμενα σε μια τέτοια εγκατάσταση είναι να βρεθεί η ‘κατάλληλη’ γεωμετρία του συστήματος προσαγωγής του νερού (διαχύτη) στη δεξαμενή. Με τον όρο ‘κατάλληλη’ εννοείται η γεωμετρία διαχύτη η οποία θα ελαχιστοποιεί της θερμικές απώλειες της δεξαμενής που οφείλονται στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η προσαγωγή του ζεστού νερού και στην ανάμιξή του με το αποθηκευμένο νερό χαμηλότερης θερμοκρασίας. Πρόκειται για ένα πρόβλημα στην αντιμετώπιση του οποίου πολύτιμη συνεισφορά μπορούν να αποτελέσουν οι αρχές της ρευστομηχανικής και μεταφοράς θερμότητας. Τα βασικά κριτήρια σχεδιασμού της προσαγωγής του νερού είναι [1]:

α) η ροή του νερού που εξέρχεται από το διαχύτη πρέπει να είναι οριζόντια, διότι οι ανοδικές και οι καθοδικές κινήσεις προκαλούν ανάμειξη

β) οι διατάξεις εισροής – εκροής πρέπει να είναι αναστρέψιμες, ώστε η δεξαμενή να είναι συμμετρική.

γ) το σύστημα εισροής πρέπει να διανέμει το νερό ομοιόμορφα καθ’ όλο το πλάτος της δεξαμενής, έτσι ώστε οι κινήσεις να είναι δισδιάστατες. Κάθε κίνηση στην τρίτη διάσταση θα προκαλέσει ανάμειξη.

Επιπλέον, ποσοτικά κριτήρια σχεδιασμού ορίζονται με βάση τους αδιάστατους αριθμούς Reynolds (Re) και Froude (Fr), οι οποίοι ορίζονται με βάση ένα χαρακτηριστικό μήκος κατά την εκροή από τον διαχύτη και δίνονται από τις εξής σχέσεις:

$$Re_i = u_i L / \nu \quad (1) \quad Fr_i = u_i / (gL)^{1/2} \quad (2)$$

όπου u_i (m/s) η ταχύτητα του νερού στην είσοδο της δεξαμενής, L (m) το χαρακτηριστικό μήκος, g (m/s²) η επιτάχυνση της βαρύτητας και ν (m²/s) το κινηματικό ιξώδες. Για έναν καλό σχεδιασμό των διάχυτων, για τις τιμές αυτών των αριθμών πρέπει να ισχύει $Fr_i < 2$ [2] και $Re_i < 850$ [3]

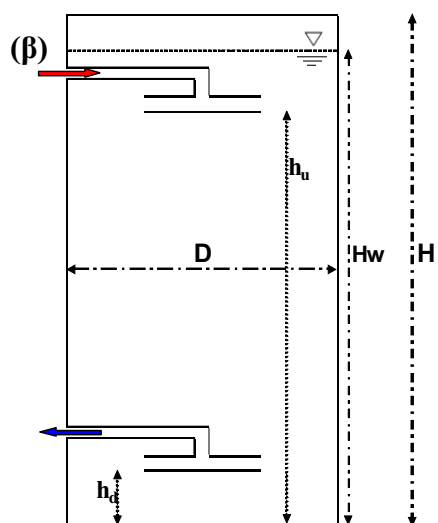
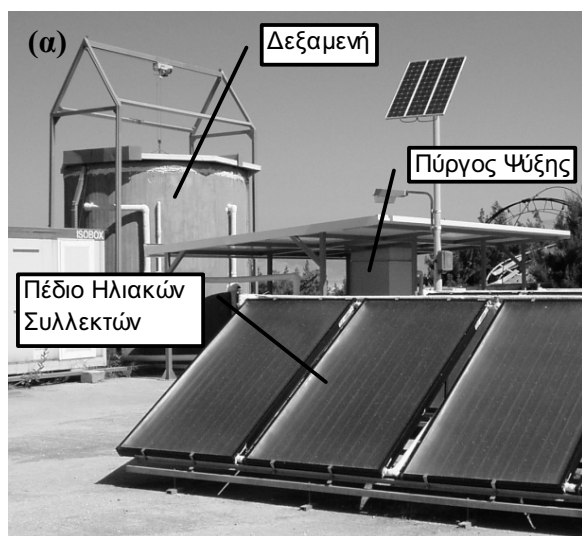
Μια πρώτη υπολογιστική προσέγγιση και αξιολόγηση των διαχυτών μπορεί να γίνει με το μονοδιάστατο μοντέλο Multinode [4] καθώς από αυτό μπορεί να ληφθεί μια καλή πρώτη εκτίμηση της κατακόρυφης κατανομής θερμοκρασίας (διαστρωμάτωσης) σε κάθε χρονική στιγμή. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό η δεξαμενή χωρίζεται σε N ζώνες και για κάθε μια διαμορφώνεται το ισοζύγιο της ενέργειας. Έτσι προκύπτουν N διαφορικές εξισώσεις που έχουν λύση τη θερμοκρασία κάθε ζώνης σαν συνάρτηση του χρόνου. Τα αποτελέσματα του Multinode μοντέλου αποτέλεσαν 'οδηγό' για την προσομοίωση της διαδικασίας της φόρτισης της δεξαμενής υπολογιστικά (μέσω του Ansys), το οποίο ανέδειξε τα τρισδιάστατα πλέον χαρακτηριστικά των πεδίων ροής και θερμοκρασίας καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας με έμφαση στη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση που αναπτύσσεται για κάθε περίπτωση (μορφή διαχύτη, θερμοκρασία φόρτισης).

Για την εύρεση του αποδοτικότερου ενεργειακά διαχύτη, γίνεται επιπλέον θεώρηση δύο αδιάστατων αριθμών (MIX, ξ^*), οι οποίοι χαρακτηρίζουν το βαθμό ανάμειξης της δεξαμενής. Η ανάμειξη σε τέτοιου είδους συστήματα δεν είναι επιθυμητή καθώς προκαλεί ενεργειακές απώλειες και αύξηση της εντροπίας. Ο αριθμός MIX [5] βασίζεται στην αποθηκευμένη καθ' ύψος ενέργεια, ενώ ο αριθμός ξ^* (αδιάστατη ειδική εξέργεια, βλ. ορισμό παρακάτω) [6] προκύπτει από εξεργειακή ανάλυση. Και οι δυο αριθμοί χρησιμοποιούν σαν μέτρο σύγκρισης τις δύο ιδανικές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί μια δεξαμενή, την πλήρως διαστρωματωμένη και την πλήρως αναμειγμένη (για διαστρωματωμένη δεξαμενή MIX, $\xi^* = 0$ και για πλήρη ανάμειξη MIX, $\xi^* = 1$). Οι ιδανικές αυτές καταστάσεις προσεγγίζονται αντίστοιχα από τα μοντέλα Plug flow [4], το οποίο θεωρεί ότι η δεξαμενή αποτελείται από ισόθερμες ζώνες νερού μεταξύ των οποίων δεν υπάρχει καμιά ανάμειξη, καθώς και το Fully mixed, που υποθέτει ότι ανα πάσα στιγμή η δεξαμενή είναι πλήρως αναμειγμένη [4].

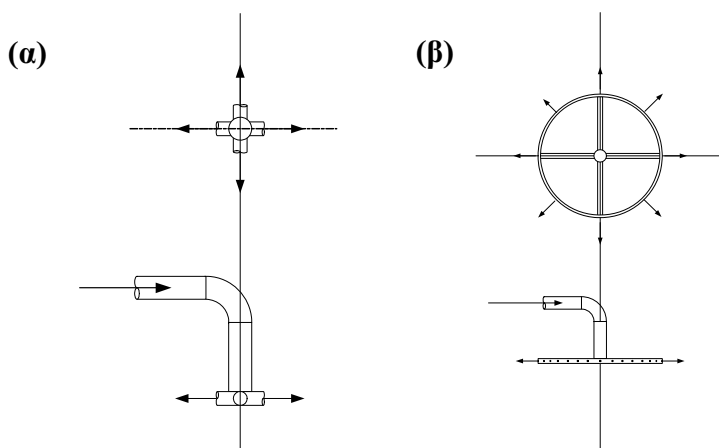
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η πειραματική διάταξη (η οποία είναι εγκατεστημένη στους χώρους δοκιμών του Εργαστηρίου Ηλιακών και άλλων Ενεργειακών Συστημάτων του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. 'Δημόκριτος') αποτελείται από ένα πεδίο από 48 ηλιακούς συλλέκτες, το οποίο κατά τη διάρκεια μιας ημέρας τροφοδοτεί με ζεστό νερό μη σταθερής θερμοκρασίας μια κυλινδρική δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας (Σχήμα 1α). Η καταγραφή της κατανομής της θερμοκρασίας του νερού μέσα στη δεξαμενή γίνεται από ένα πλέγμα θερμοστοιχείων που έχει τοποθετηθεί στο εσωτερικό της. Η δεξαμενή είναι κατασκευασμένη από σκυρόδεμα ειδικών προδιαγραφών και φέρει εσωτερική υγρομόνωση και θερμομόνωση, έχει όγκο 32 m³, εσωτερική ακτίνα 1.60 m και συνολικό ύψος 4.20 m. Η εισροή του ζεστού νερού μέσα στη δεξαμενή γίνεται μέσω ενός διαχύτη ο οποίος είναι τοποθετημένος σε ύψος h_u (1β) και αντίστοιχα η εκροή του κρύου νερού από τη δεξαμενή γίνεται με ένα όμοιο διαχύτη τοποθετημένο χαμηλότερα σε ύψος h_d .

Για το συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 2 διαφορετικής γεωμετρίας διαχύτες (Σχήμα 2), μια διάταξη 4 σωλήνων τοποθετημένων ανά 90°, μήκους 0,49 m (σταυρός) με ακτίνα σωλήνα 0.0296 m και μια κυκλικής γεωμετρίας, αποτελούμενη από δύο παράλληλους δίσκους με ακτίνα 0.40 m και διάκενο 0.0292 m (ακτινικός διαχύτης). Το ύψος στο οποίο ήταν τοποθετημένος ο κάθε διαχύτης μέσα στη δεξαμενή δεν ήταν το ίδιο. Συγκριμένα, ο σταυρός τοποθετήθηκε σε ύψος $h_u = 2.85$ m, $h_d = 0.2$ m και ο ακτινικός διαχύτης σε ύψος $h_u = 3.5$ m, $h_d = 0.8$ m. Τέλος το ύψος της στάθμης του νερού (H_w) στην περίπτωση του σταυρού ήταν 4.0 m και για τον ακτινικό διαχύτη 3.85 m.



Σχήμα 1. Φωτογραφία της πειραματικής εγκατάστασης (1α) και σχηματικό διάγραμμα της δεξαμενής (1β)

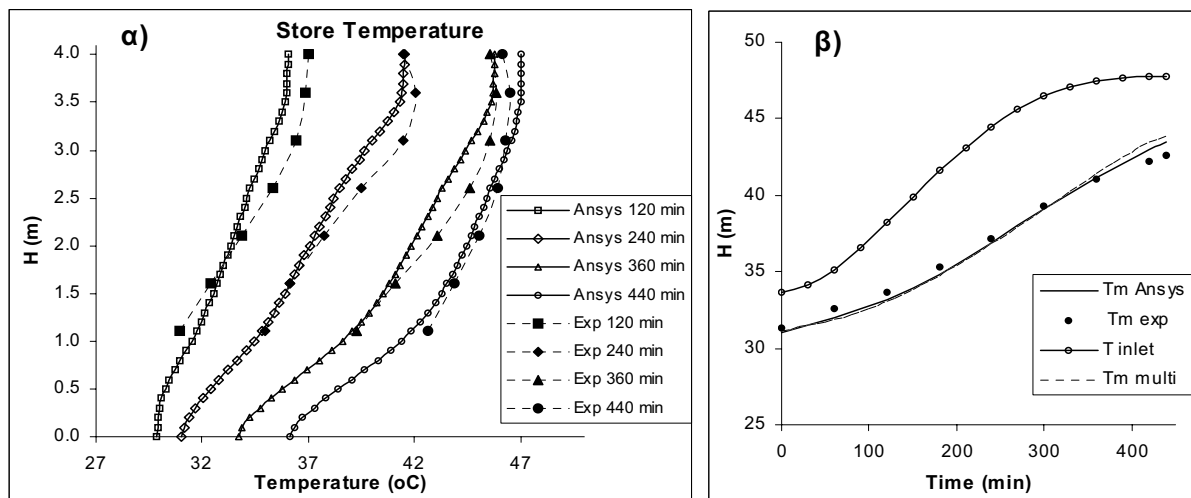


Σχήμα 2. Σχηματική απεικόνιση του Σταυρού (α) και του Ακτινικού διαχύτη (β)

3. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

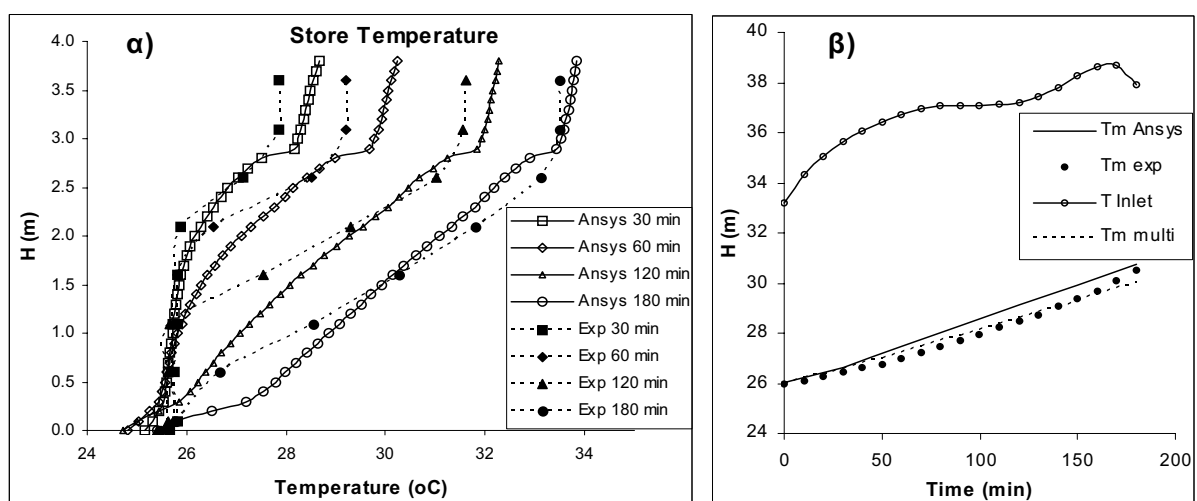
Για κάθε έναν από τους δύο διαχύτες, έχει επιλεγθεί από μια τυπική ημέρα φόρτισης της δεξαμενής, ώστε να συγκριθούν τα πειραματικά δεδομένα με τα αποτελέσματα που έδωσαν οι προσομοιώσεις με το λογισμικό υπολογιστικής ρευστομηχανικής ANSYS. Σκοπός είναι η επαλήθευση του υπολογιστικού μοντέλου με τις πειραματικές μετρήσεις, ώστε να είναι εφικτή η περαιτέρω αξιόπιστη σύγκριση των δύο διαχυτών μόνο υπολογιστικά. Πιο αναλυτικά, στην περίπτωση του σταυρού το μοντέλο που διαμορφώνεται είναι τρισδιάστατο, με θεώρηση του ενός τετάρτου του όγκου της δεξαμενής (γωνία 90°), για το οποίο επιλύονται οι εξισώσεις ροής, μεταφοράς θερμότητας και τύρβης (Shear Stress Model [7]) (αριθμός πεπερασμένων όγκων 107000) [8]. Στην περίπτωση του ακτινικού διαχύτη διαμορφώνεται ένα αξονοσυμμετρικό μοντέλο (που εδώ επιλύεται ως τρισδιάστατο για γωνία 10°) και η επίλυση γίνε-

ται με τις ίδιες υπολογιστικές παραμέτρους και μεγέθη (αριθμός πεπερασμένων όγκων 36000). Η σύγκριση μεταξύ πειραματικών μετρήσεων και υπολογιστικού μοντέλου γίνεται με βάση την θερμοκρασιακή κατανομή της δεξαμενής και την μέση θερμοκρασία της, κατά τη διάρκεια της φόρτισης.



Σχήμα 3. Σύγκριση πειραματικών υπολογιστικών αποτελεσμάτων για τον σταυρό: (α) Κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας στη δεξαμενή και (β) χρονική μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας δεξαμενής

Στο Σχήμα 3. παρουσιάζονται η θερμοκρασιακές κατανομές τις δεξαμενής για διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της φόρτισης με χρήση του σταυρού. Παρατηρείται ικανοποιητική συμφωνία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα πειραματικά δεδομένα. Παρόμοια συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν και από την σύγκριση των αποτελεσμάτων για τον ακτινικό διαχύτη (Σχήμα 4.), όπου υπάρχει μια ελαφρώς μεγαλύτερη απόκλιση στις κατανομές θερμοκρασίας εντός της δεξαμενής, αλλά η ταύτιση παραμένει ικανοποιητική, γεγονός που καθιστά εφικτή την περαιτέρω σύγκριση των δυο διάχυτων με το συγκεκριμένο υπολογιστικό μοντέλο.



Σχήμα 4. Σύγκριση πειραματικών υπολογιστικών αποτελεσμάτων για τον διαχύτη: α) Κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας στη δεξαμενή και β) χρονική μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας δεξαμενής

4. ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΑΡΙΘΜΟΙ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ ΣΤΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια μαθηματικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση των διαχυτών. Για τον υπολογισμό του αριθμού MIX ορίζεται η κατακόρυφη ροπή της ενέργειας στην δεξαμενή σαν $ME = \int^H y \, dE$ (3) για δεξαμενή ύψους H. Διαιρώντας τη δεξαμενή σε ένα αριθμό ζωνών η σχέση που προκύπτει είναι η:

$$M_E = \sum y_i E_i \quad (4) \quad \text{όπου} \quad E_i = \rho_i c_{pi} V_i T_i \quad (5)$$

το y_i είναι η απόσταση από τον πυθμένα της δεξαμενής ως το κέντρο της αντίστοιχης ζώνης, E_i η ενέργεια κάθε ζώνης, ρ_i είναι η πυκνότητα και c_{pi} η ειδική θερμοχωρητικότητα. Αφού υπολογιστούν οι θερμοκρασιακές κατανομές για δεξαμενές που είναι πλήρως διαστρωματωμένες (μοντέλο Plug Flow) και πλήρως αναμειγμένες (Fully Mixed) και υπολογιστούν τα αντίστοιχα M_{str} και M_{mix} τότε είναι δυνατό να προσδιοριστεί ο αριθμός MIX, που δίνεται από τη σχέση:

$$MIX = (M_{str} - M_{actual}) / (M_{str} - M_{mix}) \quad (6)$$

Άλλη μια μέθοδος χαρακτηρισμού του βαθμού ανάμειξης που αναφέρθηκε στην εισαγωγή είναι της εξεργειακής ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, ορίζεται η στιγμιαία εξέργεια από τη σχέση [9]:

$$\Xi = \int_V \xi \, \rho \, dV \quad (7)$$

όπου ξ είναι η ειδική εξέργεια. Βασίζόμενοι στα εξεργειακά επίπεδα της δεξαμενής για τις προαναφερθείσες ιδανικές καταστάσεις της, (πλήρης διαστρωμάτωση και πλήρως αναμειγμένη) μπορεί να ορισθεί η αδιάστατη εξέργεια ως

$$\xi^* = 1 - (\Xi - \Xi_{mix}) / (\Xi_{str} - \Xi_{mix}) \quad (8)$$

Θεωρώντας την πυκνότητα και την ειδική θερμοχωρητικότητα σταθερή, η ολική στιγμιαία διαφορά εξέργειας μεταξύ της πραγματικής κατάστασης της δεξαμενής και της πλήρους αναμειγμένης υπολογίζεται από τη σχέση [9]:

$$\Xi - \Xi_{mix} = c_p [(T_m - T_{mix}) - T_o \ln(T_e / T_{mix})] \rho V \quad (9)$$

$$\text{όπου} \quad T_m = (1/V) \sum T_i V_i \quad (10) \quad \text{και} \quad T_e = \exp[(1/V) \sum V_i \ln T_i] \quad (11)$$

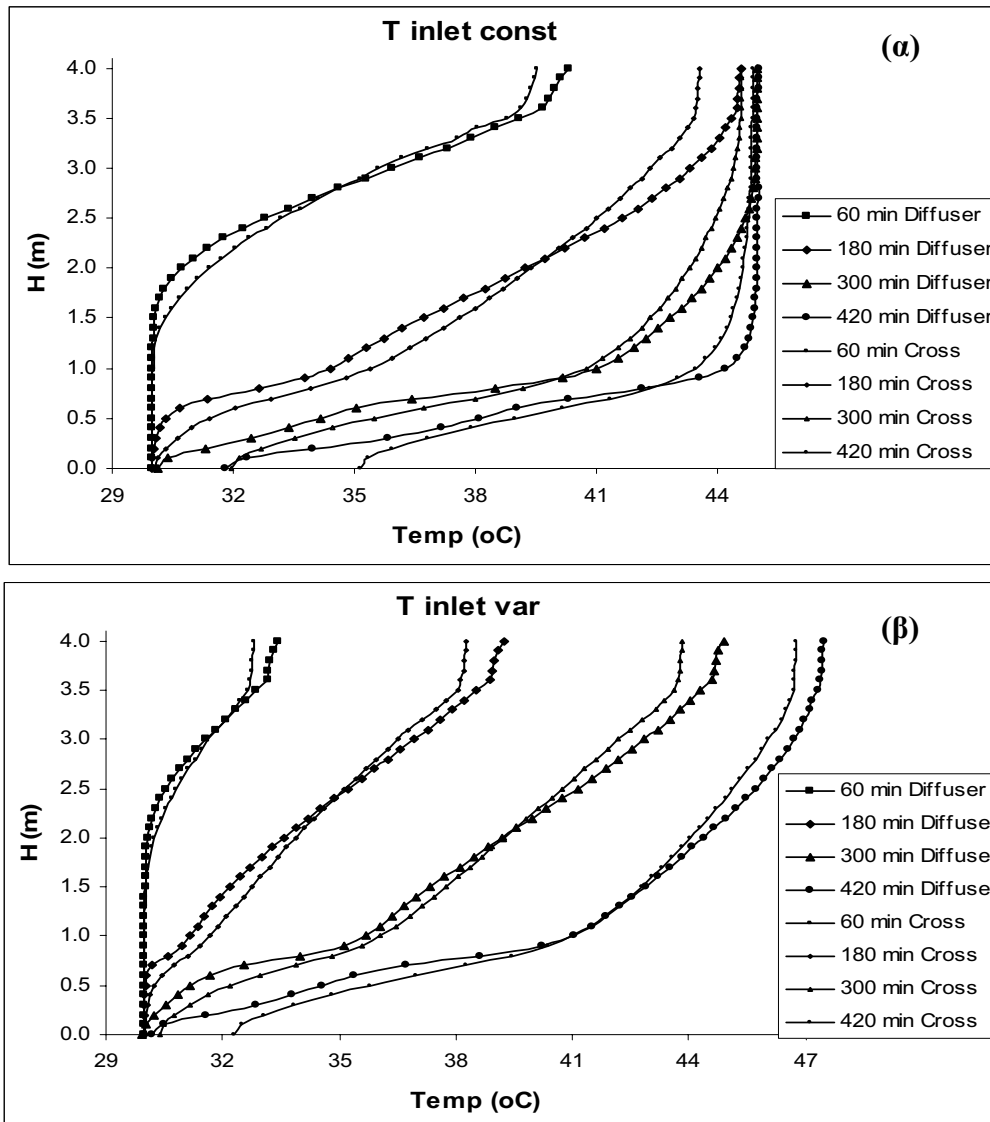
T_m είναι η μέση θερμοκρασία της δεξαμενής και η T_e αντιστοιχεί στην θερμοκρασία μιας πλήρως αναμειγμένης δεξαμενής που θα είχε την ίδια εξέργεια με την διαστρωματωμένη. Με παρόμοιο τρόπο υπολογίζεται και η διαφορά εξέργειας για πλήρως διαστρωματωμένη και πλήρως αναμειγμένη δεξαμενή

$$T_{m(str)} = (1/V) \sum T_{str,i} V_i \quad (12) \quad \text{και} \quad T_{e(str)} = \exp[(1/V) \sum V_i \ln T_{str,i}] \quad (13)$$

όπου το $T_{str,i}$ υπολογίζεται από το μοντέλο Plug Flow.

5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ 2 ΔΙΑΧΥΤΩΝ ΜΕΣΩ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Για να επιτευχθεί η σύγκριση των δύο διαχυτών, χωρίς να επηρεάζονται τα αποτελέσματα από αποκλίσεις σε γεωμετρικές παραμέτρους καθώς αυτές ήταν δύσκολο να παραμείνουν ίδιες στην πραγματική δεξαμενή για κατασκευαστικούς λόγους, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις στις οποίες οι θέσεις των δύο διαχυτών ήταν ίδιες ($h_u=3.5$ m, $h_d=0.8$ m) όπως και η παροχή του νερού (1.80 kg/sec) στη είσοδο της δεξαμενής. Επιλέχθηκαν 2 ξεχωριστές περιπτώσεις, με τη θερμοκρασία του νερού στην είσοδο να είναι : α) σταθερή ($T_{inlet} = \text{const.}$) και β) χρονικά μεταβαλλόμενη ($T_{inlet} = T(t)$), ακολουθώντας μια τυπική καμπύλη μιας ημέρας με έντονη ηλιοφάνεια. Η προσομοίωση έγινε για χρόνο 440 min. (Εικόνες 5 και 6)

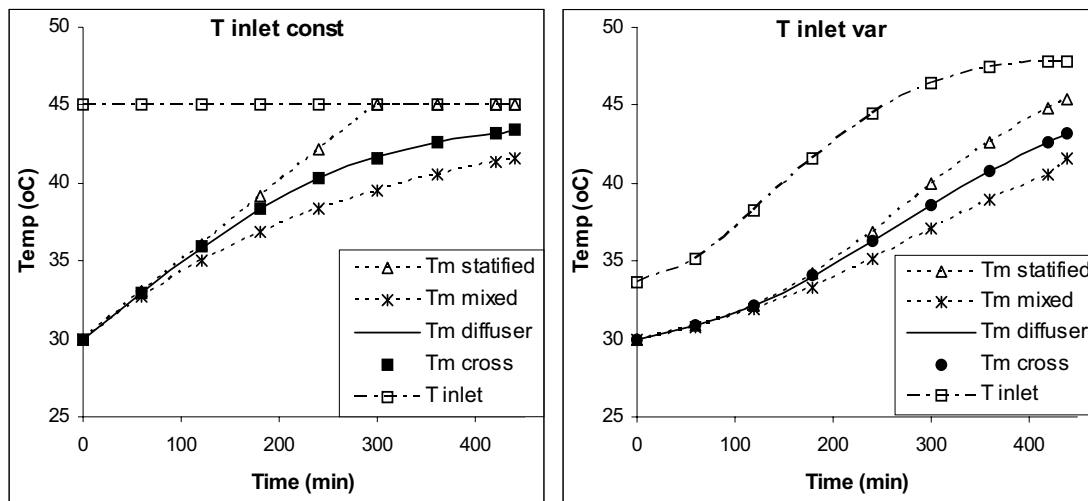


Σχήμα 6. Σύγκριση κατακόρυφων κατανομών θερμοκρασίας στη δεξαμενή για σταθερή (α) και μεταβλητή (β) θερμοκρασία νερού στην είσοδο.

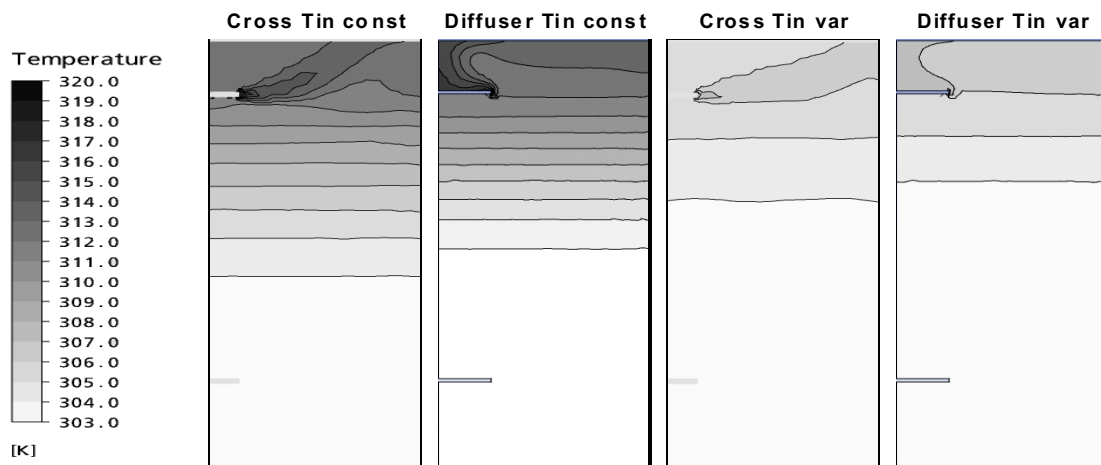
Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των μέσων θερμοκρασιών της δεξαμενής με τις αντίστοιχες τιμές για πλήρως διαστρωματωμένη (ΠΔ) (μοντέλο Plug flow) και πλήρως αναμεμιγμένη (ΠΑ) δεξαμενή. (Σχήμα 7). Θεωρητικά η μέση θερμοκρασία της δεξαμενής T_m θα είναι πάντα ανάμεσα στις ακραίες μέσες τιμές για ΠΔ και ΠΑ δεξαμενές ($T_{m,max}$ και $T_{m,min}$ αντίστοιχα), γεγονός το οποίο επαληθεύεται και στις δύο περιπτώσεις.

Από τα πεδία ροής (Σχήμα 9.) παρατηρείται ότι στην περίπτωση του σταυρού το νερό από της είσοδο εισχωρεί σε μεγαλύτερο βαθμό μέσα στη δεξαμενή, το οποίο προκύπτει και από το γεγονός ότι παρόλο που η παροχή μάζας είναι η ίδια και για τους δυο διάχυτες, η ταχύτητα εκροής του νερού στην δεξαμενή είναι μεγαλύτερη για το σταυρό ($U_{in,cross} = 0.164 \text{ m/s}$) σε σχέση με αυτή του ακτινικού διαχύτη ($U_{in,diffuser} = 0.025 \text{ m/s}$). Συνέπεια αυτού του γεγονότος σε συνδυασμό με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δυο διαχυτών, είναι υψηλότεροι αριθμοί Reynolds και Froude εισόδου για τον σταυρό ($Re_i = 12149$, $Fr_i = 2.41$) σε σχέση με τον ακτινικό διαχύτη ($Re_i = 899$, $Fr_i = 0.52$). Υψηλοί αριθμοί Re_i (όπως στη συγκεκριμένη περί-

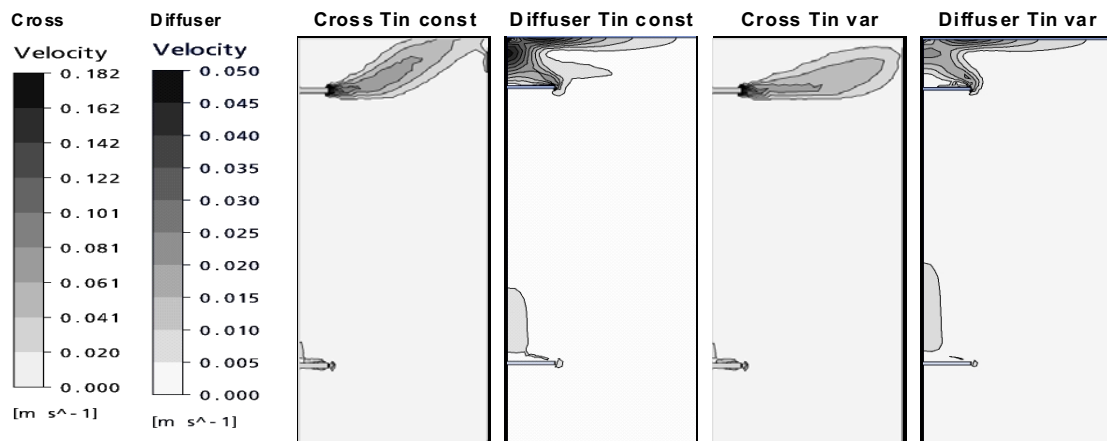
πτωση του σταυρού) συνεπάγονται τυρβώδη ροή στην έξοδο του διαχύτη, άρα και μεγαλύτερη ανάμειξη, σε συνδυασμό και με τα τρισδιάστατα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής που αναπτύσσονται κατά την εκροή από τον σταυρό.



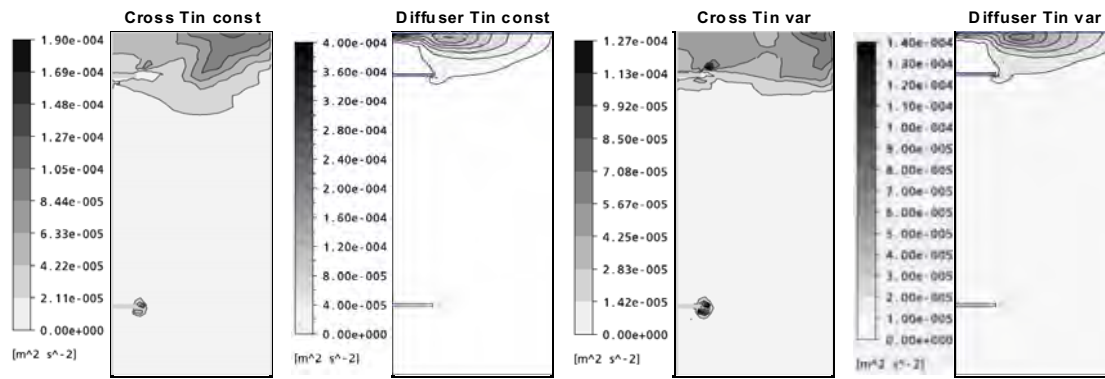
Σχήμα 7. Σύγκριση της μέσης θερμοκρασίας της δεξαμενής για τα διάφορα υπολογιστικά μοντέλα (Ansys, Plug flow, Fully mixed).



Σχήμα 8. Πεδίο θερμοκρασίας σε κατακόρυφο επίπεδο για τους δύο τύπους διαχυτών κατά τη χρονική στιγμή των 60 min



Σχήμα 9. Πεδίο ροής σε κατακόρυφο επίπεδο κατά τη χρονική στιγμή των 60 min

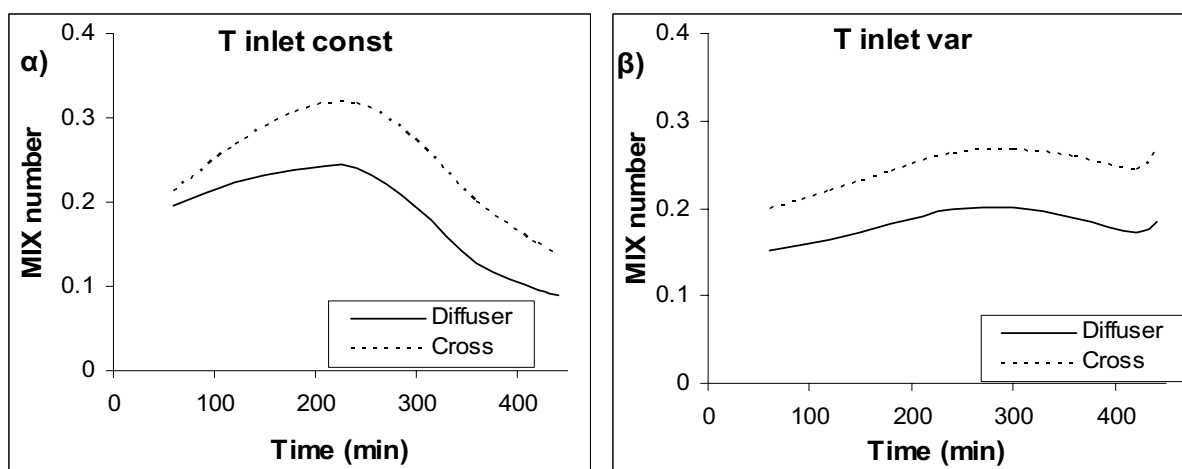


Σχήμα 10. Πεδίο τυρβώδους κινητικής ενέργειας σε κατακόρυφο επίπεδο κατά τη χρονική στιγμή των 60 min

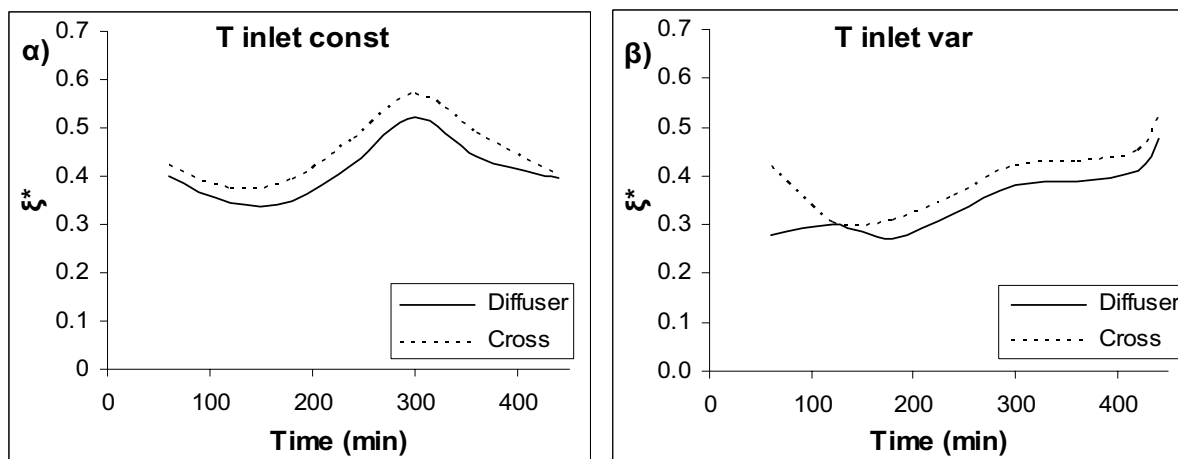
Τέλος γίνεται σύγκριση με βάση τους αδιάστατους αριθμούς MIX και ξ^* (Σχήματα 11, 12). Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 4, οι ακραίες τιμές των αριθμών MIX και ξ^* είναι 0 και 1, όπου στο 1 η δεξαμενή θεωρείται ότι έχει υποστεί πλήρη ανάμειξη και στην τιμή 0 η δεξαμενή είναι πλήρως διαστρωματωμένη. Με βάση τους αριθμούς Reynolds και Froude αλλά και από τη σύγκριση των κατανομών της θερμοκρασίας (Σχήματα 5, 6), και όπως θα αναμενόταν, ο ακτινικός διαχύτης να παρουσιάζει λιγότερη ανάμειξη σε σχέση με το σταυρό. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από τις τιμές του MIX και του ξ^* , οι οποίες είναι για όλες τις χρονικές στιγμές μεγαλύτερες στο σταυρό από ότι στον ακτινικό διαχύτη.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ένα από τα ζητούμενα σε μια ηλιακή εγκατάσταση είναι η βελτιστοποίηση της απόδοσης των επιμέρους διαδικασιών στην επίτευξη της οποίας σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών. Στα πλαίσια αυτά, μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία δύο διαφορετικής γεωμετρίας διαχύτες (σταυρός και ακτινικός διαχύτης) με σκοπό την βελτιστοποίηση της διαδικασίας της φόρτισης μιας κυλινδρικής δεξαμενής από ένα ηλιακό πεδίο. Με τη βοήθεια ενός υπολογιστικού μοντέλου και χρησιμοποιώντας τους αδιάστατους αριθμούς MIX και ξ^* , επιβεβαιώθηκε ότι στη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη ο ακτινικός διαχύτης είναι πιο αποδοτικός, καθώς προκαλεί λιγότερη ανάμειξη θερμού/ψυχρού νερού στη δεξαμενή και κατά συνέπεια λιγότερες ενεργειακές απώλειες.



Σχήμα 11. Σύγκριση ως προς τον αδιάστατο αριθμό MIX σε συνάρτηση με το χρόνο, για θερμοκρασία εισόδου : α) σταθερή, β) χρονικά μεταβαλλόμενη



Σχήμα 12. Σύγκριση ως προς την αδιάστατη εξέργεια ξ^* σε συνάρτηση με το χρόνο, για θερμοκρασία εισόδου : α) σταθερή, β) χρονικά μεταβαλλόμενη

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. W.D. Baines W.W. Martin, L.A. Sinclair, 'On the design of stratified thermal storage tanks', *ASHRAE Transactions*, 88, Pt 2, 426-439, 1982
2. J. Yoo, M.W. Wildin, C.R. Truman, 'Initial formation of the thermocline in stratified thermal storage tanks', *ASHRAE Transactions*, 92, Pt 2A, 280-292, 1986
3. M.W. Wildin, 'Diffuser design for naturally stratified thermal storage', *ASHRAE Transactions*, 96, Pt 1, 1095-1102, 1990
4. J. Duffie, W. Beckman, 'Solar Engineering of thermal processes', Wiley, 1991
5. J. Davidson, D. Adams, J. Miller, 'A coefficient to characterize mixing in solar water storage tanks', *Journal of Solar Energy Engineering* 116, 94-99, 1994
6. R. Consul, I. Rodriguez, C.D. Perez-Segarra, M. Soria, 'Virtual prototyping of storage tanks by means of three-dimensional CFD and heat transfer numerical simulations', *Solar Energy* 77, 174-191, 2004
7. F.R. Menter, 'Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications', *AIAA Journal*, 32, 1598-1605, 1994
8. Release 11.0 Documentation for Ansys, Ansys Inc
9. I. Dincer, M. Rosen, 'Thermal energy storage', John Wiley, 2001

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΡΟΗΣ, ΔΙΠΛΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ.

Ι. Γ. Καούρης, Ν. Συρίμπεης, Κ. Π. Γκέρτζος,

Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 265 00 Πάτρα.

Τηλέφωνα : 2610 969-410, 2610 997-250, , 2610 969-412

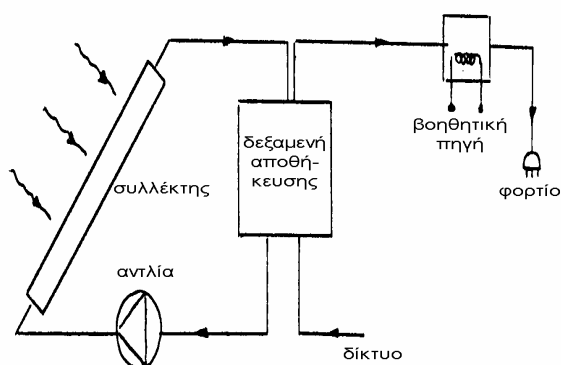
E_mail : caouris@mech.mech.upatras.gr, nisy@mech.upatras.gr, gertzos@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

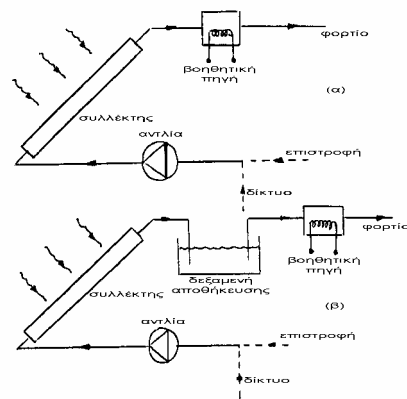
Στη παρούσα εργασία αναπτύσσεται η κατασκευή ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη «διπλής διαδρομής» ή «διπλού στρώματος». Ο συλλέκτης αποτελείται από δυο επάλληλα επίπεδα στρώματα ροής του νερού. Τα στρώματα αποτελούνται από πλαστικές πλάκες διπλού τοιχώματος με εσωτερικές αυλακώσεις ορθογωνικής διατομής. Η άνω πλάκα είναι διαφανής και παραμένει διαφανής και όταν ρέει νερό στο εσωτερικό της. Η κάτω πλάκα είναι μαύρη και αποτελεί τον απορροφητή του συλλέκτη. Το νερό εισερχόμενο στην άνω πλάκα προθερμαίνεται και εξερχόμενο οδηγείται στην είσοδο της κάτω μαύρης πλάκας. Τέλος, πάνω από τις δυο πλάκες τοποθετείται γυάλινη επικάλυψη για περιορισμό των θερμικών απωλειών. Η κατασκευή αναλύεται και παρατίθενται αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων από τα οποία προσδιορίζεται η απόδοση του συλλέκτη. Σε σύγκριση με κοινούς συλλέκτες φαίνεται ότι ο συγκεκριμένος τύπος συλλέκτη υπερέχει σαφώς, όταν η θερμοκρασία εισόδου του νερού είναι χαμηλή, γεγονός που κατευθύνει τη χρήση του σε συστήματα «μονής διάβασης» ή «ανοικτής ροής».

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ηλιακά θερμικά συστήματα «μονής διάβασης» (singlepass) ή «ανοικτής ροής» (once through), έχουν στο παρελθόν αρκετά αναλυθεί και έχει τεκμηριωθεί η υπεροχή τους έναντι των συστημάτων «πολλαπλής διάβασης» (multipass) ή «κλειστής ροής» [1], [2]. Ως σύστημα «ανοικτής ροής» νοείται ένα σύστημα στο οποίο το νερό του δικτύου εισέρχεται στον ηλιακό συλλέκτη όπου θερμαίνεται και εξερχόμενο πληροί τη δεξαμενή αποθήκευσης, υπό ατμοσφαιρική πίεση. Στην Εικόνα 1 φαίνεται ένα τυπικό ηλιακό σύστημα «πολλαπλής διάβασης», ενώ στην Εικόνα 2 παρουσιάζονται δύο τυπικές διατάξεις συστημάτων «μονής διάβασης»,

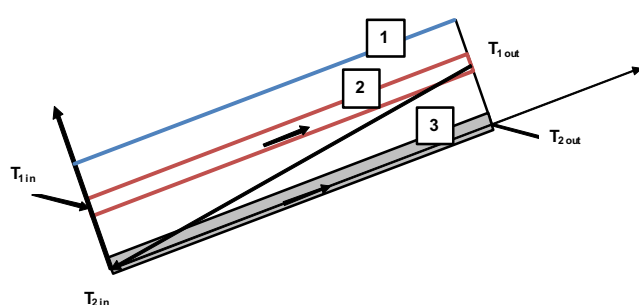


Εικόνα 1. Τυπικό ηλιακό σύστημα πολλαπλής διάβασης

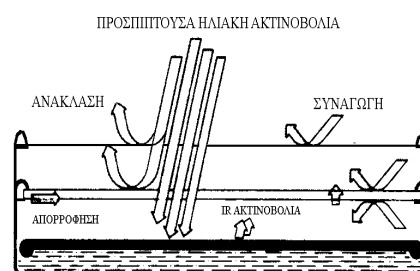


Εικόνα 2. Τυπικά ηλιακά συστήματα μονής διάβασης

χωρίς δεξαμενή αποθήκευσης (α) και με δεξαμενή αποθήκευσης (β). Το μεγάλο μειονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι η συντελούμενη φραγή των σωληνώσεων του συλλέκτη από επικαθήσεις αλάτων, η οποία είναι ανάλογη με τη σκληρότητα του νερού. Το υδάτινο όμως πρόβλημα του πλανήτη επαναφέρει τη χρήση δεξαμενών συλλογής βρόχινου νερού (στέρνες), δηλαδή τη χρήση νερού απαλλαγμένου από άλατα. Σε πολλές δε νησιωτικές περιοχές της χώρας μας (Κυκλάδες, άνυδρα νησιά ανατολικού Αιγαίου, ορεινές περιοχές νησιών Ιονίου), αλλά και σε άλλες χώρες, η ύπαρξη και χρήση φραγμάτων και στερνών συνεχίζει να αποτελεί μια από τις βασικές πηγές υδροδότησης. Η χρήση βρόχινου νερού δεν περικλείει κίνδυνο φραγής των σωληνώσεων του συλλέκτη και έτσι καθίσταται δελεαστική η χρήση συστημάτων «μονής διάβασης».



Εικόνα 3. Σχηματική παράσταση συλλέκτη 2 στρωμάτων, 1→γυάλινο κάλυμμα, 2→στρώμα προθέρμανσης, 3→στρώμα κύριας θέρμανσης



Εικόνα 4. Θερμική απολαβή σε συλλέκτη 2 στρωμάτων.

Οι ηλιακοί συλλέκτες υγρού πολλαπλών στρωμάτων έχουν αρκετά μελετηθεί στο παρελθόν [3], ενώ έχει φανεί ότι για πρακτικές εφαρμογές οι συλλέκτες 2 στρωμάτων με ενδιάμεσο διάκενο αέρα και γυάλινη επικάλυψη αποτελούν τη βέλτιστη λύση [4], [5]. Στην Εικόνα 3 παρίσταται σχηματικά ένας επίπεδος συλλέκτης 2 στρωμάτων ροής υγρού. Το υγρό εισέρχεται στο κάτω μέρος του διαφανούς στρώματος προθέρμανσης (2) και εξέρχεται από το πάνω μέρος, αντιδιαμετρικά. Εξερχόμενο, οδηγείται με σωλήνα μικρής διατομής στο κάτω μέρος του στρώματος κύριας θέρμανσης και εξέρχεται από το πάνω μέρος, αντιδιαμετρικά. Το στρώμα προθέρμανσης κατασκευάζεται από διαφανή (στο ηλιακό φάσμα) υλικά, όπως πλαστικά υλικά ή γυαλί. Επειδή οι δείκτες διάθλασης των υλικών αυτών και του νερού (ή άλλων διαφανών θερμοανταλλακτικών υγρών) είναι περίπου ίσοι, οι οπτικές απώλειες από ανάκλαση είναι ισοδύναμες με τις απώλειες ενός δεύτερου καλύμματος. Το στρώμα κύριας θέρμανσης αποτελεί ουσιαστικά τον απορροφητή του συλλέκτη και κατασκευάζεται από αδιαφανή απορροφητικά (μαύρα) υλικά. Οι θερμικές απώλειες του στρώματος κύριας θέρμανσης προθερμαίνουν το υγρό στο στρώμα προθέρμανσης. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται συνοπτικά οι μηχανισμοί θερμικής απολαβής σε συλλέκτη 2 στρωμάτων.

Στο παρελθόν [4], [5], έχει μελετηθεί (πειραματικά και θεωρητικά) ένας επίπεδος συλλέκτης 2 στρωμάτων, με θερμοανταλλακτικό μέσο διαφανές υγρό (ATF silicon oil), ανθεκτικό μέχρι 200 °C. Τα 2 στρώματα είχαν κατασκευασθεί από γυάλινες πλάκες πάχους 6 mm, σε απόσταση 5 mm μεταξύ τους. Η εσωτερική επιφάνεια της άνω πλάκας του δεύτερου στρώματος είχε βαφεί μαύρη και αποτελούσε τον απορροφητή του συλλέκτη.

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην εφαρμογή σύγχρονων κατασκευαστικών λύσεων με χρήση πλαστικών υλικών και νερού ως φορέα θερμότητας.

2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Για τη δοκιμή και πιστοποίηση του συλλέκτη κατασκευάστηκε πειραματικό μοντέλο μικρών διαστάσεων, με ενεργό απορροφητική επιφάνεια περίπου 0,3 m² (ενεργές διαστάσεις

συλλέκτη 1,3 m×0,233 m) Χρησιμοποιήθηκαν κατασκευαστικά υλικά χαμηλού κόστους με προτεραιότητα στη χρήση υλικών που κυκλοφορούν ευρέως στο εμπόριο. Αναλυτικότερα, τα επί μέρους τμήματα κατασκευάστηκαν ως εξής:

1. Στρώμα προθέρμανσης:

Το στρώμα προθέρμανσης αποτελείται από ένα διαφανές φάτνωμα (panel) που σχηματίζεται από δύο διαφανείς πλαστικές πλάκες σε μορφή «sandwich» με διαύλους μεταξύ τους, όπου κυκλοφορεί το νερό (Εικόνα 6 α). Οι διαστάσεις της πλάκας είναι 152×25×0,4 cm με ενεργό εμβαδόν 0,3 m².

Ουσιαστικά λειτουργεί ως διαφανές κάλυμμα για την πλάκα κύριας θέρμανσης, ενώ παράλληλα προθερμαίνει το νερό πριν την είσοδο του στο στρώμα κύριας θέρμανσης (απορροφητή).

Το πολύ μικρό πάχος του στρώματος συντελεί στη γρήγορη απόκριση του συλλέκτη σε μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ σε συνδυασμό με το υλικό κατασκευής (πλαστικό) δίνουν ένα πολύ ελαφρύ σύνολο.

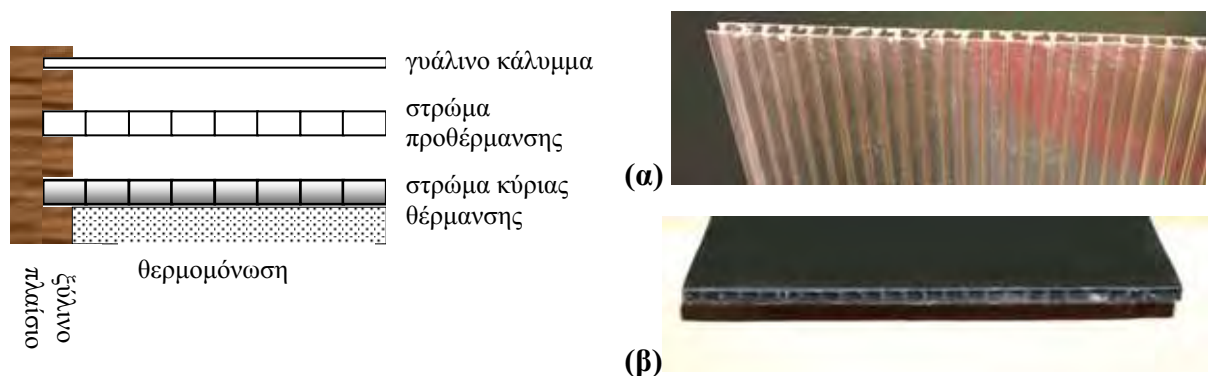
2. Στρώμα κύριας θέρμανσης:

Το στρώμα κύριας θέρμανσης αποτελείται από αδιαφανές πλαστικό φάτνωμα (panel) μαύρου χρώματος, επίσης πολύ μικρού πάχους, με διαστάσεις 148×25×0,8 cm ενώ, το ενεργό εμβαδόν του παραμένει το ίδιο με αυτό του στρώματος προθέρμανσης. Ως κατασκευαστικό υλικό χρησιμοποιήθηκε τμήμα ηλιακού συλλέκτη θέρμανσης κολυμβητηρίων (Εικόνα 6 β). Η πλάκα κύριας θέρμανσης λειτουργεί ως απορροφητής.

Το ελαστικό σωληνάκι που είναι συνδεδεμένο στο πάνω μέρος του στρώματος προθέρμανσης καταλήγει και συνδέεται στην κάτω πλευρά του στρώματος κύριας θέρμανσης. Η έξοδος τοποθετείται στο πάνω μέρος, αντιδιαμετρικά.

3. Γυάλινο κάλυμμα:

Το γυάλινο κάλυμμα διαλέχθηκε να έχει πάχος 0,2 cm (τυπικό μέγεθος εμπορίου), που εμφανίζει αρκετά καλή αντοχή και σχετικά μικρή απορρόφηση στο ηλιακό φάσμα.



Εικόνα 5. Συναρμολόγηση στρωμάτων, γυάλινου καλύμματος και θερμομόνωσης. Εικόνα 6. Κατασκευαστικά υλικά, (α) στρώμα προθέρμανσης, (β) στρώμα κύριας θέρμανσης.

4. Σκελετός στήριξης

Τα δύο στρώματα και η γυάλινη επικάλυψη συναρμολογούνται σε σκελετό και συνδέονται μεταξύ τους, ώστε να αποτελούν ενιαίο σύνολο. Ο σκελετός έπρεπε να είναι αφενός ανθεκτικός, ελαφρύς και να μη δημιουργεί θερμογέφυρες. Έτσι, επιλέχθηκε η κατασκευή ξύλι-

νου σκελετού, όπου τα δύο στρώματα και το γυάλινο κάλυμμα τοποθετήθηκαν «συρταρωτά» σε αποστάσεις 2 cm μεταξύ τους (Εικόνα 5).

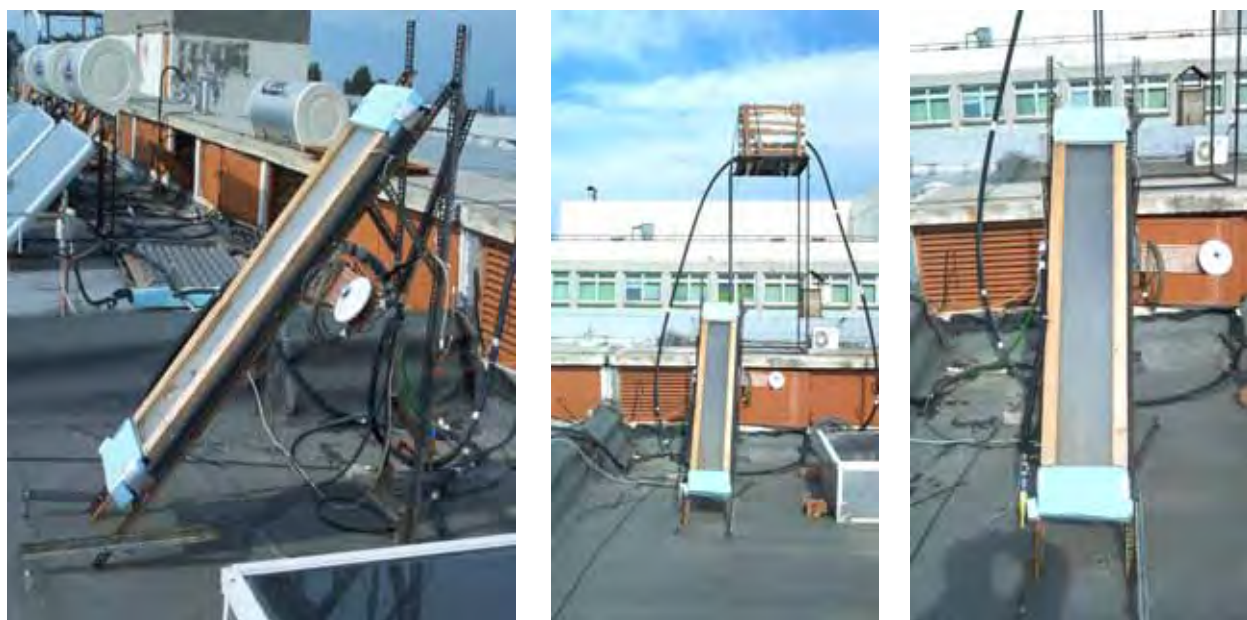
Επίσης, κατασκευάστηκε μεταλλική βάση στήριξης, για τις δοκιμές του συλλέκτη.

5. Μονώσεις

Στη πλάτη και πλευρές του συλλέκτη τοποθετήθηκε θερμομονωτικό υλικό (διογκωμένη πολυστερίνη) πάχους 2,5 cm. Επίσης, το σωληνάκι που συνδέει το στρώμα προθέρμανσης με το στρώμα κύριας θέρμανσης καλύφθηκε με μόνωση αφρώδους ελαστικού υλικού.

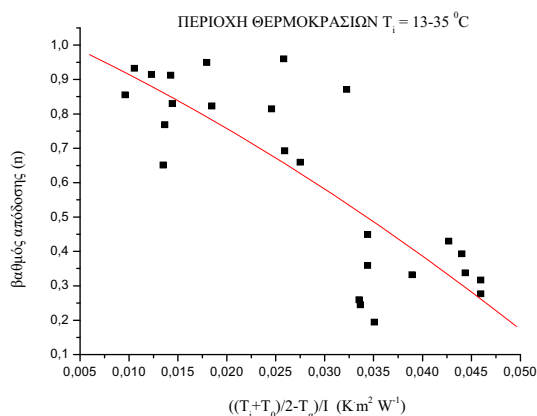
3. ΔΟΚΙΜΕΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ

Ο συλλέκτης μοντέλο τοποθετήθηκε στη μεταλλική βάση (μεταβλητής κλίσης), στο πεδίο δοκιμών, στην οροφή του κτιρίου Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών (Εικόνα 7) και δοκιμάστηκε εκτεταμένα, σύμφωνα με το πρότυπο EN 12975-2:2006, [13].

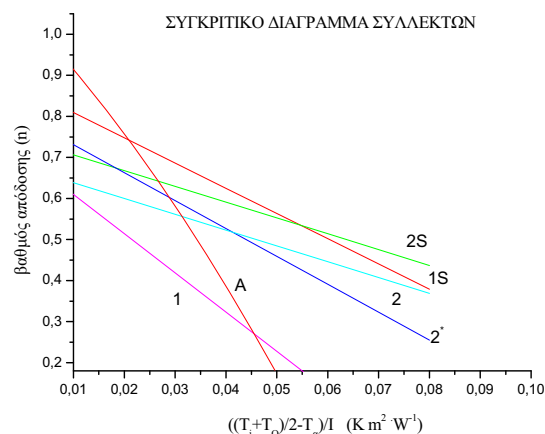


Εικόνα 7. Πειραματική διάταξη δοκιμών του ηλιακού συλλέκτη.

Λόγω της ιδιομορφίας του συλλέκτη, η θερμοκρασία εισόδου του νερού κυμάνθηκε από 13 έως 35 °C. Με βάση τις πειραματικές μετρήσεις εξάγεται ο βαθμός απόδοσης $n = f\left[\left(\frac{T_i + T_o}{2} - T_a\right)/I\right]$, όπου T_i η θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη {K}, T_o η θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον συλλέκτη {K}, T_a η θερμοκρασία περιβάλλοντος {K} και I η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας $\{W \cdot m^{-2}\}$. Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης, που προσεγγίζεται πολυωνυμικά από τη σχέση $n = \alpha_2 X^2 + \alpha_1 X + \alpha_0$, με $\alpha_2 = -95,1071$, $\alpha_1 = -12,84132$, $\alpha_0 = 1,05234$, $X = \left(\frac{T_i + T_o}{2} - T_a\right)/I$ και συντελεστή συσχέτισης $r^2 = 0,67013$. Όπως φαίνεται, για χαμηλές τιμές του λόγου X , ο συντελεστής απόδοσης λαμβάνει πολύ υψηλές τιμές, ενώ όσο ο λόγος αυτός αυξάνει, μειώνεται γρήγορα. Υψηλοί βαθμοί απόδοσης επιτυγχάνονται, δηλαδή, για μικρές τιμές της θερμοκρασίας εισόδου, όπως και για μικρές τιμές θερμοκρασίας εξόδου. Επίσης, ευνοϊκά λειτουργεί η υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος και η μεγάλη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας.



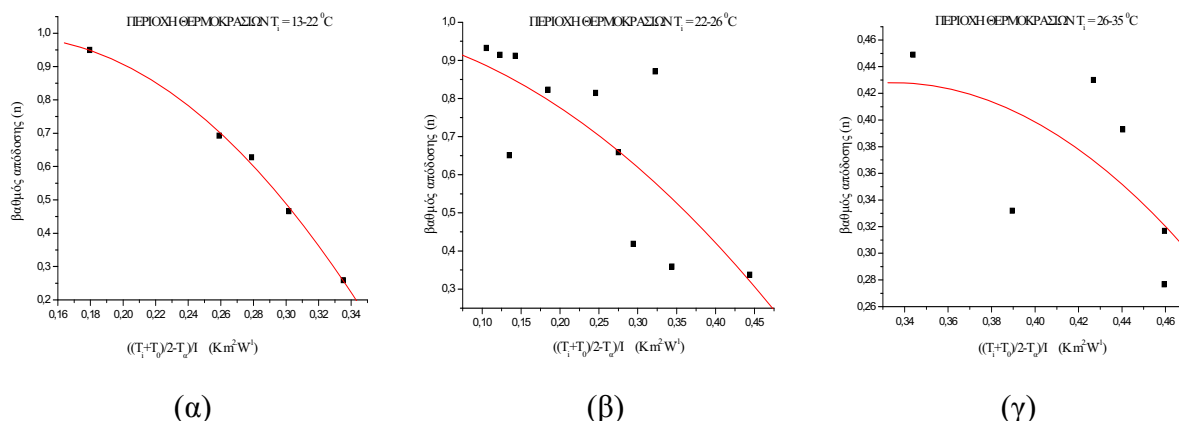
Εικόνα 8. Διάγραμμα βαθμού απόδοσης.



Εικόνα 9. Σύγκριση με συλλέκτες του εμπορίου.

Στην Εικόνα 9 συγκρίνεται ο συλλέκτης με άλλους συλλέκτες του εμπορίου [4]. Με Α σημειώνεται η χαρακτηριστική του υπό μελέτη συλλέκτη. Με 1 σημειώνεται η χαρακτηριστική ενός συλλέκτη με κοινό απορροφητή και απλή επικάλυψη. Με 2 και 2* σημειώνονται οι χαρακτηριστικές δύο συλλεκτών με διπλή επικάλυψη και απλή μαύρη βαφή του απορροφητή. Ο απορροφητής του ενός συλλέκτη είναι κατασκευασμένος από ατσάλι, ενώ του άλλου είναι από αλουμίνιο. Με 1S σημειώνεται η χαρακτηριστική ενός συλλέκτη με απλή επικάλυψη και επιλεκτικό απορροφητή και με 2S σημειώνεται η χαρακτηριστική ενός συλλέκτη με διπλή επικάλυψη, επιλεκτικό απορροφητή και αντανάκλαστική επίστρωση σε τρεις επιφάνειες των δύο γυάλινων επικαλύψεων.

Επειδή από την Εικόνα 9 δεν καθίσταται εμφανές για ποιες θερμοκρασίες εισόδου ο συλλέκτης υπερτερεί των άλλων συλλεκτών, τα πειραματικά αποτελέσματα χωρίστηκαν σε 3 κατηγορίες θερμοκρασιών εισόδου (13-22 °C), (22-26 °C), (26-35 °C). Για κάθε περιοχή εξάγονται πολυωνυμικές συσχετίσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται για πληρέστερη σύγκριση με τους ίδιους, όπως παραπάνω, συλλέκτες του εμπορίου.



Εικόνα 10. Διαγράμματα βαθμού απόδοσης, για διαφορετικές περιοχές θερμοκρασιών νερού εισόδου.

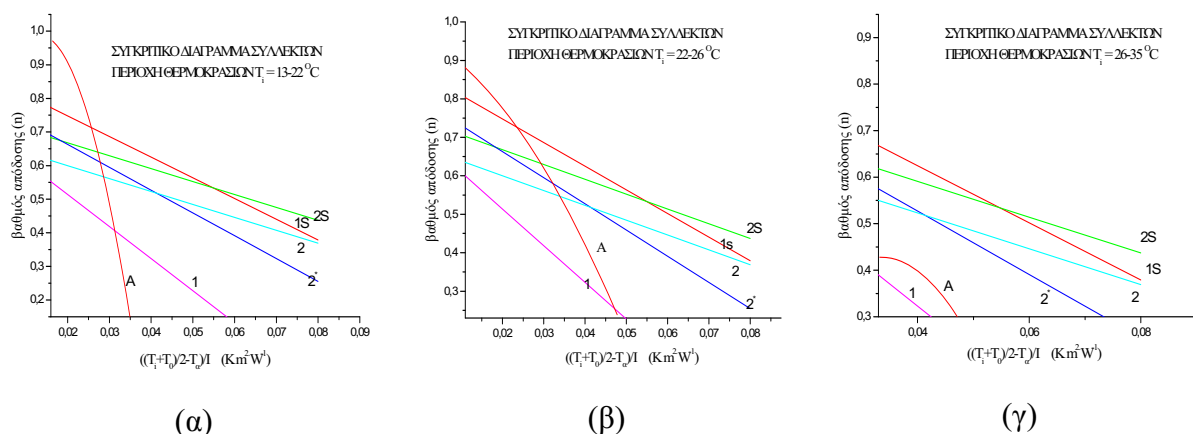
Στην Εικόνα 10 παρουσιάζονται διαγράμματα για τις 3 περιοχές, με συσχετίσεις της μορφής $n = a_2 X^2 + a_1 X + a_0$, όπου:

$$a_2 = -5,0006, a_1 = 0,16619, a_0 = 0,85831, r^2 = 0,4431 \text{ (Εικόνα 10 (α))}$$

$$a_2 = -2,06854, a_1 = -0,53253, a_0 = 0,96257, r^2 = 0,57925 \text{ (Εικόνα 10 (β))}$$

$$a_2 = -6,83949, a_1 = 4,57512, a_0 = -0,33711, r^2 = 0,41924 \text{ (Εικόνα 10 (γ))}$$

Η σύγκριση με τους συλλέκτες του εμπορίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 11.



Εικόνα 11. Σύγκριση, ανά περιοχή θερμοκρασιών εισόδου, με συλλέκτες του εμπορίου.

Όπως φαίνεται, για τις 2 πρώτες περιοχές (α) (β), για τιμές X μικρότερες από $0,03 \text{ K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ ο συλλέκτης υπερτερεί σε σύγκριση με όλους τους άλλους. Στη περιοχή (γ) καθίσταται εμφανής η πτώση της απόδοσης (υπερτερεί μόνο σε σχέση με το συλλέκτη No 1).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα παραπάνω αποτελέσματα και συγκρίσεις συμπεραίνεται ότι ο υπό μελέτη συλλέκτης υπερέχει σαφώς όλων στων συλλεκτών του εμπορίου, όταν η θερμοκρασία εισόδου του νερού διατηρείται χαμηλή. Αν η θερμοκρασία εισόδου ευρίσκεται κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τότε η υπεροχή αυτή διατηρείται και για αυξημένες θερμοκρασίες (μέχρι $\sim 80^\circ \text{C}$) εξόδου [4], [5]. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αυτός ο τύπος συλλέκτη αποτελεί ιδανική εφαρμογή σε ηλιακά συστήματα «μονής διάβασης». Επίσης, με χρήση κατάλληλων διατάξεων αυτομάτου ελέγχου [7] η υπεροχή του μεγιστοποιείται, ειδικά σε εφαρμογές με 2 δεξαμενές αποθήκευσης, μιας χαμηλής και μιας υψηλής θερμοκρασίας. Σ' αυτή τη περίπτωση, οι ροές στα 2 στρώματα καθίστανται ανεξάρτητες (η ροή από το στρώμα προθέρμανσης δεν οδηγείται στο στρώμα κύριας θέρμανσης). Με κατάλληλη ρύθμιση τους επιτυγχάνονται τα απαιτούμενα θερμοκρασιακά επίπεδα των δεξαμενών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν τους Μηχανολόγους Μηχανικούς Μαρκίδη Πολύδωρο και Βουρβαχάκη Αντώνη, που σαν φοιτητές του Τμήματος Μηχ/γων & Αερον/γών Μηχ/κών του Παν/μίου Πατρών συνέλεξαν και επεξεργάστηκαν τις πειραματικές μετρήσεις της παρούσας εργασίας, στα πλαίσια της εκπόνησης των Διπλωματικών τους εργασιών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1 J. M. GORDON and Y. ZARMI, "Thermosyphon systems: single vs multi-pass", *Solar Energy Vol. 27, No. 5, pp. 441 - 442, 1981.*
- 2 Manuel Collares Pereira, "Singlepass Strategy for Solar Water Heating", *SUNWORLD, Vol. 2, No 2, pp. 49 - 51, 1984, ISSN 0149 1983.*
- 3 Y. Caouris, R. Rigopoulos, J. Tripanagnostopoulos, and P. Yannoulis, " A novel Solar Collector ", *Solar Energy, 21, 157, 1978.*
- 4 Γ. Καούρης, "Μελέτη κατασκευή και αξιολόγηση πρωτότυπου επίπεδου ηλιακού συλλέκτη ", *Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 1980.*

- 5 Y.G. Caouris, C.C. Lefas, " A two layer thermal trap collector ", *Int. Journ. of Energy Systems*, Vol. 4, No 1, pp. 20-22, 1984.
- 6 European Standard (EN 12975-2:2006), *Thermal solar systems and components - Solar collectors – Part 2: Test methods*.
- 7 C.C. Lefas, Y.G. Caouris, "Design of a low power controller for dual thermal store systems", *Proceedings of the Int. Symp. on Energy and Environmental Systems*, Athens, Aug. 29 - Sept. 2 1983, pp. 142-144.

ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ - ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ

ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕ ΧΙΟΝΟΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΙΣΧΥΡΟ ΠΑΓΕΤΟ. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ

Κ. Γκαράκης¹, Γ. Λαζάρου², Κ. Λουκίδης³

¹Εργαστήριο ΑΠΕ / Τμήμα Ενεργειακής Τεχνολογίας / ΤΕΙ Αθήνας, Αγ. Σπυρίδωνος 17, 12210 Αιγάλεω, e-mail: ape@teiath.gr

²Acciona Ενεργειακή Α.Ε. Φραγκοκλησιάς 7, 15125 Μαρούσι, e-mail: jlazarou@accionaenergiaki.com

³ENTEKA Α.Ε. Τύχης 2, 15233 Χαλάνδρι, e-mail: kloukidis@enteka.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην γενική περιγραφή των μεθόδων που χρησιμοποιούνται σήμερα για την μέτρηση του αιολικού δυναμικού για την κατασκευή αιολικών πάρκων. Επικεντρώνεται στην περίπτωση όπου αυτές γίνονται σε μεγάλα υψόμετρα με συνέπεια να αντιμετωπίζονται δυσκολίες στην διεξαγωγή των μετρήσεων. Περιγράφονται οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται συχνότερα, τα συνηθέστερα προβλήματα που προκύπτουν. Τέλος, γίνεται μια παρουσίαση ορισμένων προτάσεων για την βελτίωση των υπαρχόντων μεθόδων καθώς και για την χρησιμοποίηση εναλλακτικών λύσεων.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βασικός παράγοντας για το σχεδιασμό ενός αιολικού πάρκου είναι η σωστή και ακριβής μέτρηση του αιολικού δυναμικού της υποψήφιας θέσης εγκατάστασης. Με δεδομένο ότι το αιολικό δυναμικό είναι αυξημένο σε μεγάλα υψόμετρα, αλλά και για περιβαλλοντικούς και χωροταξικούς λόγους, είναι πλέον αρκετά διαδεδομένη η πρακτική της σχεδίασης έργων σε απομακρυσμένα βουνά με μεγάλα υψόμετρα.

2.ΕΠΙΛΟΓΗ ΘΕΣΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Βασική παράμετρος για την εγκατάσταση του μετρητικού εξοπλισμού είναι η επιλογή της θέσης. Κύριο μέλημα είναι επιλογή ενός σημείου που θα χαρακτηρίζεται ως αντιπροσωπευτικό των ανεμολογικών συνθηκών του συνολικού χώρου εγκατάστασης [1]. Επιδιώκεται η θέση να είναι σε κάποιον λόφο, ο οποίος δεν «σκιάζεται» από παρακείμενους λόφους ή άλλα εμπόδια, η βλάστηση δεν είναι έντονη και δεν υπάρχουν ψηλά δέντρα κοντά στα όργανα ώστε να επηρεάζουν την ροή του αέρα και κατά συνέπεια την ακρίβεια της μέτρησης [2].

Παράλληλα πρέπει να εξετάζεται η δυνατότητα πρόσβασης στη θέση εγκατάστασης σε συνδυασμό με τον απαιτούμενο χώρο. Η πλέον διαδεδομένη πρακτική είναι αυτή των μετεωρολογικών ιστών, σωληνωτών ή δικτυωτών. Επιπρόσθετα, το συνεχώς αυξανόμενο ύψος των χρησιμοποιούμενων ανεμογεννητριών – τυπικό ύψος πλήμνης θεωρείται τα 80μ-καθιστά επιτακτική την ανάγκη για εγκατάσταση όσο το δυνατόν ψηλότερων ιστών. Το γεγονός αυτό μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να αποτελεί τροχοπέδη οδηγώντας μας σε πιο συμβατικές λύσεις που όμως κοστίζουν σε ακρίβεια και αξιοπιστία των μετρήσεων.

3. ΜΕΤΡΗΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Το σημαντικότερο κομμάτι του μετεωρολογικού ιστού προφανώς είναι ο μετρητικός εξοπλισμός που θα χρησιμοποιηθεί. Κύριο μέλημα επιβάλλεται να είναι η επιλογή του τύπου των οργάνων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Αυτά πρέπει να είναι:

- Να ανήκουν στην κατηγορία 1st class
- Το εύρος μέτρησης του οργάνου
- Η διακριτική ικανότητα του οργάνου
- Η αξιοπιστία του.
- Η αντοχή του σε ακραίες καιρικές συνθήκες.

Η διακριτική ικανότητα των οργάνων και ιδιαίτερα των ανεμομέτρων είναι καίρια για την διεξαγωγή μετρήσεων με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια ελαχιστοποιώντας κατά το δυνατόν την αβεβαιότητα μέτρησης. Σύμφωνα με την μελέτη Accuwind του Ινστιτούτου Riso και η οποία κάνει μια συγκριτική κατηγοριοποίηση μεταξύ ορισμένων κυπελλοφόρων ανεμομέτρων, τα όργανα με την μεγαλύτερη ακρίβεια θεωρούνται αυτά των κατασκευαστών Vector Instruments και Adolf Thies GmbH.[3]



Εικόνα 1: Κυπελλοφόρα ανεμόμετρα των κατασκευαστών Vector Instruments και Adolf Thies GmbH.

Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει επίσης να δίνεται στην ποιότητα των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν. Οι δύσκολες καιρικές συνθήκες είναι πιθανό να καταστήσουν πολύ δύσκολη ή και αδύνατη την πρόσβαση κατά τους χειμερινούς μήνες, οπότε στην επιλογή των οργάνων πρέπει να συνυπολογίζεται και η αντοχή τους σε ακραίες συνθήκες. Παράλληλα, είναι θεμιτό να χρησιμοποιούνται επιπρόσθετες καλύψεις για κάποια μέρη του εξοπλισμού, όπως του κουτί του καταγραφικού οι μπαταρίες κτλ.[4].

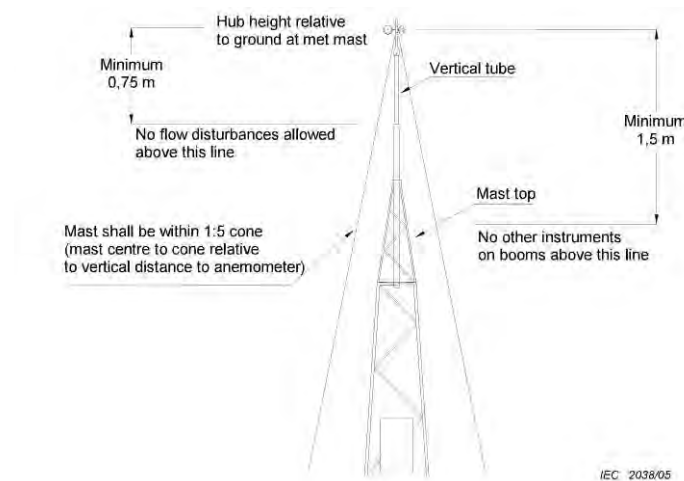
Βασικός παράγοντας είναι η επιλογή του τύπου του ιστού. Συνηθίζεται η χρήση σωληνωτών ή δικτυωτών ιστών. Τα συνήθη ύψη σωληνωτών ιστών κυμαίνονται από 10 έως και 50 μέτρα. Σε ακραίες καιρικές συνθήκες με παγετό και συσσώρευση πάγου είναι πιθανή η αστοχία υλικού που θα προκαλέσει το λυγισμό του ιστού. Για μεγαλύτερα ύψη προτιμάται η εγκατάσταση δικτυωμάτων, τα οποία είναι πιο στιβαρά κατασκευές και παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή σε έντονα καιρικά φαινόμενα. Επίσης η καταπόνηση που αναμένεται λόγω της συγκέντρωσης πάγου στο σώμα του ιστού και τα συρματόσχοινα πρέπει να λαμβάνεται σημαντικά υπόψη και είναι

αναγκαίο να προτιμούνται κατασκευές με αυξημένη αντοχή σε συσσώρευση πάγου σε συνάρτηση με την αντίσταση σε υψηλές ταχύτητες ανέμου [2].

Τέλος, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν όργανα ανίχνευσης παγετού, ώστε να σημειώνονται τα διαστήματα όπου παρατηρούνται φαινόμενα παγιοποίησης. Παρόλα αυτά ακόμα δεν θεωρούνται ιδιαίτερα αξιόπιστα ως προς την λειτουργία τους.

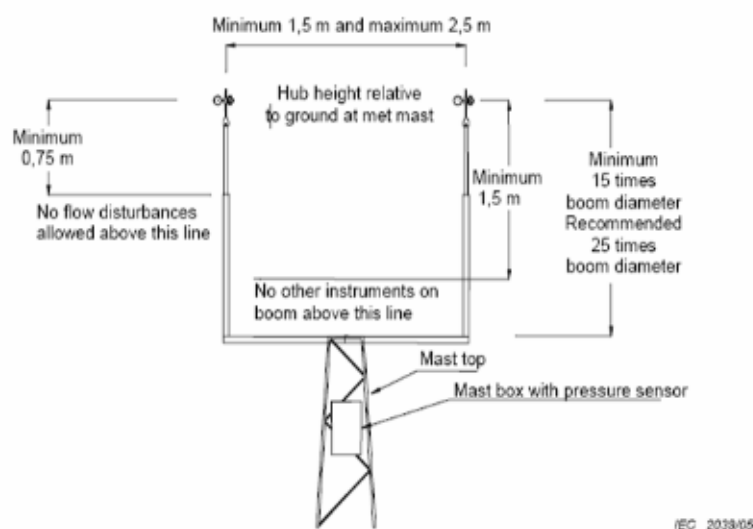
4. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΟΡΓΑΝΩΝ

Προκειμένου οι μετρήσεις που θα πραγματοποιηθούν να έχουν τη μέγιστη ακρίβεια πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη διάταξη που θα έχουν τα όργανα στον μετρητικό ιστό. Για τον σκοπό αυτό επιβάλλεται να ακολουθούνται οι κανόνες κατά το διεθνές πρότυπο IEC 61400-12-1 [5]. Προτιμώμενη μέθοδος είναι αυτή της τοποθέτησης του ανεμομέτρου στην κορυφή του ιστού, όπου η επίδραση του ιστού στη ροή του ανέμου είναι μηδενική.



Εικόνα 2: Προτεινόμενη τοποθέτηση ανεμομέτρου κορυφής

Εναλλακτικός τρόπος είναι η χρήση 2 ανεμομέτρων στο ίδιο ύψος, ενός πρωτεύοντος και ενός ελέγχου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 3: Εναλλακτική τοποθέτηση ανεμομέτρου κορυφής και ανεμομέτρου ελέγχου

5. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Το βασικότερο πρόβλημα που απαντάται κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων σε περιοχές με χιονοπτώσεις και έντονο παγετό είναι:

- η καταστροφή των οργάνων
- η απώλεια δεδομένων (χαμηλή διαθεσιμότητα)
- η αυξημένη αβεβαιότητα μετρήσεων

Κατά τους χειμερινούς μήνες είναι σύνηθες να παρατηρούνται ιδιαίτερα χαμηλές θερμοκρασίες και χιονοπτώσεις. Το αποτέλεσμα αυτών είναι να παρατηρούνται φαινόμενα παγοποίησης των μετεωρολογικών ιστών. Η διαπίστωση τέτοιων συμβάντων γίνεται είτε από τις ένδειξης θερμοκρασίας είτε από την παρατήρηση συνεχόμενων μηδενικών τιμών. Παρόλα αυτά δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις κατά τις οποίες τα όργανα παγώνουν μερικώς με αποτέλεσμα να δίνουν λανθασμένες τιμές



Εικόνα 4: Ενδεικτικά παραδείγματα παγωμένων οργάνων

Επίσης, υπάρχει η πιθανότητα στρέβλωσης των κυπέλλων του ανεμομέτρου είτε και η θραύση ενός εξ αυτών, γεγονός που θα οδηγήσει προφανώς στη λήψη λανθασμένων μετρήσεων.

Τέλος, η συσσώρευση πάγου επιβαρύνει σημαντικά το σώμα του ιστού με αποτέλεσμα μια παρατεταμένη κακοκαιρία να οδηγήσει στην πτώση του.

6. ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

Παρακάτω παρατίθενται μερικές από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων, όμως και αυτές μέχρι στιγμής δεν είναι δυνατόν να επιλύσουν πλήρως τα εμφανιζόμενα προβλήματα.

- Χρήση θερμαινόμενων οργάνων:
Αποτελούν μια συνήθη πρακτική. Πρόκειται για όργανα με την προσθήκη ενός αισθητήρα θέρμανσης στον άξονα του οργάνου. Παρόλα αυτά δημιουργείται

πρόβλημα αξιοπιστίας καθώς έχει διαπιστωθεί ότι η θέρμανση που παρέχεται δεν επαρκεί για την ολική αποφυγή παγοποίησης, ενώ η αυξημένη ζήτηση τροφοδοσίας ενδέχεται να προκαλέσει προβλήματα ενεργειακής αυτονομίας σε όλο το σύστημα.



Εικόνα 5: Θερμαινόμενο κυπελλοφόρο ανεμόμετρο και ανεμοδείκτης.

- Χρήση ανεμομέτρων υπερήχων

Τα συγκεκριμένα όργανα παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη αντοχή σε ακραίες καιρικές συνθήκες. Συνδυάζουν ανεμόμετρο και ανεμοδείκτη και έχουν αναπτυχθεί κυρίως ως όργανα ελέγχου της λειτουργίας των ανεμογεννητριών. Για αυτό το λόγο παρουσιάζουν κάποια προβλήματα αξιοπιστίας ,αφού δεν είναι ιδιαίτερα ακριβή καθώς κάτι τέτοιο δεν απαιτείται για τη λειτουργία της Α/Γ και δεν είναι συμβατά με το πρότυπο IEC 61400-12-1.



Εικόνα 6: Διαξονικό ανεμόμετρο υπερήχων.

- Χρήση ανεμομέτρων ελέγχου ή εφεδρικών

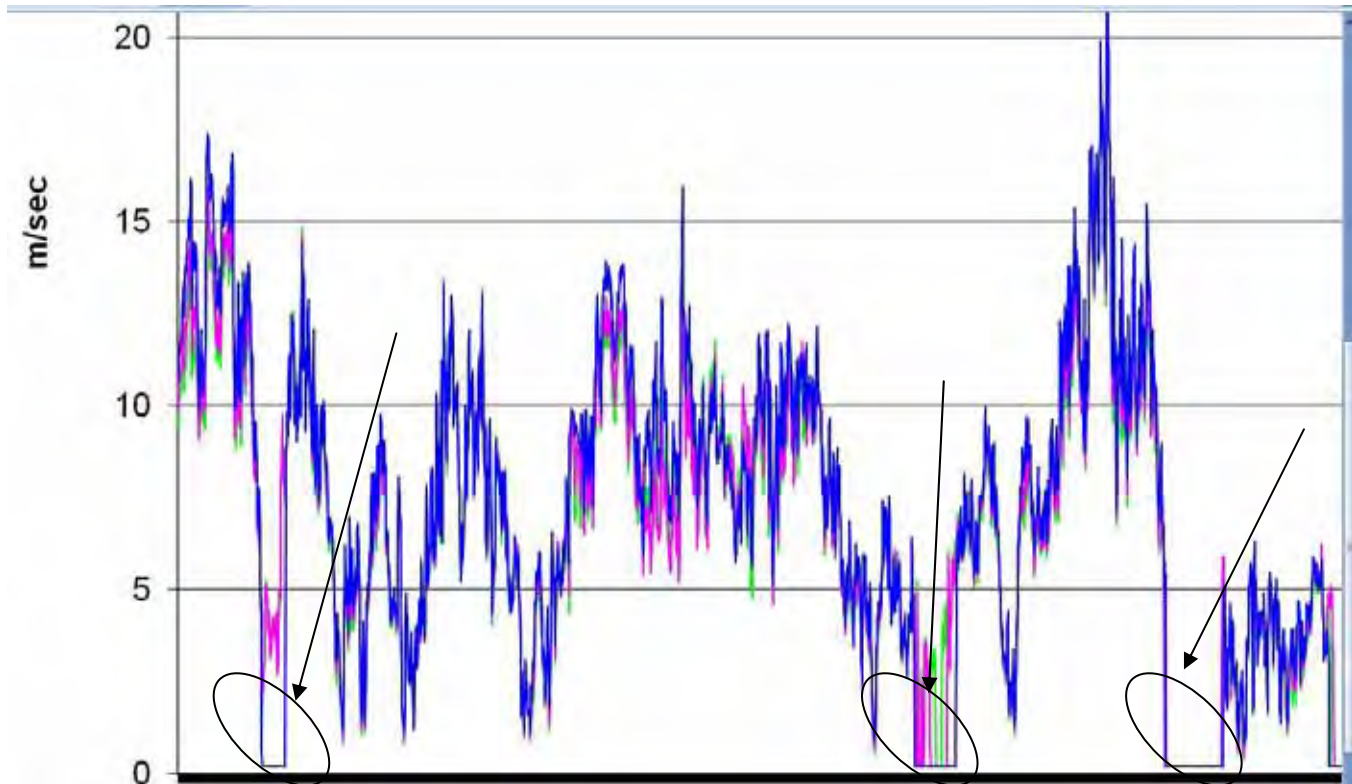
Η τοποθέτησή τους αποτελεί μια πολύ αξιόπιστη και ενδεικνύομενη λύση. Με τη χρήση τους επιτυγχάνεται εξ αρχής ο έλεγχος της σωστής λειτουργίας των οργάνων, αλλά και ευκολότερη ανίχνευση συμβάντων προβληματικών μετρήσεων. Αυτό γίνεται μέσα από την παρακολούθηση της συνέχειας των μετρήσεων ,όπου τα όργανα υπό κανονικές συνθήκες πρέπει να παρουσιάζουν την ίδια τάση.

- Τεχνικές ελέγχου των συλλεχθέντων δεδομένων

Κατά τον έλεγχο των δεδομένων είναι απαραίτητο να γίνεται κάποιο «φιλτράρισμα» τους ώστε να αφαιρούνται οι λανθασμένες εγγραφές. Έχει παρατηρηθεί ότι όταν τα όργανα μέτρησης ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου έχουν ακινητοποιηθεί λόγω συσσώρευσης πάγου ή περιστρέφονται με ταχύτητα μικρότερη της πραγματικής, οι τιμές της συστηματικής απόκλισης της μέσης τιμής είναι ιδιαίτερα μικρή ή και μηδενική. Σε συνδυασμό με την παρατήρηση της καταγεγραμμένης θερμοκρασίας σε αυτά τα χρονικά διαστήματα, μπορούμε να εισάγουμε κάποιο κριτήριο απόρριψης

τιμών. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η παγοποίηση είναι μια αργή διαδικασία, οπότε συνιστάται να αφαιρούνται επίσης ορισμένες ώρες δεδομένων πριν και μετά τα συμβάντα που εντοπίστηκαν για να αυξήσουμε την αξιοπιστία των δεδομένων [2]. Σημειώνεται, πάντως πως δεν υπάρχει κάποιος πάγιος κανόνας για το φιλτράρισμα των δεδομένων και εν μέρει υπόκειται στην κρίση και την εμπειρία του μελετητή.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα τυπικό παράδειγμα ανίχνευσης λανθασμένων μετρήσεων λόγω παγοποίησης των οργάνων, όπου παρατηρείται μια «ασυνέχεια» στην κοινή ροή των 3 ανεμομέτρων.



Εικόνα 7: Τυπική χρονοσειρά μετεωρολογικού ιστού με 3 ανεμόμετρα

7. ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Στην προσπάθεια εξεύρεσης λύσεων, η βιομηχανία αναπτύσσει συνεχώς νέες τεχνολογίες και μεθόδους μέτρησης του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής. Μερικές από αυτές είναι:

- Ανεμόμετρα υπερήχων (ultrasonic anemometers)
Τα ανεμόμετρα υπερήχων είναι τα πιο σύγχρονα ανεμόμετρα που διατίθενται με το πλεονέκτημα της απουσίας κινητών μερών, που σημαίνει ότι δεν υπάρχουν απώλειες λόγω τριβής όπως στα συμβατικά ηλεκτρομηχανικά ανεμόμετρα. Μετρούν ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου συγχρόνως. Οι μετρήσεις είναι υψηλής ακρίβειας. Ανάλογα με τον αριθμό των συνιστωσών του ανέμου χωρίζονται σε μονοαξονικά, διαξονικά και τριαξονικά ανεμόμετρα. Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται σε ζεύγη υπερηχητικών μετατροπέων (transducers) που είναι σε απόσταση περίπου 20 cm περίπου ο ένας από τον άλλο και λειτουργούν ως ακουστικός πομπός και δέκτης. Η μέτρηση του χρόνου διέλευσης του ακουστικού σήματος από το ένα σημείο στο άλλο δίνει τη ταχύτητα του αέρα. Τα τριαξονικά ανεμόμετρα υπερήχων μετρούν επιπλέον τη τύρβη.

- Μετρήσεις με τη χρήση SODAR (Sonic Detection And Ranging).
Πρόκειται για ένα όργανο που βασίζεται στην εκπομπή και λήψη ηχητικών σημάτων καθ' ύψος αναλύοντας τη διασπορά των ηχητικών κυμάτων που παράγονται στην ατμόσφαιρα υπολογίζοντας έτσι την ταχύτητα του ανέμου σε διάφορα ύψη που μπορεί να φτάσουν μέχρι και τα 2 χιλιόμετρα. Χρησιμοποιούνται κυρίως για τον υπολογισμό της κατά ύψος μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου.
- Μετρήσεις με τη χρήση LIDAR(LIght Detection And Ranging).
Η συσκευή αυτή είναι παρόμοια ως προς τη λειτουργία της με το SODAR, μόνο που χρησιμοποιεί δέσμη φωτός αντί για ηχητικά σήματα. Αυτή εκπέμπεται σε σχήμα κώνου υπό γωνία περίπου 30^0 και εκτείνεται σε ύψη μέχρι περίπου 200 μέτρα. Παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια από το SODAR και δίνει αποτελέσματα ικανοποιητικής ακρίβειας.

8. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ -ΛΥΣΕΙΣ

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων στις περιπτώσεις που μελετά η παρούσα εργασία και ήδη χρησιμοποιούνται ή βρίσκονται σε στάδιο μελέτης.

- Ταυτόχρονη χρήση θερμαινόμενων και συμβατικών οργάνων στον ίδιο ιστό.

Πλεονεκτήματα: Με τον τρόπο αυτό αποκτούμε μια καλύτερη εικόνα του κλίματος της περιοχής και είναι δυνατόν να εντοπίσουμε τις χρονικές εκείνες περιόδους κατά τις οποίες αναμένεται να έχουμε προβλήματα λόγω συσσώρευσης πάγου.

Μειονεκτήματα: Η αυξημένη κατανάλωση που είναι απαραίτητη για τη λειτουργία των οργάνων ενδέχεται να δημιουργήσει προβλήματα στην ενεργειακή αυτονομία του συστήματος. Επίσης, η χρήση θερμαινόμενων οργάνων και της απαραίτητης ενεργειακής πηγής (φ/β πιθανά σε συνδυασμό με α/γ) αυξάνει το κόστος του ιστού.

- Εγκατάσταση ενός δεύτερου μετεωρολογικού ιστού σε κάποιο άλλο σημείο, ενδεχομένως και εκτός του χώρου εγκατάστασης, το οποίο όμως θα είναι προσβάσιμο καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ώστε να εξασφαλίζεται η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη συλλογή δεδομένων. Στη συνέχεια και κυρίως κατά την περίοδο από την άνοιξη μέχρι και φθινόπωρο μπορεί να γίνει μια σύγκριση μέσω της μέθοδου measure-correlate-predict MCP) των αποτελεσμάτων αυτού του ιστού με τον ιστό που μας ενδιαφέρει [2].

Πλεονεκτήματα: Συλλογή περισσότερων δεδομένων που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για την αναπαραγωγή των δεδομένων που θα χαθούν κατά τη διάρκεια του χειμώνα και να επιτύχουμε έτσι υψηλότερη διαθεσιμότητα, που είναι άλλωστε και το ζητούμενο.

Μειονεκτήματα: Μειωμένη ακρίβεια αποτελεσμάτων και πιθανότητα χαμηλού βαθμού συσχέτισης μεταξύ των δύο ιστών. Επίσης, έχουμε αυξημένο κόστος λόγω των επιπλέον εγκαταστάσεων.

- Παράλληλη χρήση ενός συμβατικού μετεωρολογικού ιστού και ενός LIDAR ή SODAR. Η διάρκεια των μετρήσεων μπορεί να ξεκινήσει από την περίοδο της άνοιξης όπου και δεν αναμένονται ιδιαίτερα προβλήματα στην λειτουργία των οργάνων. Εκτιμάται ότι μια κοινή περίοδος μετρήσεων περίπου 6 μηνών είναι αρκετή

για να αναπαράγουμε χρονοσειρά μεγαλύτερης διάρκειας και να κάνουμε αναγωγή σε μεγαλύτερα ύψη αναφοράς

Πλεονεκτήματα: Αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια και καλή συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων. Ο χρόνος που απαιτείται είναι επίσης λίγος.

Μειονεκτήματα: Το αρκετά μεγάλο κόστος κτήσης ή και ενοικίασης των μηχανημάτων. Οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι ιδιαίτερα αυξημένες και απαιτείται η χρήση γεννήτριας ή μπαταριών για τη λειτουργία τους. Γίνονται προσπάθειες για την εξεύρεση λύσεων που θα καταστήσει τις συσκευές αυτές πιο εύχρηστες. Συνάμα, υπάρχει και ο κίνδυνος για βανδαλισμό ή ακόμη και κλοπή του LIDAR ή SODAR.

- Χρήση ανιχνευτών πάγου.

Πλεονεκτήματα: Δίνεται η δυνατότητα ανίχνευσης πάγου.

Μειονεκτήματα: Δεν είναι ακόμα αξιόπιστα σε ικανοποιητικό βαθμό.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας των οργάνων αυτών θα βοηθήσει σημαντικά στο μέλλον στη μείωση της αβεβαιότητας που υπάρχει κατά τη μέτρηση του αιολικού δυναμικού σε ακραίες καιρικές συνθήκες.

- Χρήση ανεμομέτρων-ανεμοδεικτών υπερήχων.

Πλεονεκτήματα: Αυξημένη αντοχή σε ακραίες καιρικές συνθήκες. Ενισχυμένο σύστημα θέρμανσης ώστε να ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες συσσώρευσης πάγου στο όργανο.

Μειονεκτήματα: Όπως αναφέρθηκε ήδη, πρόκειται για όργανα ελέγχου της λειτουργίας των Α/Γ, με μειωμένη ακρίβεια, ενώ και το κόστος τους είναι αρκετά υψηλό. (υπερ δεκαπλάσιο από ένα ζεύγος συμβατικού κυπελλοφόρου ανεμομέτρου και ανεμοδείκτη) Η βελτίωσή τους και η πιθανή εναρμόνισή τους με τα διεθνή πρότυπα, θα τα καταστήσει μια πολύ καλή και αξιόπιστη λύση.

- Συμμετοχή της χώρας μας μέσω του ΚΑΠΕ σε συνεργασία με εταιρείες που έχουν υπό ανάπτυξη έργα σε περιοχές με φαινόμενα χιονοπτώσεων και ισχυρών παγετών στην International Energy Agency Wind Energy in Cold Climates, IEA R&D Wind – Task 21.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Γ. Μπεργελές : Ανεμοκινητήρες
2. Ι. Καλδέλλης : Διαχείριση της Αιολικής ενέργειας, Αθήνα 1999
3. J.-Å. Dahlberg, T.F. Pedersen, Peter Busche , ACCUWIND: Classification of five up anemometers according to IEC 6140012-1, RISO-R report 1556:, May 2006
4. Timo Laakso, Lars Talhaug, Goran Ronsten, Robert Horbaty, Ian Baring-Gould, Antoine Lacroix, Esa Peltola : Expert group study on Wind Energy Projects In Cold Climates, 1st edition 2005
5. International Standard IEC 61400: Wind Turbines, Part 12-1: Power Performance Measurements of electricity producing wind turbines, Annex G, First Edition, 2005

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕ ΜΕΓΑΛΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ (ΑΝΩ 1500m asl) ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

Κ. Γκαράκης¹, Κ. Κατώπης², Κ. Λουκίδης³, Γ. Λαζάρου⁴

¹Εργαστήριο ΑΠΕ / Τμήμα Ενεργειακής Τεχνολογίας / ΤΕΙ Αθήνας, Αγ. Σπυρίδωνος 17, 12210 Αιγάλεω, e-mail: ape@teiath.gr

²Gamesa Ενεργειακή Α.Ε. Παμπούκη 3, 15451 Ν. Ψυχικό , e-mail: kkatopis@gamesacorp.com

³ΕΝΤΕΚΑ Α.Ε. Τύχης 2, 15233 Χαλάνδρι, e-mail: kloukidis@enteka.gr

⁴Acciona Ενεργειακή Α.Ε. Φραγκοκλησιάς 7, 15125 Μαρούσι , e-mail: jlazarou@accionaenergiaki.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εισήγηση αυτή παρουσιάζει και αναλύει τους παράγοντες σχεδίασης και μελέτης Αιολικών Πάρκων (Α/Π) μεγάλης κλίμακας σε περιοχές με μεγάλο υψόμετρο (άνω των 1500m asl) στον Ελληνικό χώρο. Για το σκοπό αυτό παρουσιάζονται τα προβλήματα που υπάρχουν λόγω των δυσχερών καιρικών συνθηκών αλλά και των απαιτήσεων σε ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό, έργα υποδομής και διασύνδεσης. Η προσπάθεια της ερευνητικής ομάδας επικεντρώνεται στην κατάλληλη επιλογή σχεδιαστικών λύσεων, ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη ενεργειακή αποδοτικότητα του έργου με την παράλληλη μείωση του αρχικού κόστους επένδυσης. Επιπλέον, γίνεται αναφορά σε γραφειοκρατικές αγκυλώσεις για την διαχείριση αυτών των έργων από τους φορείς αδειοδότησης. Τέλος, παρουσιάζεται η περίπτωση ενός υπό σχεδιασμό Α/Π ισχύος 315MW σε υψόμετρο 1500-2000m asl, αναλύοντας τις δυσκολίες που υπάρχουν και τις σχεδιαστικές λύσεις και ενέργειες που ακολουθούνται.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν πρωταγωνιστικό ρόλο στην Ευρωπαϊκή Ενεργειακή πολιτική. Ο δεσμευτικός στόχος διείσδυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας είναι 18% το 2020 για το σύνολο του ενεργειακού ισοζυγίου, που έχει προταθεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και ισοδυναμεί με την υποχρέωση εγκατάστασης Αιολικών Πάρκων ελάχιστης ισχύος 10.000 MW (με τους πιο συντηρητικούς υπολογισμούς) το 2020. Στην Ελλάδα σήμερα λειτουργούν Αιολικά Πάρκα ισχύος περίπου 900 MW, ενώ κατά δήλωση του Προέδρου της ΡΑΕ στην 4^η ημερίδα της ΕΛΕΤΑΕΝ (Φεβρουάριος 2008) είναι δυνατή η απρόσκοπτη σύνδεση και διείσδυση 5.500 MW αιολικών Πάρκων στο διασυνδεδεμένο Σύστημα χωρίς οικονομικές ή άλλες συνέπειες, αν υλοποιηθεί η εγκεκριμένη Μελέτη Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς.

Τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα σχεδιάζονται Α/Π μεγάλης κλίμακας με ισχύ άνω των 50MW σε περιοχές με δύσκολη πρόσβαση, σε μεγάλο υψόμετρο μακριά από υπάρχουσες οδικές και ηλεκτρικές υποδομές. Οι αιτίες βρίσκονται στην δυσκολία εξασφάλισης νέων θέσεων με εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό και εγγύτητα σε υπάρχουσες υποδομές λόγω της πληθώρας αιτήσεων Αδ. Παραγωγής, στην αύξηση του μεγέθους των α/γ και της ονομαστικής τους ισχύος αλλά και στον περιορισμό διαθέσιμων χώρων για ανάπτυξη Α/Π λόγω χρήσεων γης αλλά και του Ειδικού Πλαισίου Χωροταξικού Σχεδιασμού για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Συνάμα, η ύπαρξη ισχυρού ανταγωνισμού στην Ελληνική αγορά Αιολικής Ενέργειας και της παρουσίας ισχυρών ενεργειακών Ομίλων (Acciona, Endesa, Enel, Iberdrola, EDF κα) αλλά και εγχώριων κατασκευαστικών Ομίλων

(ΕΛΛΑΚΤΩΡ, ΤΕΡΝΑ) έχει οδηγήσει σε ανάπτυξη έργων μεγάλης κλίμακας που μέρος αυτών βρίσκεται σε περιοχές με μεγάλο υψόμετρο.

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕΓΑΛΟΥ ΥΨΟΜΕΤΡΟΥ

Οι περιοχές με μεγάλο υψόμετρο παρουσιάζουν συχνότερα βροχοπτώσεις, παγετό και πλήττονται από χιονοπτώσεις. Η μέση ετήσια θερμοκρασία τους είναι χαμηλή και παρουσιάζεται μεγάλη εποχική θερμοκρασιακή διακύμανση. Η πυκνότητα του αέρα είναι χαμηλότερη λόγω υψομέτρου. Επίσης, υπάρχουν περιοχές που εμφανίζονται υπερβολικά ισχυροί άνεμοι (κυριότερα ριπές) αλλά και αυξημένη τύρβη λόγω της σύνθετης ορογραφίας αλλά και της βλάστησης που επικρατεί σε μικρότερα υψόμετρα στην ευρύτερη περιοχή. Οι περιοχές με μεγάλο υψόμετρο που αναπτύσσονται Α/Π αφορούν κυρίως υπαλπικά λιβάδια ή οροπέδια στα οποία συναντώνται θαμνώνες και ποολίβαδα. Σε χαμηλότερα υψόμετρα στις περιοχές αυτές συνήθως συναντώνται δάση κωνοφόρων (μαύρη πεύκη, ρόμπολο) και δάση οξιάς. Η πρόσβαση είναι αρκετά δύσκολη (όταν υπάρχουν υφιστάμενοι δρόμοι) και κυρίως πραγματοποιείται χωρίς ειδικό εξοπλισμό και γνώσεις ορειβασίας από το Μαΐο ως τον Οκτώβριο.



Φωτογραφίες 1,2 : Παράδειγμα Α/Π σε μεγάλο υψόμετρο ισχύος 50MW στο όρος Παναχαϊκό, Ν. Αχαΐας.

3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Α/Π ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ

Σύμφωνα με το Ν. 3468/2006 έργα ΑΠΕ που αφορούν σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με εγκατεστημένη ισχύ 30 MWe ή συνολικό προϋπολογισμό άνω των 30 εκ. Euro, χαρακτηρίζονται σαν επενδυτικά σχέδια μεγάλης κλίμακας.

Σύμφωνα με τη περιβαλλοντική νομοθεσία, τα Α/Π ισχύος πάνω από 40MW κατατάσσονται στην κατηγορία Α υποκατηγορία 1, οπότε θεωρούνται ότι είναι πιθανό να προκαλέσουν περιβαλλοντική ζημία και αξιολογούνται από την Ειδική Υπηρεσία Περιβάλλοντος του ΥΠΕΧΩΔΕ (ΕΥΠΕ).

Λόγω της ραγδαίας αύξησης της ονομαστικής ισχύος των α/γ (ήδη έχουν εγκατασταθεί έργα στην Ελλάδα με α/γ ισχύος 3 MW και σχεδιάζονται έργα με χρήση α/γ 5MW), στην Ελληνική Αιολική Κοινότητα ένα έργο θεωρείται μεγάλης κλίμακας όταν είναι ισχύος ίσης ή μεγαλύτερης από 50 MW και διαθέτει δικό του Υποσταθμό (Υ/Σ) ανύψωσης.

4. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

4.1.Τεχνικές προκλήσεις (Προβλήματα – Προτεινόμενες Λύσεις)

4.1.1.Παγετός

Ο παγετός επιδρά καθοριστικά στη λειτουργία ενός Α/Π. Η επικάλυψη πάγου στα μέρη της α/γ αυξάνει τη στατική και δυναμική της καταπόνηση, με αποτέλεσμα οι α/γ αλλά και οι

γραμμές μεταφοράς να υπολογισθούν σε αυξημένα φορτία. Η επικάθιση πάγου πάνω στα πτερύγια μιας α/γ εκτός από το αυξημένο βάρος έχει σαν πιθανή συνέπεια την εκτόξευση τμημάτων πάγου κατά την περιστροφή των πτερυγίων. Όταν εμφανίζεται συχνά παγετός θα πρέπει να υπολογίζεται μείωση στη διαθεσιμότητα. Επιπλέον, ο παγετός προκαλεί δυσλειτουργία ή καταστροφή των μετρητικών οργάνων αλλά και μετέπειτα του ανεμοδείκτη και ανεμομέτρου της α/γ. Η αεροδυναμική συμπεριφορά της πτερωτής της α/γ επιδεινώνεται, λόγω αλλαγής του αεροδυναμικού σχήματος της λόγω των επικαθήσεων πάγου.

Λόγω των παγετών και των χιονοπτώσεων που υπάρχουν στην περιοχή θα πρέπει να σχεδιαστούν οι γραμμές μεταφοράς με προδιαγραφές βαρέως τύπου, να βρεθεί μια χάραξη που να μην αφήνει όσο το δυνατό εκτεθειμένη τη γραμμή μεταφοράς αλλά και θέση του Υ/Σ να είναι προστατευμένη από συγκέντρωση χιονιού. Για τις α/γ ανάλογα με τη παγιοποίηση που παρατηρείται θα πρέπει να μελετηθούν λύσεις βαφής των πτερυγίων με μια ειδική επίστρωση για την αποφυγή επικάθησης χιονιού. Άλλες τεχνικές για θέρμανση των πτερυγίων μέσω αντιστάσεων ή αέρα είναι σε πειραματικό στάδιο.

4.1.2.Υγρασία – βροχοπτώσεις

Η αυξημένη υγρασία και οι συχνές βροχοπτώσεις συμβάλλουν στην εμφάνιση οξείδωσης και διάβρωσης της α/γ. Θετικό είναι ότι με την υγρασία έχουμε αύξηση της πυκνότητας του αέρα και βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης της α/γ, αρκεί να μη φτάνουν στα επίπεδα κορεσμού και σχηματίζονται σταγόνες νερού πάνω στα πτερύγια, οι οποίες όπως και στη περίπτωση της βροχής αλλοιώνουν την αεροδυναμική συμπεριφορά των πτερυγίων.[1]

4.1.3.Υψόμετρο-πυκνότητα

Το υψόμετρο μέσω της επικρατούσας ατμοσφαιρικής πίεσης στη περιοχή του Α/Π επηρεάζει την πυκνότητα του αέρα. Αυτό επιφέρει τη διαφοροποίηση της αποδιδόμενης ισχύος της α/γ. Το μεγάλο υψόμετρο μειώνει την τιμή της πυκνότητας. Αν δεν υπάρχει μέτρηση της θερμοκρασίας και της ατμοσφαιρικής πίεσης τότε η πυκνότητα δίνεται από το παρακάτω εμπειρικό τύπο :

$$\rho = 1.226 \cdot e^{-3.1089 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Height}}$$

Η μοναδική λύση που εφαρμόζεται είναι ο ακριβής υπολογισμός της πυκνότητας για κάθε α/γ μέσω μέτρησης και της θερμοκρασίας, χρησιμοποιώντας ειδικό λογισμικό βελτιστοποίησης σχεδιασμού Α/Π (πχ. EMD WindPro).

4.1.4.Εμφάνιση υπερβολικά ισχυρών ανέμων

Μέσω της μέτρησης του αιολικού δυναμικού στον χώρο του Α/Π, γνωρίζουμε αν εμφανίζονται ριπές αέρα και με χρήση κατάλληλου λογισμικού μπορεί να εκτιμηθεί η μέγιστη ριπή που μπορεί να υπάρξει στη διάρκεια ζωής του Α/Π. Μέσω της επεξεργασίας των δεδομένων μέτρησης εκτιμάται ο τύπος της α/γ που θα πρέπει να εγκατασταθεί στη περιοχή, ώστε να διαθέτει την απαιτούμενη στιβαρότητα και αντοχή σε δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες.

Η λύση που εφαρμόζεται είναι όσο το δυνατό αξιόπιστη μέτρηση για το μέγιστο χρόνο. Μέσω ειδικών λογισμικών (διανομή Gumbel ή Fisher-Tippet) υπολογίζεται η ακραία μέση τιμή δεκαλέπτου 50ετίας στο ύψος της πλήμνης και ανάλογα και με τη μέση ταχύτητα και την ένταση της τύρβης σε ταχύτητα ανέμου 15m/s που υπάρχει επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος α/γ σύμφωνα με το IEC 61400-1.

4.1.5.Θερμοκρασία

Το υψόμετρο και η θερμοκρασία της περιοχής επηρεάζουν την αποδιδόμενη ισχύ της α/γ. Η χαμηλή θερμοκρασία οδηγεί σε αύξηση της πυκνότητας και σε αύξηση της αποδιδόμενης

ισχύος της α/γ. Μέσω μέτρησης της θερμοκρασίας και γνώσης του υψομέτρου υπολογίζεται η πυκνότητα του αέρα από πίνακες ή μέσω του λογισμικού WASP Air density calculator.

4.1.6..Μεγάλη εποχική θερμοκρασιακή διακύμανση

Στις περιοχές αυτές παρατηρείται μεγάλη εποχική διακύμανση της θερμοκρασίας (χειμώνας-καλοκαίρι) που στον ελληνικό χώρο έχουν μετρηθεί από -25C έως +35C σε εγκατεστημένα Α/Π σε μεγάλο υψόμετρο. Αυτή η διακύμανση προξενεί σταδιακή φθορά σε υποσυστήματα της α/γ αλλά και σε ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό.

Η λύση που εφαρμόζεται είναι η χρήση α/γ οι οποίες έχουν εξοπλισμό θέρμανσης/ψύξης κατάλληλου να λειτουργεί με επιτυχία σε αυτό το εύρος θερμοκρασιών.(tropical/arctic).

4.1.7. Χιονοπτώσεις

Οι συχνές χιονοπτώσεις προκαλούν δυσκολία τη πρόσβαση και μειώνουν την αεροδυναμική απόδοση των α/γ. Όταν το χιόνι παγιοποιείται έχουμε τα προβλήματα που περιγράφηκαν παραπάνω. Επίσης το χιόνι μπαίνει εντός της πλήμνης η οποία δεν είναι αεροστεγώς κλειστή και μπορεί να συγκεντρωθεί εντός της προκαλώντας φθορά στον εξοπλισμό ακόμη και να δυσχεραίνει την ομαλή κυκλοφορία του αέρα.[2]

Σε αντίθεση με άλλες χώρες δεν υπάρχει στη χώρα μας κάποια πληροφόρηση μέσω χαρτών παγοποίησης και επισώρευσης χιονιού ώστε να μπορούν να εκτιμηθούν καλύτερα οι ήμερες χιονόπτωσης ή παγετού. Αυτή τη πληροφορία λαμβάνεται μόνο μέσω των μετρήσεων που πραγματοποιούνται στη περιοχή του Α/Π. Οι λύσεις είναι οι ίδιες με αυτές της αντιμετώπισης του παγετού.



Φωτογραφίες 3,4: Α/γ στο Α/Π στο όρος Παναχαϊκό το χειμώνα.

4.1.8. Σύνθετη ορογραφία - Χωροθέτηση

Αρκετές από τις περιοχές με υψηλό υψόμετρο είναι τμήματα οροσειρών και μεγάλων ορεινών όγκων (πχ. Πίνδος, Παναχαϊκό) και το ανάγλυφο τους χαρακτηρίζεται εξαιρετικά σύνθετο σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία. (μεγάλες υψομετρικές διαφορές, έντονες κλίσεις κα). Η μορφή αυτή της τοπογραφίας δυσχεραίνει ακόμη περισσότερο την αξιολόγηση του Αιολικού Δυναμικού και την βέλτιστη χωροθέτηση των α/γ αφού συνήθως εμφανίζονται αυξημένες ταχύτητες λόγω ορογραφίας και τραχύτητας, αλλαγές της κατακόρυφης διακύμανσης της ταχύτητας, ζώνες αποκόλλησης ροής και περιοχές υψηλής τύρβης.

Η χωροθέτηση θα πρέπει να εκτιμά τα παραπάνω φαινόμενα λαμβάνοντας αξιόπιστα μετεωρολογικά δεδομένα από τους μετρητικούς σταθμούς που είναι εγκατεστημένοι εντός του χώρου του Α/Π. Ο υπολογισμός κλίσεων κατά τη χωροθέτηση και η εισαγωγή αναλυτικών τοπογραφικών στοιχείων αλλά και δεδομένων τραχύτητας βελτιώνει την

αξιοπιστία των ενεργειακών μελετών. Παράλληλα, η διόρθωση των αποτελεσμάτων μέσω του δείκτη RIX, και ο έλεγχος τους χρησιμοποιώντας δεδομένα άλλων μετεωρολογικών ιστών συμβάλλει στην ελάττωση της αβεβαιότητας πρόβλεψης.

4.1.9. Απόσταση από υπάρχουσες υποδομές

Οι περιοχές αυτές βρίσκονται κατά βάση μακριά από υπάρχουσες οδικές και ηλεκτρικές υποδομές με αποτέλεσμα να απαιτούνται αυξημένα έργα για τη μεταφορά των α/γ και του λοιπού εξοπλισμού αλλά και την ηλεκτρική διασύνδεση του έργου.

Ο σχεδιασμός των έργων πρόσβασης θα πρέπει να πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τους υπάρχοντες δρόμους μειώνοντας στο δυνατό τις επεμβάσεις που θα πραγματοποιηθούν. Όσο αναφορά τη γραμμή μεταφοράς μέσης τάσης είναι υπόγεια ενώ από τον Υ/Σ ανύψωσης η γραμμή Υψηλής Τάσης θα πρέπει να πληροί τις προδιαγραφές της ΔΕΗ για βαρέως και υπερβαρέως τύπου κατασκευές.

4.1.10. Προσβασιμότητα – Στενότητα χώρου

Όπως προαναφέρθηκε η προσβασιμότητα στις περιοχές αυτές τις περισσότερες φορές είναι περιορισμένη χρονικά αφού αν υπάρχουν δρόμοι που να φθάνουν στη περιοχή ενδιαφέροντος παραμένουν κλειστοί το χειμώνα και χρησιμοποιούνται μόνο τους καλοκαιρινούς μήνες. Να τονιστεί ότι σε πολλές περιπτώσεις σε κορυφογραμμές υπάρχει στενότητα χώρου ακόμη και για την ανέγερση ενός υψηλού ιστού. Αρκετές φορές σχεδιάζονται τα έργα με χρήση μικρής σχετικά α/γ αφού υπάρχουν ανυπέρβλητες δυσκολίες στη μεταφορά των α/γ και κυρίτερα των περυγίων. Τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να κατασκευάζονται Α/Π με αερομεταφορά των περυγίων. Άρα οι δρόμοι που θα χρησιμοποιηθούν (βελτιωμένοι-νέοι) θα χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά των υπολοίπων μικρότερου σε μήκος εξοπλισμού.

Για τη πρόσβαση χρησιμοποιείται το υπάρχον οδικό δίκτυο στη περίοδο της ανάπτυξης του Α/Π και αν είναι δυνατό το χειμώνα για τη συντήρηση των μετεωρολογικών σταθμών χρησιμοποιούνται ειδικά οχήματα με ερπύστριες ή snowmobiles.

4.1.11. Ρίψη πάγων από τις α/γ

Όταν υπάρξει επικάλυψη πάγου στα πτερύγια και η α/γ λειτουργεί ή όταν η α/γ έχει σταματήσει και υπάρχει ή υπήρχε χιονόπτωση, τότε είναι πιθανό να υπάρξει ρίψη τμημάτων πάγου. Η αποκόλληση πάγου μπορεί να προκύψει και όταν η α/γ δεν λειτουργεί.

Σαν περιοχή κινδύνου ρίψης τμήματος πάγου ορίζεται μια απόσταση ίση με 1,5 φορές το άθροισμα του ύψους πλήμνης της διαμέτρου του ρότορα. (255m από μια α/γ V90 με ύψος 80m). [3] Στο σχεδιασμό αυτών των έργων λαμβάνεται και αυτή η παράμετρος για τον σχεδιασμό των δρόμων πρόσβασης. Στο εξωτερικό υπάρχουν ενημερωτικές πινακίδες στην είσοδο παρόμοιων Α/Π και όταν υπάρχουν φαινόμενα παγοποίησης σε α/γ δεν επιτρέπεται η είσοδος επισκεπτών. [4]

4.1.12. Αξιοπιστία μετεωρολογικών μετρήσεων

Το βασικότερο πρόβλημα που απαντάται κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων είναι η δυσλειτουργία και πιθανά η καταστροφή των οργάνων, η απώλεια δεδομένων (χαμηλή διαθεσιμότητα λόγω εμφάνισης παγοποίησης στο μετρητικό εξοπλισμό) και η αυξημένη αβεβαιότητα στην εκτίμηση του Αιολικού δυναμικού. Οι μετρήσεις θα πρέπει να καλύπτουν ένα ικανό χρονικό διάστημα ώστε να εκτιμηθεί η διαχρονική μεταβλητότητα της περιοχής από χρόνο σε χρόνο. [5]

Ενδείκνυται η ταυτόχρονη χρήση θερμαινόμενων και συμβατικών οργάνων. Με τον τρόπο αυτό αποκτούμε μια γενικότερη εικόνα του κλίματος της περιοχής και είναι δυνατόν να

εντοπίσουμε τις χρονικές εκείνες περιόδους κατά τις οποίες αναμένεται να έχουμε προβλήματα λόγω συσσώρευσης πάγου. Μια πολύ καλή πρακτική που μπορεί να ακολουθηθεί είναι η εγκατάσταση ενός μετεωρολογικού ιστού σε κάποιο άλλο σημείο, ενδεχομένως και εκτός του χώρου εγκατάστασης, το οποίο όμως θα είναι προσβάσιμο καθ'όλη τη διάρκεια του έτους, ώστε να εξασφαλίζεται η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη συλλογή δεδομένων. Στη συνέχεια και κυρίως κατά την περίοδο από την άνοιξη μέχρι και φθινόπωρο μπορεί να πραγματοποιηθεί μια σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτού του ιστού με τον ιστό που μας ενδιαφέρει. Εφαρμόζοντας την μέθοδο MCP (Measure-Prediction-Correlation) με έναν ικανοποιητικό βαθμό συσχέτισης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο εφεδρικός αυτός ιστός για την αναπαραγωγή των δεδομένων που θα χαθούν κατά τη διάρκεια του χειμώνα και να επιτευχθεί υψηλότερη διαθεσιμότητα μετρήσεων.

Μέθοδος που αναπτύσσεται ραγδαία και τυγχάνει όλο και μεγαλύτερης αποδοχής, είναι αυτή της παράλληλης χρήσης ενός συμβατικού μετεωρολογικού ιστού και ενός LIDAR. Η διάρκεια των μετρήσεων μπορεί να ξεκινήσει από την περίοδο της άνοιξης όπου και δεν αναμένονται ιδιαίτερα προβλήματα στην λειτουργία των οργάνων. Εκτιμάται ότι μια κοινή περίοδος μετρήσεων περίπου 6 μηνών είναι αρκετή για να αναπαράγουμε χρονοσειρά μεγαλύτερης διάρκειας και να κάνουμε αναγωγή σε μεγαλύτερα ύψη αναφοράς με αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια.

4.1.13. Κεραυνοί

Στις περιοχές αυτές υπάρχει μεγαλύτερη πυκνότητα εμφάνισης κεραυνών λόγω του μεγάλου υψομέτρου. Δεν υπάρχει σύστημα καταγραφής και ενημέρωσης για την πυκνότητα κεραυνών που πλήττουν τον Ελλαδικό χώρο, σε αντίθεση με άλλες χώρες.

Μοναδική λύση στο σχεδιασμό είναι η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας εδάφους σε ενδεικτικές θέσεις α/γ σε συνδυασμό με την εκτέλεση γεωφυσικών διασκοπήσεων με τη χρήση γεωρανταρ για τον έλεγχο καταλληλότητας θεμελίωσης α/γ. Γνωρίζοντας τα παραπάνω στοιχεία μπορεί να σχεδιαστεί κατάλληλη διάταξη γείωσης για την αντιμετώπιση των κεραυνικών πληγμάτων.

4.1.15. Επιλογή κατάλληλου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού

Οι προαναφερθέντες μετεωρολογικές συνθήκες σε συνδυασμό με την χαμηλή πυκνότητα αέρα (άρα και τη χαμηλή διηλεκτρική αντοχή του αέρα), οδηγούν σε σχεδίαση του έργου χρησιμοποιώντας εξοπλισμό ειδικών προδιαγραφών.

Ο κάθε μετασχηματιστής μέσης τάσης (Μ.Τ.) της α/γ είναι στεγασμένος εντός του πυλώνα σε ειδικό χώρο για να είναι προστατευμένος από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Ανά ομάδες οι α/γ θα συνδέονται σε συνεπτυγμένο πίνακα Μ.Τ. Από αυτούς τους πίνακες και πάντα υπόγεια θα υπάρχουν αναχωρήσεις Μέσης Τάσης που θα καταλήγουν στον Υ/Σ Ανύψωσης κλειστού τύπου GIS. Εκεί θα καταλήγει η κύρια γραμμή Μ.Τ. που θα ενώνει τους συνεπτυγμένους πίνακες Μ.Τ. Ο Υ/Σ θα πληρεί όλες τις λειτουργικές προδιαγραφές και κανόνες ασφαλείας του εξοπλισμού της ΔΕΗ/ΔΝΕΜ.

Ο Υ/Σ Ανύψωσης είναι ανεπτυγμένος εξ ολοκλήρου εντός κτηρίου, όπου ο εξοπλισμός πλευράς Υψηλής Τάσης (Υ.Τ.) είναι τύπου μόνωσης αερίου SF₆ (Gas Insulated Substation - GIS).

4.1.16. Ασφάλεια προσωπικού

Για την ασφάλεια του προσωπικού από τις μετεωρολογικές συνθήκες θα πρέπει να έχει προβλεφθεί ένας χώρος στο κτήριο ελέγχου ή/και τον Υ/Σ στον οποίο θα μπορέσουν να διαμείνουν με ασφάλεια σε περίπτωση ανάγκης.

4.2 Αδειοδότηση - Θεσμικά θέματα (Προβλήματα – Λύσεις)

4.2.1. Αδειοδότηση

Τα κυριότερα θέματα στην αδειοδότηση αυτών των έργων τα σχετίζονται με το μεγάλο υψόμετρο αυτών των θέσεων και τη χρήση που είχαν πριν σχεδιαστούν έργα εκμετάλλευσης της Αιολικής Ενέργειας. Τα κυριότερα θέματα είναι:

- Οι εγκαταστάσεις ηλεκτρονικών επικοινωνιών οι οποίες εξυπηρετούν δημόσια και ιδιωτικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, στρατιωτικές επικοινωνίες, ραδιοτηλεοπτικούς σταθμούς.
- Υπάρχουσες στρατιωτικές εγκαταστάσεις (Παρατηρητήρια, ραντάρ) ή θέσεις μονάδων σε περίπτωση πολεμικών επιχειρήσεων.
- Επηρεασμός των διαδικασιών πτήσης αεροδρομίων και των ελαχίστων ορίων πτήσης από τους ορεινούς όγκους.
- Τουριστικές εγκαταστάσεις οι οποίες είναι στην ευρύτερη περιοχή των έργων (χιονοδρομικά κέντρα).

4.2.2. Θεσμικά

- Χρονοβόρες διαδικασίες αδειοδότησης λόγω του γεγονότος ότι εμπλέκονται φορείς από δύο ή περισσότερους νομούς ή Περιφέρειες.
- Λόγω του μεγέθους του έργου περιβαλλοντικά κρίνεται από την ΕΥΠΕ στην οποία παρατηρούνται καθυστερήσεις στην αξιολόγηση του.
- Η Επιτροπή Προώθησης Επενδυτικών Σχεδίων Μεγάλης κλίμακας για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν ΑΠΕ όπως αναφέρεται στο αρ.19 του Ν.3468/2006 δεν έχει συσταθεί μετά από 2,5 χρόνια στερώντας τη προώθηση επενδύσεων μεγάλης κλίμακας για σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ.
- Οι καθυστερήσεις στην υλοποίηση των έργων ενίσχυσης του Εθνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, δυσχεραίνουν την ένταξη μεγάλων Α/Π σε υπάρχουσες ηλεκτρικές υποδομές, προκαλώντας καθυστέρηση στην υλοποίηση τους ή στην οριστική ματαίωση τους.

5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ Α/Π ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ

Το Α/Π ισχύος 315 MW βρίσκεται σε φάση ανάπτυξης στη Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας. Το Α/Π αυτό φέρει όλες τις προαναφερθέντες δυσκολίες της παραγράφου 4.1 εκτός των ισχυρών υπερβολικών ανέμων. Το Α/Π εκτείνεται σε υψόμετρο 1500-2000m asl.

Για τον σχεδιασμό και τη μελέτη του αιολικού δυναμικού χρησιμοποιούνται 8 μετεωρολογικοί σταθμοί με ύψος 10-80μ ύψος με χρήση θερμαινόμενων οργάνων (υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας τους με φ/β και α/γ) αλλά και χρήση ιστού αναφοράς εκτός του υπό σχεδιασμό Α/Π με καλό βαθμό συσχέτισης. Χρησιμοποιείται η μέθοδος MCP και η χωροθέτηση των α/γ έχει ελεγχθεί μέσα ειδικών μοντέλων ανάλυσης του πεδίου ροής του αέρα.

Συντάχτηκαν τοπογραφικά διαγράμματα για το χώρο του Α/Π ενώ πραγματοποιήθηκε παραγωγή ψηφιακού μοντέλου εδάφους για μεγαλύτερη ακρίβεια στην περιγραφή της ορογραφίας. Παράλληλα έγινε χρήση ορθοφωτοχαρτών για την βέλτιστη χωροθέτηση του Α/Π εντός της υπαλπικής ζώνης.

Βρέθηκε κατάλληλη θέση Υ/Σ κλειστού τύπου μέσω έλεγχου αγωγιμότητας του εδάφους, σε θέση που να έχει δυνατή οδική πρόσβαση και να μην συγκεντρώνει ποσότητες χιονιού. Επιπλέον πραγματοποιήθηκαν μελέτες προχάραξης γραμμών Μ.Τ. και Υ.Τ καθώς και η

Προμελέτη οδοποιίας λαμβάνοντας υπόψη τις περιοχές πιθανότητας ρίψης πάγων από τις α/γ. Δειγματοληπτικά έγινε χρήση του γεωραντάρ για τον έλεγχο καταλληλότητας θεμελίωσης των α/γ.

Η πρόσβαση στους μετεωρολογικούς σταθμούς πραγματοποιείται το χειμώνα λόγω της ύπαρξης χιονιού με snowmobile ως ένα σημείο και μετά πεζοπορία.

Οι α/γ με τις οποίες έχει σχεδιαστεί το έργο έχουν έκδοση για ψυχρά κλίματα και οι ως τώρα μετρήσεις δεν καθιστούν αναγκαία την σχεδίαση χρήσης άλλων πρόσθετων μέτρων για την αντιμετώπιση των χαμηλών θερμοκρασιών και του παγετού/χιονιού.

Οι εκτιμήσεις της ενεργειακής παραγωγής συνεκτιμώντας τις απώλειες λόγω επικαθίσεων πάγου στα πτερύγια, μειωμένης διαθεσιμότητας α/γ λόγω καιρικών συνθηκών αλλά και διακοπών στο δίκτυο μεταφοράς καθιστούν το έργο ενεργειακά αποδοτικό.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Από την ανάλυση των δυσκολιών που παρουσιάζει ο σχεδιασμός και η μελέτη Α/Π μεγάλης κλίμακας σε μεγάλο υψόμετρο στην Ελλάδα, επιβεβαιώθηκε η πολυπλοκότητα αυτών των επενδυτικών σχεδίων στο τεχνικό και στο αδειοδοτικό τους επίπεδο. Η γνώση των συνθηκών στις οποίες θα κληθούν να λειτουργήσει το Α/Π είναι καθοριστική για την βέλτιστη σχεδίαση του και την εύρεση κατάλληλων λύσεων για την ομαλή λειτουργία του.

Το κόστος αρχικής επένδυσης αλλά και μετέπειτα της συντήρησης και της λειτουργίας ενός Α/Π που λειτουργεί σε εξαιρετικά δύσκολες καιρικές συνθήκες μπορεί να μειωθεί λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνολογικές λύσεις που υπάρχουν τώρα αλλά και τις λύσεις που βρίσκονται σε ερευνητικό και πειραματικό επίπεδο σήμερα.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι για τη μείωση των χρονοβόρων αδειοδοτικών διαδικασιών, ειδικά για τα Επενδυτικών Σχεδίων Μεγάλης κλίμακας για ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ θα πρέπει να συσταθεί άμεσα η Επιτροπή από το ΥΠΑΝ σύμφωνα με τον 3468/2006 και να επιτελέσει την αποστολή της. Ακόμη προτείνεται, η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) σε συνεργασία με τον ΔΕΣΜΗΕ, μέσω μιας νέας διεύθυνσης, να προχωρήσει στη γρηγορότερη αξιολόγηση των αιτήσεων Αδ. Παραγωγής που αναφέρονται σε έργα μεγάλης κλίμακας.

Τέλος, είναι αναγκαίο να προχωρήσουν τα έργα ανάπτυξης του ηλεκτρικού Συστήματος που έχουν ενταχθεί στην υφιστάμενη ΜΑΣΜ και να υλοποιηθούν εντός των εγκεκριμένων χρονοδιαγραμμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ι.Κ. Καλδέλλης, “Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας”, σελ.310-311, Αθήνα 1999.
2. Lars Talhaug et al, “Wind energy projects in cold climates”,Espoo 02044-VTT σελ.10-11 Φινλανδία 2005.
3. Henry Seifert et al, “Risk Analysis of ice throw from windturbines”,DEWI, 6-11/4/2003, Pyha Finland.
4. www.tauerwind.com, ημέρα αναφοράς 23.11.2008.
- 5.Γ. Μπεργελές “Ανεμοκινητήρες”, σελ 257, Αθήνα 2000.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΣΕ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Κ.Χ. Γκαράκης^{}, Ι.Κ. Καλδέλλης^{**}*

^{*}ΕΛΙΚΑ Α.Ε., Καποδιστρίου 38-40, 15123 Μαρούσι, e-mail: kgarakis@otenet.gr

^{**}Εργ. Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος, ΤΕΙ Πειραιά

Τ.Θ. 41046, 12201 Αθήνα, e-mail: jkald@sealab.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένας από τους παράγοντες που εξετάζονται κατά τη χωροθέτηση ενός Αιολικού Πάρκου (Α/Π) είναι η συνεισφορά του στο επίπεδο θορύβου της περιοχής. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τα αποτελέσματα εφαρμογής τριών από τα κυριότερα μοντέλα υπολογισμού της διάδοσης του θορύβου σε πέντε περιπτώσεις Α/Π που σχεδιάζονται και αναπτύσσονται στην Ελλάδα. Οι περιπτώσεις που μελετούνται καλύπτουν διαφορετικές μορφολογίες γεωγραφικού ανάγλυφου, χωροθέτησης, μεγέθους και χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας ανεμογεννητριών (α/γ). Στόχος είναι να συγκριθούν τα αποτελέσματά τους για κάθε περιοχή μελέτης και να εντοπιστούν οι διαφοροποιήσεις και οι ομοιότητές τους. Τέλος, εξετάζονται τα αίτια των διαφοροποιήσεων σε σχέση με την κάθε περίπτωση, ενώ γίνεται προσπάθεια ομαδοποίησης των αιτιών αυτών και αναζητούνται οι βέλτιστες ρυθμίσεις για ρεαλιστικότερή εφαρμογή των υπολογιστικών εργαλείων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αυξάνουν συνεχώς το μερίδιο συμμετοχής τους στο ενεργειακό μίγμα παγκόσμια αλλά και στην Ελλάδα, δεδομένης της κατανόησης του προβλήματος εξάντλησης των αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων αλλά και της όξυνσης των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Η ηλεκτροπαραγωγή από αιολική ενέργεια είναι σήμερα μια τεχνολογική λύση ώριμη και οικονομικά βιώσιμη [1,2]. Ένας από τους παράγοντες, που εξετάζονται κατά τη χωροθέτηση μεμονωμένων ανεμογεννητριών (α/γ) ή ενός αιολικού πάρκου (Α/Π), είναι η συνεισφορά της εγκατάστασης στο επίπεδο θορύβου της περιοχής. Τα Α/Π θεωρούνται μονάδες χαμηλής ηχητικής όχλησης σε σύγκριση με άλλες βιομηχανικές μονάδες [3], καθώς ο εκπεμπόμενος θόρυβος από μία ανεμογεννήτρια έχει μειωθεί δραστικά τα τελευταία χρόνια. Η μείωση αυτή έχει δώσει τη δυνατότητα σε αρκετές περιπτώσεις (π.χ. Γερμανία, Δανία, Ισπανία) της τοποθέτησης των α/γ κοντά σε οικισμούς και σε αποστάσεις που δεν ξεπερνούν τα διακόσια μέτρα από κατοικίες [4].

Ωστόσο, η εκτίμηση του επιπέδου θορύβου από τη χωροθέτηση ενός Α/Π και η μη υπέρβαση των ανώτατων επιτρεπόμενων από τη νομοθεσία ορίων εκπεμπόμενου θορύβου είναι αναγκαίος όρος για την αδειοδότηση του Α/Π. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί μοντέλα εκτίμησης του παραγόμενου θορύβου από Α/Π και της διάδοσής του στην ευρύτερη περιοχή [5,6]. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής από τρία καθιερωμένα μοντέλα εκτίμησης του παραγόμενου θορύβου μέσω κατάλληλων λογισμικών πακέτων που χρησιμοποιούνται διεθνώς αλλά και στην Ελλάδα. Τα αποτελέσματά τους αποτελούν τμήματα των μελετών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Μέσω αυτών των λογισμικών μελετούνται πέντε διαφορετικές κατηγορίες εφαρμογών αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα, που διαφοροποιούνται μεταξύ τους στον τύπο του ανάγλυφου της περιοχής εγκατάστασης, στη χωροθέτηση και στην τεχνολογία αλλά και στο μέγεθος των

χρησιμοποιούμενων α/γ. Οι συγγραφείς συγκρίνουν τα αποτελέσματα για τις ίδιες περιοχές και γίνεται προσπάθεια εντοπισμού των αιτιών διαφοροποίησης και αναζήτησης των βέλτιστων ρυθμίσεων για τη βελτίωση της αξιοπιστίας των υπολογισμών.

2. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ

Ως θόρυβος ορίζεται ο ήχος ο οποίος είναι κοινωνικά ή κλινικά ανεπιθύμητος, π.χ. οποιοσδήποτε ήχος που ενοχλεί ή διαταράσσει. Η σημαντικότερη παράμετρος για να περιγραφεί το επίπεδο του θορύβου (και γενικότερα ενός ήχου) είναι το μέγεθος της ακουστικής πίεσης που αναπτύσσεται. Η ακουστική πίεση που αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο αυτί κυμαίνεται μεταξύ του κατώφλιου ακουστότητας ($2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$) και του ορίου μόνιμης βλάβης στο αυτί (50 έως 100 N/m^2). Ο λόγος των δύο παραπάνω πιέσεων είναι 1 προς 5,000,000 οπότε για να περιορισθεί το μεγάλο αυτό εύρος χρησιμοποιείται η λογαριθμική κλίμακα μέτρησης. Εξάλλου, το ανθρώπινο αυτί αντιδρά σε αλλαγές της ακουστικής πίεσης μάλλον αναλογικά παρά απόλυτα. Οπότε για τη μέτρηση του ήχου (και επομένως του θορύβου) έχει καθιερωθεί η μονάδα "decibel" (dB). Το επίπεδο ακουστικής πίεσης, SPL (Sound Pressure Level) σε dB, ορίζεται ως το δεκαπλάσιο του δεκαδικού λογάριθμου του λόγου της έντασης του ήχου που εξετάζουμε προς την ένταση ενός ήχου αναφοράς. Η ένταση του ήχου είναι ανάλογη του τετράγωνου της ακουστικής πίεσης που προκαλεί. Οπότε έχουμε:

$$\text{SPL (dB)} = 10 \log\left(\frac{P^2}{P_0^2}\right) = 20 \log\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (1)$$

όπου "P" είναι η ακουστική πίεση του προς μέτρηση ήχου. Ως ακουστική πίεση αναφοράς "P₀" λαμβάνεται η ακουστική πίεση ενός ήχου στο κατώφλι ακουστότητας. Συνεπώς ένας ήχος που μόλις ακούγεται έχει επίπεδο ακουστικής πίεσης (SPL) 0 dB, ενώ το όριο του πόνου αντιστοιχεί σε 120 dB. Ο περιβαλλοντικός θόρυβος ειδικότερα αποτελείται από ήχους διάφορων εντάσεων και συχνοτήτων. Όμως το ανθρώπινο αυτί έχει διαφορετική ευαισθησία στις διάφορες συχνότητες. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι προσομοίωσης του ανθρώπινου αυτιού που δίνουν λιγότερη έμφαση σε κάποιες συχνότητες και περισσότερη σε άλλες. Για τον περιβαλλοντικό θόρυβο χρησιμοποιείται η κλίμακα (A) που δίνει έμφαση στις συχνότητες γύρω στα 2000 Hz. Στη περίπτωση αυτή ο θόρυβος που καταγράφεται εκφράζεται σε dBA ή dB(A). Πρέπει να τονιστεί ότι η κλίμακα dB(A) είναι λογαριθμική και όχι γραμμική.

3. ΘΟΡΥΒΟΣ ΑΠΟ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

Ο παραγόμενος θόρυβος κατά τη λειτουργία ενός αιολικού πάρκου περιλαμβάνει:

- α. Τον αεροδυναμικό θόρυβο προερχόμενο από την περιστροφή των πτερυγίων, τη ροή του ανέμου γύρω από τα πτερύγια και την αλληλεπίδραση του πεδίου τύρβης με το δρομέα.
 - β. Το μηχανικό θόρυβο προερχόμενο από τον πολλαπλασιαστή στροφών της ανεμογεννήτριας, τη γεννήτρια και τα λοιπά ηλεκτρομηχανολογικά μέρη της α/γ.
- Ο μηχανικός και ο αεροδυναμικός θόρυβος διαδίδονται με διαφορετικό τρόπο, οπότε και αντιμετωπίζονται διαφορετικά ανάλογα με την ιδιομορφία της πηγής. Για την εκτίμηση του θορύβου υπολογίζεται η ηχητική μείωση λόγω απόστασης και περίθλασης καθώς και άλλες παράμετροι όπως:

- Ατμοσφαιρική απορρόφηση: Είναι σημαντική για περιπτώσεις αποστάσεων άνω των 100 μέτρων και ηχητικών πηγών που χαρακτηρίζονται από σημαντική ενέργεια στις υψηλές συχνότητες.
- Μετεωρολογικές συνθήκες: Η επίπτωση της διεύθυνσης του ανέμου και της θερμοκρασίας παίζουν σημαντικό ρόλο στη διάχυση του θορύβου.
- Ανακλαστικότητα του εδάφους και η παρουσία εμποδίων: Διάφορα εμπειρικά μοντέλα (π.χ. Delany-Bazley) επιτρέπουν την αξιολόγηση της ηχητικής μείωσης και των

ανακλαστικών χαρακτηριστικών του εδάφους εισάγοντας την παράμετρο «αντίσταση στη ροή», που χαρακτηρίζει την ακουστική συμπεριφορά του εδάφους [7].

Στα πλαίσια αυτά έχει αποδειχθεί διεθνώς ότι, ο θόρυβος που προκαλούν οι ανεμογεννήτριες σε συνθήκες λειτουργίας (ταχύτητες ανέμου $> 4 \text{ m/s}$) στο ανοικτό περιβάλλον, αναμιγνύεται με το θόρυβο του περιβάλλοντος χώρου [3] (θόρυβος ανέμου, θρόισμα φυλλωμάτων των δένδρων κ.λπ.) και -επομένως- μειώνεται η όποια δυσμενής αντίληψη προκαλείται από την πηγή και μόνον, που προκαλεί το θόρυβο. Σε κατάσταση νηνεμίας και σε ταχύτητες ανέμου $< 4 \text{ m/s}$ δεν προκαλείται κανένας θόρυβος, αφού οι ανεμογεννήτριες είναι εκτός λειτουργίας. Αντίθετα, σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου, ο θόρυβος του περιβάλλοντος υπερκαλύπτει κατά κανόνα το θόρυβο των ανεμογεννητριών. Είναι γεγονός ότι οι σύγχρονες α/γ είναι μηχανές πιο ήσυχες, συγκριτικά με τις πρώτες α/γ, ιδιαίτερα αν ληφθεί υπόψιν η σαφώς μεγαλύτερη ισχύς τους. Πράγματι με συνεχείς βελτιώσεις από τους κατασκευαστές οι α/γ γίνονται όλο και πιο αθόρυβες. Η αντιμετώπιση του θορύβου γίνεται είτε στη πηγή είτε στη διαδρομή του. Για παράδειγμα οι μηχανικοί θόρυβοι έχουν ελαχιστοποιηθεί μέσω νέων σχεδιαστικών λύσεων (π.χ. γρανάζια πλάγιας οδόντωσης) ή με εσωτερική ηχομονωτική επένδυση στο κέλυφος της κατασκευής και χρήση ηχομονωτικών πετασμάτων και αντικραδασμικών πελμάτων στήριξης. Αντίστοιχα, ο αεροδυναμικός θόρυβος αντιμετωπίζεται με προσεχτική σχεδίαση των πτερυγίων αλλά και της συνολικής κατασκευής [8,9].

4. ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Στα πλαίσια της Συνδιάσκεψης για την Πρόληψη του Θορύβου (Μάιος 1980) στο Παρίσι, τονίσθηκε ότι το επίπεδο θορύβου στο εσωτερικό των σπιτιών δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 40-45 dB(A) στη διάρκεια της ημέρας, ενώ για τη νύχτα το επίπεδο αυτό καθορίστηκε στα 35 dB(A)) [10]. Για να περιοριστεί ο θόρυβος σε αυτά τα επίπεδα στο εσωτερικό των σπιτιών, θεωρήθηκε ότι η ανώτατη επιτρεπτή στάθμη θορύβου πλησίον της ζώνης κατοικίας δεν πρέπει να ξεπερνά τα 60-65 dB(A) κατά τη διάρκεια της ημέρας και τα 50-55 dB(A) κατά τη διάρκεια της νύχτας. Σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία και συγκεκριμένα το άρθρο 2 του ΠΔ 1180/81 (αν και δεν αφορά ειδικά το θέμα της προστασίας του ακουστικού περιβάλλοντος από ανεμογεννήτριες) στις νομοθετημένες βιομηχανικές ζώνες το ανώτατο επιτρεπτό όριο είναι 70dB(A). Για τις περιοχές με ίσο βιομηχανικό και αστικό χαρακτήρα το όριο είναι 55dB(A), ενώ σε περιοχές που επικρατεί ο αστικός χαρακτήρας το όριο είναι 50dB(A). Για τις εγκαταστάσεις που βρίσκονται σε επαφή με κατοικίες το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο θορύβου είναι 45dB(A) εντός της κατοικίας με ανοιχτές πόρτες και παράθυρα, ανεξάρτητα της περιοχής που βρίσκεται η εγκατάσταση.

Για την περιβαλλοντική αδειοδότηση σε επίπεδο Προκαταρκτικής Περιβαλλοντικής Εκτίμησης και Αξιολόγησης (ΠΠΕΑ) αλλά και Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΕΠΟ) εκτιμάται η επιβάρυνση του ακουστικού περιβάλλοντος και της αύξησης των επιπέδων θορύβου στους γύρω οικισμούς από τη λειτουργία του Α/Π μέσω των αντίστοιχων μελετών. Δεν υπάρχει ειδική νομοθεσία για την προστασία του ακουστικού περιβάλλοντος από τις α/γ αλλά και δεν ορίζονται προδιαγραφές για την ορθή χρήση συγκεκριμένου υπολογιστικού μοντέλου εκτίμησης του παραγόμενου θορύβου (όπως π.χ. στη Δανία, Σουηδία, Γερμανία). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται πλήθος μοντέλων (τα πιο πολλά σχεδιασμένα ειδικά για τη Β. Ευρώπη), τα οποία διαφέρουν πολύ στις δυνατότητες εισαγωγής κατάλληλων παραμέτρων για τον Ελλαδικό χώρο. Τα υπολογιστικά μοντέλα αυτά έχουν διαφορετικό επίπεδο συνθετότητας (κάποια χρονολογούνται από τα μέσα της δεκαετίας του 1980), εισερχομένων δεδομένων, παραδοχών-θεωρήσεων και δεν είναι πάντα εύκολη η συνολική εκτίμηση των αποτελεσμάτων τους. Αξίζει να σημειωθεί ιδιαίτερα, λόγω της πολυτυπίας των χρησιμοποιούμενων υπολογιστικών μοντέλων εκτίμησης του θορύβου από Α/Π, του

νομοθετικού κενού αλλά και της έλλειψης υποδομών στις αρμόδιες περιβαλλοντικές υπηρεσίες, ότι είναι πολύ δύσκολο να αξιολογηθούν οι μελέτες θορύβου, ενώ είναι σχεδόν αδύνατο να εκτιμηθούν οι συνεργιστικές επιπτώσεις στο ακουστικό περιβάλλον μιας περιοχής από τη ταυτόχρονη λειτουργία Α/Π διαφορετικών επενδυτών.

5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ–ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τρία υπολογιστικά μοντέλα διάδοσης του θορύβου από Α/Π μέσω των λογισμικών πακέτων "EMD WindPro: Έκδοση 2.5.7.83-Decibel Module" και του "Resoft Windfarm 4.0-Sound Module" [5,6]. Τα προαναφερθέντα λογισμικά πακέτα χρησιμοποιούνται διεθνώς για τον υπολογισμό του εκπεμπόμενου θορύβου από Α/Π στις ευρύτερες περιοχές εγκατάστασής τους, συνεισφέροντας στη βέλτιστη χωροθέτησή τους. Τα διαθέσιμα λογισμικά πακέτα απαιτούν από το χρήστη να εισάγει τα παρακάτω δεδομένα:

- Χωροθέτηση των νέων α/γ (τύπος και συντεταγμένες) καθώς και των παλαιότερων α/γ στην ευρύτερη περιοχή.
- Ύψος πυλώνα και (πιστοποιημένη) καμπύλη εκπομπής θορύβου της συγκεκριμένης α/γ (LWA_{ref}). Η καμπύλη αυτή δίνεται από τον κατασκευαστή των α/γ.
- Τις περιοχές μελέτης στις οποίες εξετάζεται το επίπεδο του περιβαλλοντικού θορύβου (π.χ. οικισμοί, θέρετρα, μεμονωμένες κατοικίες).
- Τη μέγιστη αποδεκτή στάθμη θορύβου σε dB(A).
- Το υπολογιστικό μοντέλο που επιθυμεί να εφαρμόσει ο μελετητής.

Ακολουθώς, λαμβάνοντας υπόψιν το τοπογραφικό ανάγλυφο, την τραχύτητα της περιοχής, τα πιθανά εμπόδια καθώς και κάποιους συντελεστές που αφορούν τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες, υπολογίζεται η στάθμη θορύβου που δημιουργούν οι α/γ στα όρια των περιοχών μελέτης (π.χ. στην επιφάνεια του εδάφους ή σε κάποιο συγκεκριμένο ύψος) για μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου σε ύψος 10m. Επίσης, αποτυπώνονται σε χάρτες οι καμπύλες σταθερής στάθμης θορύβου, ενώ παρουσιάζεται και αναλυτική αναφορά για κάθε περιοχή ενδιαφέροντος [5,6].

Τα υπολογιστικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής:

- a) Το διεθνές πρότυπο DIN ISO 9613-2 "Attenuation of sound during outdoors, Part 2. A general method of calculation", το οποίο περιγράφει τη διάδοση του θορύβου στην ύπαιθρο. Κατά την εφαρμογή λαμβάνεται υπόψιν η ταχύτητα του ανέμου, η απορρόφηση από το έδαφος μέσω του τοπογραφικού ανάγλυφου της περιοχής, οι μετεωρολογικές συνθήκες μέσω του δείκτη " C_0 ", η ύπαρξη ή μη τονικότητας (καθαρός τόνος καθορισμένης συχνότητας) από την α/γ κ.α. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η στάθμη του εκπεμπόμενου θορύβου σε διάφορα ύψη. Η τελική εξίσωση που εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της στάθμης του θορύβου σε απόσταση από το Α/Π είναι η ακόλουθη [5,6]:

$$L(DW) = LWA_{ref} + K + D_c - (A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc}) - C_{met} \quad (2)$$

όπου:

K	Καθαρός τόνος	A_{gr}	Εξασθένιση λόγω απορρόφησης από το έδαφος
D_c	Διόρθωση κατευθυντικότητας	A_{bar}	Εξασθένιση λόγω εμποδίων
A_{div}	Εξασθένιση λόγω γεωμετρικής απόκλισης	A_{misc}	Εξασθένιση λόγω διαφόρων άλλων φαινομένων
A_{atm}	Εξασθένιση λόγω ατμοσφαιρικής απορρόφησης	C_{met}	Μετεωρολογική διόρθωση

- b) Το Σουηδικό πρότυπο 2002, σύμφωνα με τις οδηγίες με τίτλο "Ljud från Vindkraftverk, Naturvårdsverket 2001, ISBN 91-620-6641-7" για τον υπολογισμό του θορύβου που εκπέμπεται από τις α/γ. Παρέχεται η δυνατότητα εφαρμογών και σε θαλάσσια Α/Π. Το

πρότυπο λαμβάνει υπόψιν του ταχύτητα ανέμου ίση με 8m/s στα 10m ύψος, την απορρόφηση από το έδαφος μέσω της τραχύτητας της περιοχής (μοναδική τιμή) καθώς και την ύπαρξη ή μη τονικότητας από την α/γ. Στα πλαίσια αυτά παρέχεται η δυνατότητα υπολογισμού της στάθμης του εκπεμπομένου θορύβου σε διάφορα ύψη [5,6].

- c) Οι Δανέζικοι κανονισμοί, με τίτλο "Bekendtgørelse om støj fra vindmøller (Statement from the Department of Environment) No. 304 of 14/5/91", οι οποίοι ανανεώθηκαν το 2007 προσθέτοντας και πρόβλεψη για θαλάσσια Α/Π. Στην περίπτωση αυτή λαμβάνεται υπόψιν η ταχύτητα του ανέμου (για ταχύτητες ανέμου 6-8m/s στα 10m), η απορρόφηση από το έδαφος μέσω ενός σταθερού συντελεστή, ο οποίος διαφοροποιείται για χερσαία ή θαλάσσια Α/Π. Τέλος, αν υπάρχει τονικότητα από τη χρησιμοποιούμενη α/γ, επιβάλλεται σχετική προσαύξηση, ενώ παρέχεται η δυνατότητα υπολογισμού της στάθμης του εκπεμπομένου θορύβου σε διάφορα ύψη [5,6].

α/α	Ισχύς Α/Π (MW)	Τύπος α/γ	Ύψος πλήμνης (m)	Διάμετρος ρότορα (m)	Ανάγλυφο περιοχής	Παρατηρήσεις	Αριθμός πλησιέστερων οικισμών
1	0.85	V-52	65	52	Εξαιρετικά σύνθετο	Έντονες κλίσεις	2
2	135	V90-3MW	80	90	Εξαιρετικά σύνθετο	Έντονες κλίσεις-Δύο (2) κορυφογραμμές	4
3	108	V90-3MW	80	90	Ομαλό - Πεδιάδα	Μηδενικές κλίσεις	7
4	18	GE 1.5sle - 1.5MW	80	82,5	Σύνθετο	Μία κορυφογραμμή	5
5	169.2	GE 3.6s - 3.6MW	100	104	Θάλασσα	Χωροθέτηση σε σχήμα πολυγώνου	2

Πίνακας Ι: Τα χαρακτηριστικά των υπό μελέτη Α/Π

Οι παραδοχές της συγκριτικής μελέτης των πέντε αιολικών πάρκων που βρίσκονται υπό σχεδιασμό στην Ελλάδα είναι οι ακόλουθες:

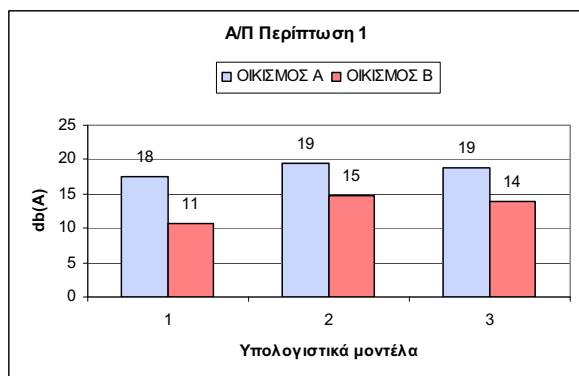
- Μέση ταχύτητα ανέμου στο Α/Π ίση με 8m/s για ύψος 10m
- 24ωρη λειτουργία Α/Π με όλες τις α/γ σε λειτουργία
- Ύψος υπολογισμού της στάθμης του θορύβου 1.5m
- Βήμα υπολογισμού ανά 25m
- Χρήση ψηφιακού μοντέλου εδάφους ανά 20m
- Χρήση καμπυλών εκπεμπομένου θορύβου από τους κατασκευαστές των α/γ
- Καμία α/γ δεν παρουσιάζει τονικότητα.(σύγχρονες κατασκευαστικά α/γ)
- Οι πλησιέστεροι οικισμοί αποτυπώθηκαν σε χάρτες κλίμακας ΓΥΣ 1:50,000.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΡΥΘΜΙΣΗΣ	ISO 9613-2	ΣΟΥΗΔΙΚΟ	ΔΑΝΕΖΙΚΟ
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ	8m/s	8m/s	8m/s
ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΘΟΡΥΒΟΥ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ	NAI	1dB/(m/s)	NAI
ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	Τοπογραφικό ανάγλυφο	Τάξη τραχύτητας	1.5dB(A)/km (ξηρά) 3dB(A)/km(θάλασσα)
ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ (dB)	0-5 (0)	OXI	0
ΥΨΟΣ ΑΠΟΔΕΚΤΗ	1.5m	1.5m	1.5m
ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΑΠΟ ΑΕΡΑ	1.9dB/km	5dB/km	2dB/km

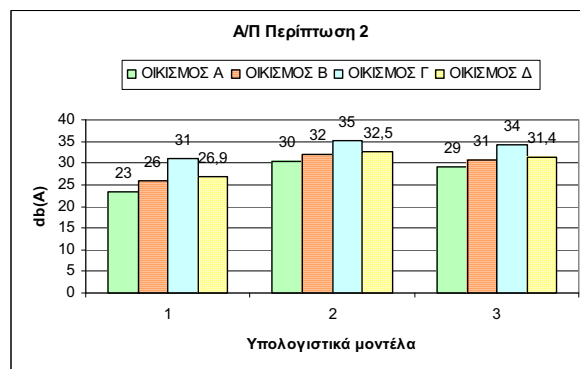
Πίνακας ΙΙ: Ρυθμίσεις παραμέτρων των υπολογιστικών μοντέλων

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

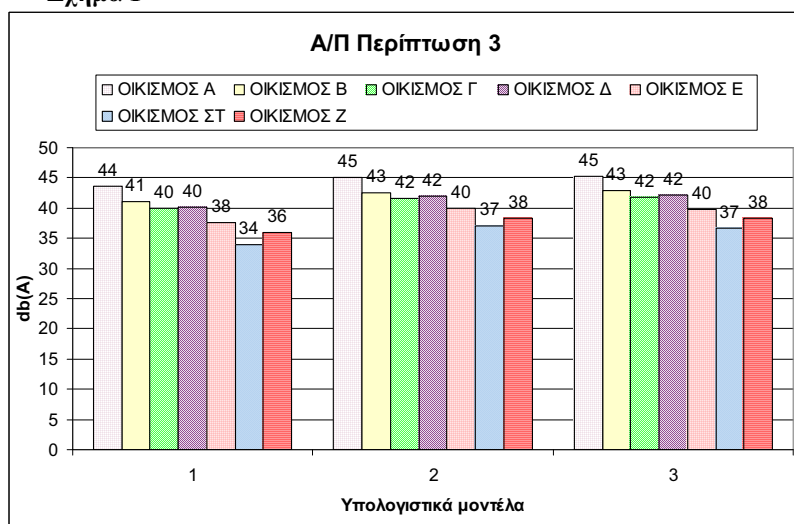
Για κάθε περίπτωση Α/Π (Πίνακας Ι) χρησιμοποιήθηκαν τα τρία υπολογιστικά μοντέλα και κατάλληλοι συντελεστές διόρθωσης ώστε να ανταποκρίνονται οι παραδοχές κατά το δυνατόν καλύτερα στις τοπικές συνθήκες κάθε περιοχής, όσο αυτό ήταν δυνατόν από τις διαθέσιμες επιλογές των λογισμικών. Στα Σχήματα 1 έως 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογιστικών μοντέλων για κάθε περίπτωση Α/Π.



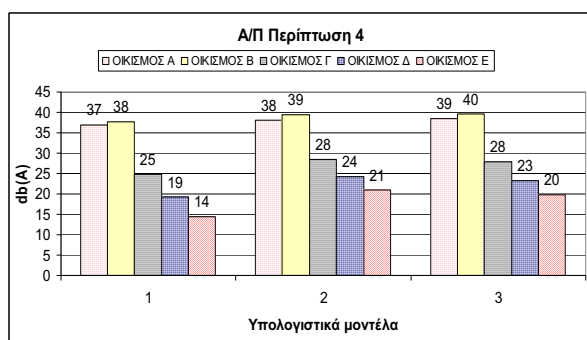
Σχήμα 1



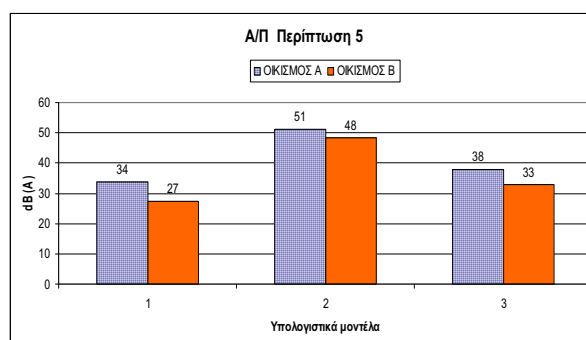
Σχήμα 2



Σχήμα 3



Σχήμα 4



Σχήμα 5

Σχήματα 1-5: Αποτελέσματα υπολογισμών εκπεμπομένου θορύβου.

Στη δεύτερη φάση της ανάλυσης συγκεντρώθηκαν τα αποτελέσματα από τα υπολογιστικά μοντέλα και αναλύθηκαν σε σχέση με τις παραμέτρους ρύθμισης που μπορούσαν να διαφοροποιηθούν από το χρήστη των λογισμικών πακέτων. Στον Πίνακα ΙΙ παρουσιάζονται οι κυριότεροι παράμετροι ρύθμισης του κάθε μοντέλου.

7. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι σε όλες τις υπό εξέταση περιοχές η στάθμη του εκπεμπομένου θορύβου είναι χαμηλότερη των υφιστάμενων ορίων και εν γένει δεν υπερβαίνει τα 45dB(A). Επίσης και τα τρία υπολογιστικά μοντέλα εμφανίζουν την ίδια κατάταξη των παρακείμενων οικισμών για κάθε Α/Π, αναφορικά με την αναμενόμενη στάθμη θορύβου. Επιπλέον, όσο η απόσταση της περιοχής μελέτης από το Α/Π αυξάνει, τόσο αυξάνεται η διαφοροποίηση στις υπολογιζόμενες τιμές του θορύβου, ως αποτέλεσμα των διαφορετικών παραδοχών των υπολογιστικών μοντέλων αναφορικά με την απορρόφηση του θορύβου από τον αέρα και το έδαφος.

Πιο αναλυτικά, στις περιπτώσεις των Α/Π 1 και 2 (περιοχές με σύνθετο ανάγλυφο) η στάθμη του θορύβου δεν ξεπερνά τα 20dB(A) και 35dB(A) αντίστοιχα. Επίσης, διαπιστώνεται ότι το σουηδικό μοντέλο (2) δίνει τη μεγαλύτερη στάθμη θορύβου, ενώ η χαμηλότερη στάθμη προκύπτει από το ISO 9613-2. Οι διαφορές βέβαια είναι μικρές (εντός της ακρίβειας των καμπυλών εκπομπής θορύβου των α/γ, δηλαδή (± 2 dB(A))) και οφείλονται κυρίως στη διαφορετική προσομοίωση της απορρόφησης του θορύβου από τον αέρα και το έδαφος.

Στη περίπτωση του Α/Π 3 (36x3MW-περιοχή με ομαλό ανάγλυφο) διαπιστώνεται ότι το δανέζικο μοντέλο (3) υπολογίζει την υψηλότερη στάθμη, ενώ η χαμηλότερη στάθμη προκύπτει από το ISO 9613-2. Και στην περίπτωση αυτή η στάθμη του εκπεμπομένου θορύβου και για τους επτά (7) παρακείμενους οικισμούς δεν ξεπερνά τα 45dB(A), ενώ οι διαφορές που καταγράφονται είναι μικρές και οφείλονται επίσης στη διαφορετική προσομοίωση της απορρόφησης του θορύβου από τον αέρα και το έδαφος.

Στη περίπτωση του Α/Π 4 διαπιστώνεται ότι το σουηδικό μοντέλο (2) δίνει την υψηλότερη στάθμη (έως 40dB(A)) στους οικισμούς που απέχουν μεγάλες αποστάσεις (Γ, Δ, Ε), ενώ σε κοντινές αποστάσεις (Α, Β) η υψηλότερη στάθμη θορύβου προκύπτει από το δανέζικο μοντέλο (3). Οι διαφορές είναι και πάλι πολύ μικρές. Να σημειωθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις η περιγραφή της τραχύτητας της περιοχής (σουηδικό μοντέλο) με τη χρήση μόνο της κλάσης τραχύτητας δυσχεραίνει την απόδοση της πραγματικότητας και συνεπώς επηρεάζει την ακρίβεια των υπολογισμών.

Τέλος, στη περίπτωση του Α/Π 5 (Θαλάσσιο Α/Π–Nearshore, 47x3.6MW), παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στις εκτιμήσεις των μοντέλων. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι για τον υπολογισμό, σύμφωνα με το ISO 9613-2, επειδή το Α/Π είναι "nearshore" -κοντά σε ακτή, προτιμήθηκε να υπολογιστεί η απορρόφηση του θορύβου από το έδαφος μέσω του τοπογραφικού ανάγλυφου της περιοχής (δηλαδή θάλασσα και έδαφος με υψόμετρο ως 25m), ενώ το σουηδικό (2) και το δανέζικο μοντέλο (3) θεωρούν ότι το έργο είναι "offshore" και το περικλείει θάλασσα σε μεγάλη ακτίνα γύρω του. Σε κάθε περίπτωση βέβαια και παρά το ιδιαίτερα μεγάλο μέγεθος του Α/Π για τα ελληνικά δεδομένα (47 μηχανές των 3.6MW, ≈ 170 MW) το επίπεδο του εκπεμπομένου θορύβου παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα και για τους τρεις τρόπους υπολογισμού.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Συμπερασματικά, η εφαρμογή στον Ελληνικό χώρο υπολογιστικών μοντέλων, που έχουν αναπτυχθεί για χώρες της Β. Ευρώπης, κρίνεται αρκετά δύσκολη. Βάσει της συμβατότητας των αποτελεσμάτων προτείνεται να εφαρμόζεται το ISO 9613-2, το οποίο λαμβάνει υπόψην του τα λεπτομερή γεωγραφικά στοιχεία κάθε περιοχής (τοπογραφικό ανάγλυφο) και εκτιμά τον εκπεμπόμενο θόρυβο σε διάφορα ύψη.

Η μετεωρολογική διόρθωση (μείωση) μέσω του συντελεστή "C_ο" προτείνεται να λαμβάνεται

ιση με μηδέν για τον Ελλαδικό χώρο (συντηρητική πρόβλεψη). Μόνο για περιοχές με μεγάλο υψόμετρο και συχνά καιρικά φαινόμενα ομίχλης-αυξημένων βροχοπτώσεων προτείνεται να λαμβάνει τιμές έως 2dB(A). Για το λόγο αυτό η εμπειρία του χρήστη των λογισμικών πακέτων είναι αναγκαία.

Από τα αποτελέσματα εφαρμογής των τριών υπολογιστικών μοντέλων προκύπτουν συγκρίσιμα αποτελέσματα παρά τη διερεύνηση ποικιλίας περιπτώσεων με σημαντικά διαφορετικό μέγεθος και τοπογραφικό ανάγλυφο, ενώ η χωροθέτηση και των πέντε (5) Α/Π εξασφαλίζει ανεκτά επίπεδα θορύβου στους παρακείμενους οικισμούς.

Τέλος, προτείνεται να δημιουργηθεί νομοθεσία που θα διέπει τις μελέτες εκπεμπόμενου θορύβου, ενώ οι υπηρεσίες περιβάλλοντος να απαιτούν οι μελέτες να πραγματοποιούνται με συγκεκριμένο υπολογιστικό μοντέλο, λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα Α/Π που αναπτύσσονται σε μια ευρύτερη περιοχή ακτίνας 5km. Για τον έλεγχο αξιοπιστίας των υπολογισμών, θεωρείται απαραίτητη η επιτόπια μέτρηση του εκπεμπομένου θορύβου από Α/Π στην Ελλάδα και η σύγκριση των μετρήσεων με τα αποτελέσματα των υπολογιστικών μοντέλων, δραστηριότητα που αποτελεί άμεση συνέχεια της παρούσας εργασίας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Global Wind Energy Council, 2008**, "Global Wind 2007 Report", Available at: <http://www.gwec.net/>, Accessed on 10 June 2008.
2. **Kaldellis J.K., Zervos A., 2002**, "Wind Power: A Sustainable Energy Solution for the World Development", Energy-2002 International Conference, June-2002, Athens, Greece.
3. **Kaldellis J.K., Kavadias K.A., Paliatsos A.G., 2003**, "Environmental Impacts of Wind Energy Applications: Myth or Reality?" *Fresenius Environmental Bulletin*, Vol.12(4), pp.326-337.
4. **Kaldellis J.K., Kavadias K.A., Kaldelli El., Kondili E., 2006**, "Analyzing the Relation between Noise-Visual Impact and the Public Attitude Towards Wind Energy Applications in Greece", International Conference of Protection and Restoration of the Environment VIII, 3-7 July 2006, Chania-Crete, Greece.
5. www.emd.dk/WindPRO/Frontpage, 2008, Εγχειρίδιο Χρήσης "WindPro 2.4-Decibel Module"
6. www.resoft.co.uk/English/index.htm, 2008, Εγχειρίδιο Χρήσης "Windfarm 4.0-Sound Module".
7. **Delany M.E., Bazley E.N., 1970**, "Acoustic Properties of Fibrous Materials", *Applied Acoustics*, Vol. 3, pp.105-116.
8. **Oerlemans S., Sijtsma P., Mendez Lopez B., 2007**, "Location and Quantification of Noise Sources on a Wind Turbine", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 299, pp.869-883.
9. **Fleig O., Iida M., Arakawa C., 2005**, "Blade Tip Flow and Noise Prediction by Large-Eddy Simulation in Horizontal Axis Wind Turbines", *Engineering Turbulence Modelling and Experiments*, Vol.6, pp.689-698.
10. **Wagner S., Bareiß R., Guidati G., 1996**, "Wind Turbine Noise", Berlin/Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΥΡΒΗΣ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΡΟΦΕΙΩΝ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Ν.Σ. Τάχος, Α.Ε. Φιλίος** και Δ.Π. Μάργαρης**

* Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών και Εφαρμογών Αυτής, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 26500 Πάτρα,
E-mail: taxos@mech.upatras.gr and margaris@mech.upatras.gr

** Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών & Στροβιλομηχανών, Τμήμα Εκπαιδευτικών Μηχανολογίας,
Ανώτατη Σχολή Παιδαγωγικής Τεχνολογικής Εκπαίδευσης, Αθήνα,
E-mail: fntulab.aspete@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αεροδυναμική ανάλυση των ανεμοκινητήρων οριζοντίου άξονα μπορεί να πραγματοποιηθεί από απλές θεωρήσεις που στηρίζονται σε ημιεμπειρικές σχέσεις έως σύνθετες προσομοιώσεις του πεδίου ροής με χρήση των μεθοδολογιών της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Στην παρούσα εργασία γίνεται η ανάλυση του εγγύς και απόμακρου πεδίου ροής ενός απομονωμένου πειραματικού στροφείου ανεμοκινητήρα οριζοντίου άξονα. Το εν λόγω στροφείο έχει χρησιμοποιηθεί ως στροφείο αναφοράς στο ερευνητικό πρόγραμμα VISCEL της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Το τρισδιάστατο μόνιμο πεδίο περιγράφεται από τις εξισώσεις RANS οι οποίες συνδυάζονται εναλλακτικά με τέσσερα μοντέλα τύρβης (Spalart-Allmaras, k-ε, k-ε RNG και k-ω SST) με σκοπό την πιστοποίησή τους, με την τελευταία να συνάγεται από την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων του κάθε υπολογισμού με διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις για το επιλεγμένο στροφείο. Το υπολογιστικό χωρίο συγκροτείται από 4.2×10^6 κελιά διαμορφούμενα κατά δομημένο τρόπο και λαμβάνοντας πρόνοια για πυκνώσεις του πλέγματος στις επιφάνειες των πτερυγίων του στροφείου με σκοπό την ακριβέστερη προσέγγιση του οριακού στρώματος. Το πεδίο ροής επιλύεται αριθμητικά για μια συνθήκη λειτουργίας και κατά παραμετρικό τρόπο αναφορικά με τα προαναφερόμενα μοντέλα τύρβης.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ικανότητα λειτουργίας των ανεμοκινητήρων (α-κ) σε υψηλές ταχύτητες ανέμου είναι ένας παράγοντας που συμβάλει στη μεγαλύτερη διείσδυση των ανεμοκινητήρων στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Η μελέτη του πεδίου ροής των ανεμοκινητήρων οριζοντίου άξονα (α-ο-α) γίνεται ως επί το πλείστον με την εφαρμογή ολοκληρωματικών μεθόδων (π.χ. θεωρία στοιχείου πτερυγίου [1]) σε συνδυασμό με ημιεμπειρικές εξισώσεις που συγκροτούν μεθοδολογίες εφαρμογής και οι οποίες όμως αδυνατούν να προσομοιώσουν το μεταβατικό χαρακτήρα της ροής ή φαινόμενα όπως είναι η τρισδιάστατου χαρακτήρα αποκόλληση της ροής από τα πτερύγια του στροφείου [2]. Εναλλακτικά, η αεροδυναμική ανάλυση του στροφείου ενός α-ο-α μπορεί να επιτελεσθεί μέσω των μεθοδολογιών που παρέχει η υπολογιστική ρευστοδυναμική (cfd) και οι οποίες αποσκοπούν στην επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes σε έναν όγκο ελέγχου που περικλείει αυτό [3,4]. Προσομοιώσεις λειτουργίας στροφείων α-ο-α, με χρήση cfd, έχουν πραγματοποιηθεί από πολλούς ερευνητές και η ακρίβεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων πιστοποιείται από τη σύγκριση τους με μετρήσεις σε πρότυπα πειραματικά στροφεία [5,6,7,8]. Όμως, παρά την αναμφισβήτητη υπεροχή της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής στην λεπτομερή και πολλές φορές με ιδιαίτερη ακρίβεια ανάλυση του πεδίου ροής ενός στροφείου α-κ, οι απαιτήσεις που ενέχει σε υπολογιστική ισχύ αποτρέπουν την υιοθέτη-

ση της ως ένα γενικής αποδοχής «εργαλείο» στο σχεδιασμό και την παραμετρική ανάλυση, τόσο για τα γεωμετρικά μεγέθη του στροφείου όσο και των διαφόρων παραδοχών και προτύπων που καθορίζουν την προσέγγιση της πλήρους προσομοίωσης. Αυτή ακριβώς η αδυναμία των μεθόδων cfd, αιτιολογεί την εντατική προσπάθεια πολλών ερευνητικών ομάδων αφενός για την πιστοποίηση της αξιοπιστίας μοντέλων και αφετέρου για τη βελτίωση αυτών ή την ανάπτυξη νέων.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η αριθμητική επίλυση του πεδίου ροής ενός πειραματικού τριπτέρυγου στροφείου α-ο-α του NREL (National Renewable Energy Laboratory). Το πεδίο ροής του στροφείου του α-ο-α περιγράφεται με τις εξισώσεις RANS σε συνδυασμό με ένα από τέσσερα επιλεγμένα μοντέλα τύρβης (μ.τ.) με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης του στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Τα μοντέλα αυτά είναι το μ.τ. k-ε, το μ.τ. k-ε RNG, το μ.τ. k-ω SST και το μ.τ. Spalart-Allmaras. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τον εμπορικό κώδικα Fluent® [9] για σταθερή ταχύτητα του ανέμου και με σταθερή γωνιακή ταχύτητα του στροφείου. Ειδικότερα, διερευνήθηκε το πεδίο ροής του στροφείου εφαρμόζοντας τα προαναφερόμενα μοντέλα τύρβης. Οι συγκρίσεις γίνονται με αποτυπώσεις των ισοταχών της αξονικής ταχύτητας, της γραμμής αποκόλλησης στα πτερύγια του στροφείου και τις κατανομές της πίεσης σε επιλεγμένες θέσεις κατά το εκπέτασμα των πτερυγίων.

2. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ RANS ΚΑΙ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΥΡΒΗΣ

Στη διατύπωση του φυσικο-μαθηματικού προβλήματος για το στροφείο του α-ο-α χρησιμοποιείται το ακόλουθο σύστημα των εξισώσεων RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) [10]

$$\nabla(u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) \quad (2)$$

σε συνδυασμό με ένα από τα ακόλουθα μοντέλα τύρβης που συνοπτικά παρουσιάζονται στη συνέχεια.

2.1 Το μοντέλο k-ε

Στο μοντέλο k-ε, η χρονο-χωρική εξέλιξη της τυρβώδους κινητικής ενέργειας καθώς επίσης η μεταφορά και η διάχυση του ρυθμού εκφυλισμού της τύρβης υπόκεινται στις ακόλουθες εξισώσεις [11]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

όπου $\nu_t = C_\mu (k^2/\varepsilon)$ είναι το κινηματικό ιξώδες δίνης, $\tau_{ij} = 2\nu_t S_{ij} - 2k\delta_{ij}$ είναι οι διατμητικές τάσεις με δ_{ij} να είναι το δέλτα Kronecker και S_{ij} ο ρυθμός παραμόρφωσης. Οι εμπειρικές σταθερές στο μοντέλο k-ε είναι: $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$ και $\sigma_\varepsilon = 1.3$. Λόγω της υπε-

ρεκτίμησης των διατμητικών τάσεων πλησίον του τοιχώματος, στο μοντέλο k-ε, απαιτείται η αντικατάσταση των τιμών k και ε με αυτές που προκύπτουν από αναλυτικές συναρτήσεις.

2.2 Το μοντέλο k-ε RNG

Το μοντέλο k-ε RNG [12] είναι μια παραλλαγή του μοντέλου τύρβης k-ε και αυτό μετά από κατάλληλη τροποποίηση για ροές με αξονοσυμμετρική περιστροφή, διατυπώνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις μεταφοράς:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_k (\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_\varepsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - \left[C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \rho \eta^3 [1 - (\eta/\eta_0)]}{1 + \beta \eta^3} \right] \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

όπου μ_t είναι το δυναμικό ιξώδες δίνης, G_k και G_b είναι η παραγωγή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας λόγω των βαθμίδων της μέσης ταχύτητας και των δυνάμεων άνωσης αντίστοιχα, Y_M είναι όρος που αναφέρεται στη συνεισφορά της συμπίεστικότητας στον ολικό ρυθμό εκφυλισμού της τύρβης, α_k και α_ε είναι οι αριθμοί Prandtl για τα k και ε αντίστοιχα και $\beta = sk/\varepsilon$. Οι εμπειρικές σταθερές του μοντέλου RNG k-ε είναι: $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $C_\mu = 0.0845$, $\eta_0 = 4.38$ και $\beta = 0.012$.

2.3 Το μοντέλο Spalart-Allmaras

Στο μοντέλο Spalart-Allmaras (S-A) [13] με την εισαγωγή του συντελεστή του ιξώδους τύρβης, $\tilde{\nu}$, η εξίσωση μεταφοράς είναι:

$$\frac{D\tilde{\nu}}{Dt} = c_{b1} (1 - f_{t2}) \tilde{S} \tilde{\nu} + \frac{1}{\sigma} \left[\nabla \cdot ((\nu + \tilde{\nu})) \nabla \tilde{\nu} + c_{b2} (\nabla \tilde{\nu})^2 \right] - \left(c_{w1} f_w - \frac{c_{b1}}{\kappa^2} f_{t2} \right) \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + f_{t1} \Delta U^2 \quad (7)$$

όπου ν είναι το κινηματικό ιξώδες που υπολογίζεται από την εξίσωση του Sutherland. Οι επιμέρους όροι στην παραπάνω εξίσωση είναι:

$$\tilde{S} = S + \frac{\tilde{\nu}}{\kappa^2 d^2} \left[1 - (\tilde{\nu}/\nu) \left[1 + \frac{(\tilde{\nu}/\nu)^4}{[(\tilde{\nu}/\nu)^3 + C_{v1}]} \right] \right]^{-1} \quad (8)$$

$$f_w = \frac{\tilde{\nu}}{\tilde{S} \kappa^2 d^2} \left[1 + c_{w2} \left(\left(\frac{\tilde{\nu}}{\tilde{S} \kappa^2 d^2} \right)^5 - 1 \right) \right] (1 + c_{w3}^6)^{1/6} \left\{ \left[1 + c_{w2} \left(\left(\frac{\tilde{\nu}}{\tilde{S} \kappa^2 d^2} \right)^5 - 1 \right) \right]^6 + c_{w3}^6 \right\}^{-1/6} \quad (9)$$

$$f_{t1} = c_{t1} g_t \exp \left[-c_{t2} \frac{\omega_t^2}{\Delta U^2} (d^2 + g_t^2 d_t^2) \right], \quad f_{t2} = c_{t3} \exp \left[-c_{t4} (\tilde{\nu}/\nu)^2 \right] \quad (10)$$

όπου S είναι το μέτρο της στροβιλότητας, d είναι η απόσταση από το τοίχωμα, d_t είναι η απόσταση από το σημείο μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη ροή, ω_t είναι η στροβιλότητα στο σημείο μετάβασης, ΔU είναι το μέτρο της διαφοράς της ταχύτητας στο σημείο μετάβασης από τη ταχύτητα στο σημείο του πεδίου ροής, $g_t = \min(0.1, \Delta U/\omega_t \Delta x_t)$ όπου Δx είναι η απόσταση πάνω στο τοίχωμα των σημείων του πλέγματος, στη θέση της μετάβασης. Οι εμπειρι-

κές σταθερές στο μοντέλο Spalart-Allmaras είναι: $c_{b1}=0.1355$, $\sigma=2/3$, $c_{b2}=0.622$, $\kappa=0.41$, $c_{w1}=3.239$, $c_{w2}=0.3$, $c_{w3}=2$, $c_{v1}=7.1$, $c_{t1}=1$, $c_{t2}=2$, $c_{t3}=1.2$ και $c_{t4}=0.5$.

2.4 Το μοντέλο k- ω SST

Το μοντέλο k- ω SST [14] ουσιαστικά αποτελεί συνδυαστική διατύπωση των μοντέλων k- ϵ και k- ω και δίδεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{D\rho k}{Dt} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (11)$$

$$\frac{D\rho \omega}{Dt} = \frac{\gamma}{v_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho(1-F_1)\sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (12)$$

Η συσχέτιση μεταξύ των ϵ και ω , είναι $\epsilon = \beta^* k \omega$, ενώ οι διατμητικές τάσεις είναι

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (13)$$

Το τυρβώδες κινηματικό ιξώδες είναι $\nu_t = \alpha_1 k / \max(\alpha_1 \omega, \Omega F_2)$, όπου Ω είναι η απόλυτη τιμή της στροβιλότητας, $\alpha_1=0.31$ και η συνάρτηση F_2 είναι

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega} \right) \right] \right\}^2 \quad (14)$$

όπου y είναι η απόσταση από την πλησιέστερη επιφάνεια.

Οι συντελεστές β , γ , σ_k και σ_ω ορίζονται σαν συναρτήσεις των συντελεστών στα μοντέλα k- ω και k- ϵ και οι οποίες είναι

$$\beta = F_1 \beta_1 + (1-F_1) \beta_2, \quad \gamma = F_1 \gamma_1 + (1-F_1) \gamma_2, \quad \sigma_k = F_1 \sigma_{k1} + (1-F_1) \sigma_{k2}, \quad \sigma_\omega = F_1 \sigma_{\omega1} + (1-F_1) \sigma_{\omega2} \quad (15)$$

όπου η συνάρτηση F_1 είναι

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega2}k}{CD_{k\omega}y^2} \right] \right]^4 \right\} \quad (16)$$

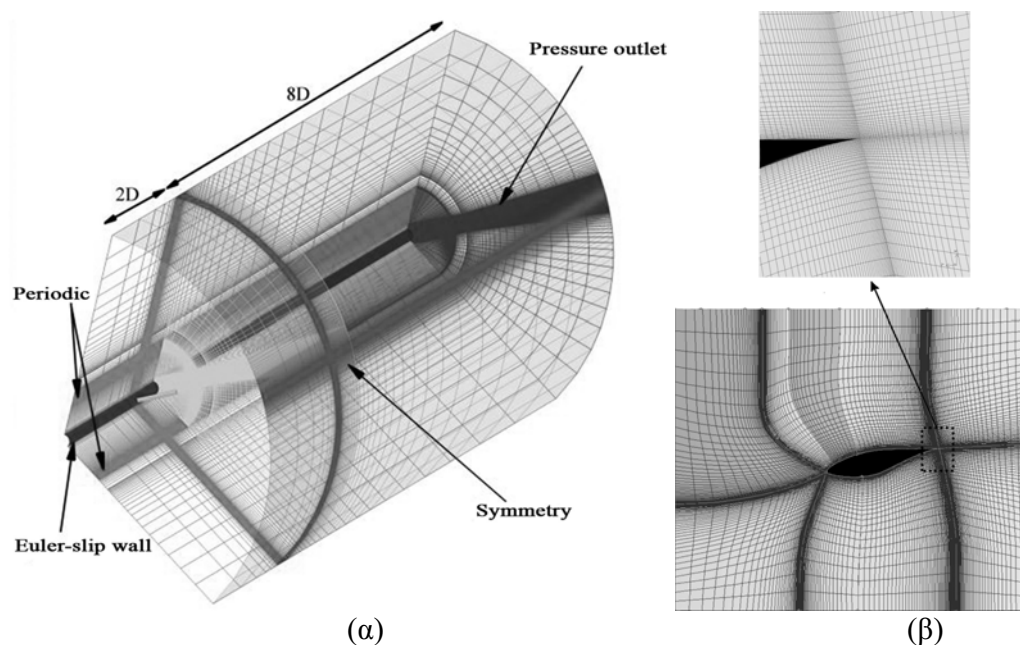
και ο συντελεστής $CD_{k\omega}$ είναι:

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right) \quad (17)$$

Οι εμπειρικές σταθερές στο μοντέλο k- ω SST είναι: $\beta^*=0.09$, $\beta_1=0.075$, $\beta_2=0.0828$, $\gamma_1=0.5532$, $\gamma_2=0.4404$, $\sigma_{k1}=0.85$, $\sigma_{k2}=1.0$, $\sigma_{\omega1}=0.5$ και $\sigma_{\omega2}=0.856$.

3. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Η περίπτωση μελέτης αφορά το πειραματικό στροφείο του NREL που χρησιμοποιήθηκε στη δεύτερη φάση του προγράμματος του με τίτλο «Unsteady Aerodynamics Experiment» [15]. Η επιλογή του εν λόγω στροφείου αιτιολογείται λόγω της απλότητας της γεωμετρίας των πτερυγίων του σε συνδυασμό με τη διαθεσιμότητα πειραματικών μετρήσεων σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου [15]. Η ταχύτητα του ανέμου για τις πειραματικές μετρήσεις που επιλέχθηκαν είναι 7.2 m/s, η πυκνότητα του είναι 0.997 kg/m^3 και ο ονομαστικός αριθμός στροφών του στροφείου είναι 71.68rpm. Το ανωτέρω στροφείο, που βρίσκεται σε κατάντη τοποθέτηση ως προς τον πυλώνα του α-ο-α, έχει ακτίνα 5.029 m και τα τρία πτερύγια του έχουν μηδενική στρέβλωση και σταθερό μήκος χορδής 0.4572 m κατά το εκπέτασμα τους. Από την ακτινική θέση 30% έως το ακροπτερύγιο, χρησιμοποιείται η αεροτομή NREL S809 που έχει λόγο μέγιστου πάχους 20.95% ενώ και για λόγους ομαλής προσαρμογής στην πλήμνη του στροφείου το πάχος των πτερυγίων αυξάνεται γραμμικά έως 43% στην ακτινική θέση 14.4%.



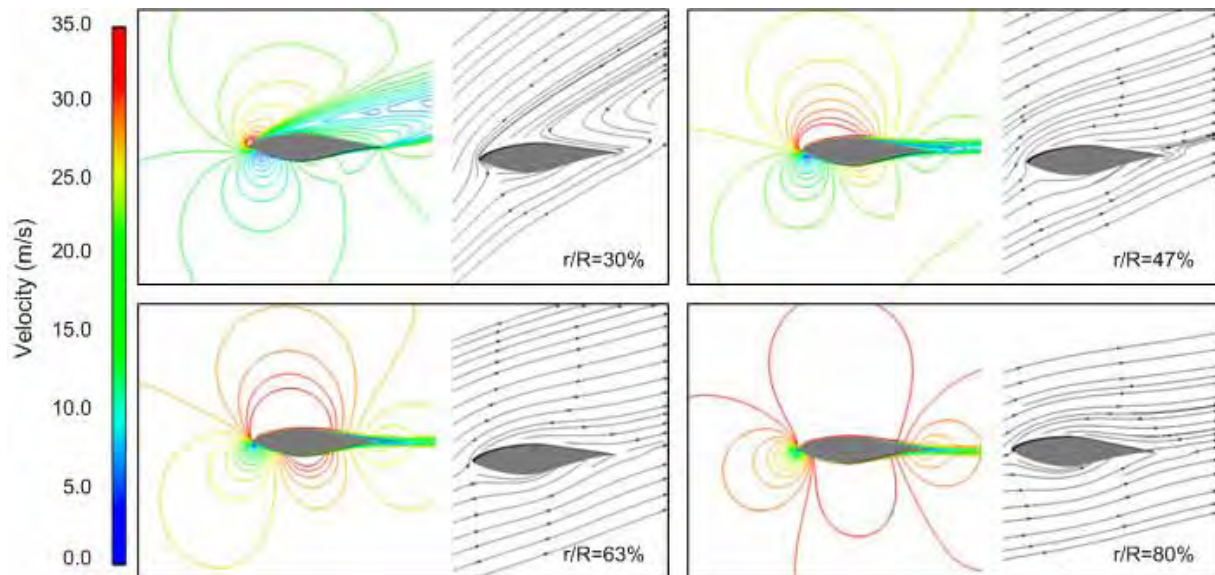
Σχήμα 1: Δόμηση πλέγματος στο υπολογιστικό χωρίο και οριακές συνθήκες.

Για την προσομοίωση του ανωτέρω στροφείου, δεν λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις από το έδαφος και τον πυλώνα του και το υπολογιστικό χωρίο διαμορφώνεται μεταξύ δύο ομόκεντρων κυλινδρικών επιφανειών με την μικρότερη να έχει διάμετρο ίση με τη διάμετρο της πλήμνης και την μεγαλύτερη με διάμετρο εξαπλάσια της διαμέτρου του στροφείου. Το μήκος του υπολογιστικού χωρίου εκτείνεται οκτώ διαμέτρους κατάντη του στροφείου και δύο διαμέτρους ανάντη αυτού. Λόγω της περιοδικότητας του φαινομένου, επιλέγεται η μορφοποίηση δομημένου πλέγματος μόνο γύρω από ένα πτερύγιο του στροφείου κάνοντας χρήση της τεχνικής SRF (Single Reference Frame), όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Το δομημένο πλέγμα στο υπολογιστικό χωρίο διαμορφώθηκε με το λογισμικό Gambit[®] της Fluent[®] [9]. Ο συνολικός αριθμός των εξάεδρων κελιών του πλέγματος είναι περίπου 4.2×10^6 .

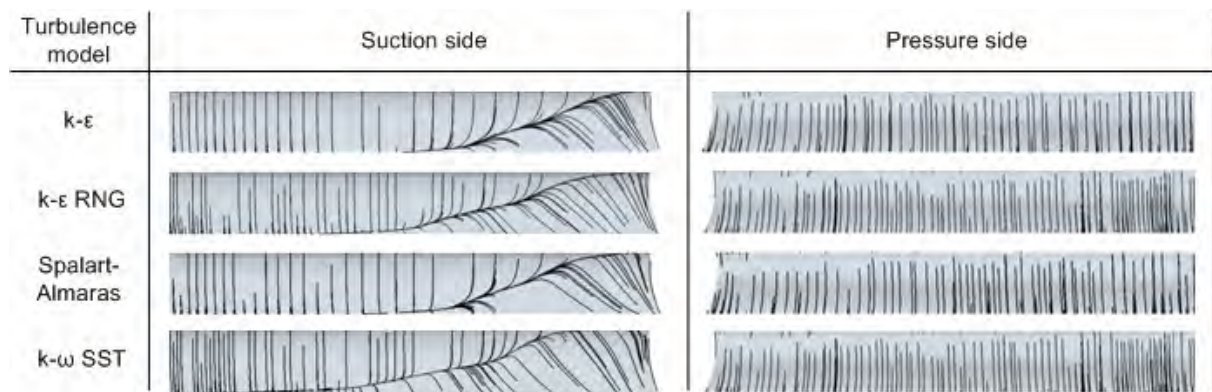
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται διαγράμματα ισοταχών και γραμμών ροής σε τέσσερις σταθμούς κατά το εκπέτασμα του πτερυγίου και εγκάρσια σε αυτό με χρήση του μοντέλου τύρβης

k- ω SST. Παρατηρείται έντονη αποκόλληση της ροής κοντά στη ρίζα του πτερυγίου, φαινόμενο αναμενόμενο εξαιτίας της υψηλής γωνίας προσβολής στη θέση αυτή. Το τελευταίο επιβεβαιώνεται και από το σχήμα 3 όπου απεικονίζονται οι γραμμές ροής στις δυο επιφάνειες του πτερυγίου και για τα τέσσερα μοντέλα τύρβης που χρησιμοποιήθηκαν. Επισημαίνεται ότι με το μ.τ. k- ω SST, η γραμμή αποκόλλησης εκτείνεται μέχρι το μέσο του πτερυγίου περίπου, ενώ με τα μ.τ. k- ϵ , k- ϵ RNG και S-A αυτή εκτείνεται στην ήμισυ περίπου απόσταση.

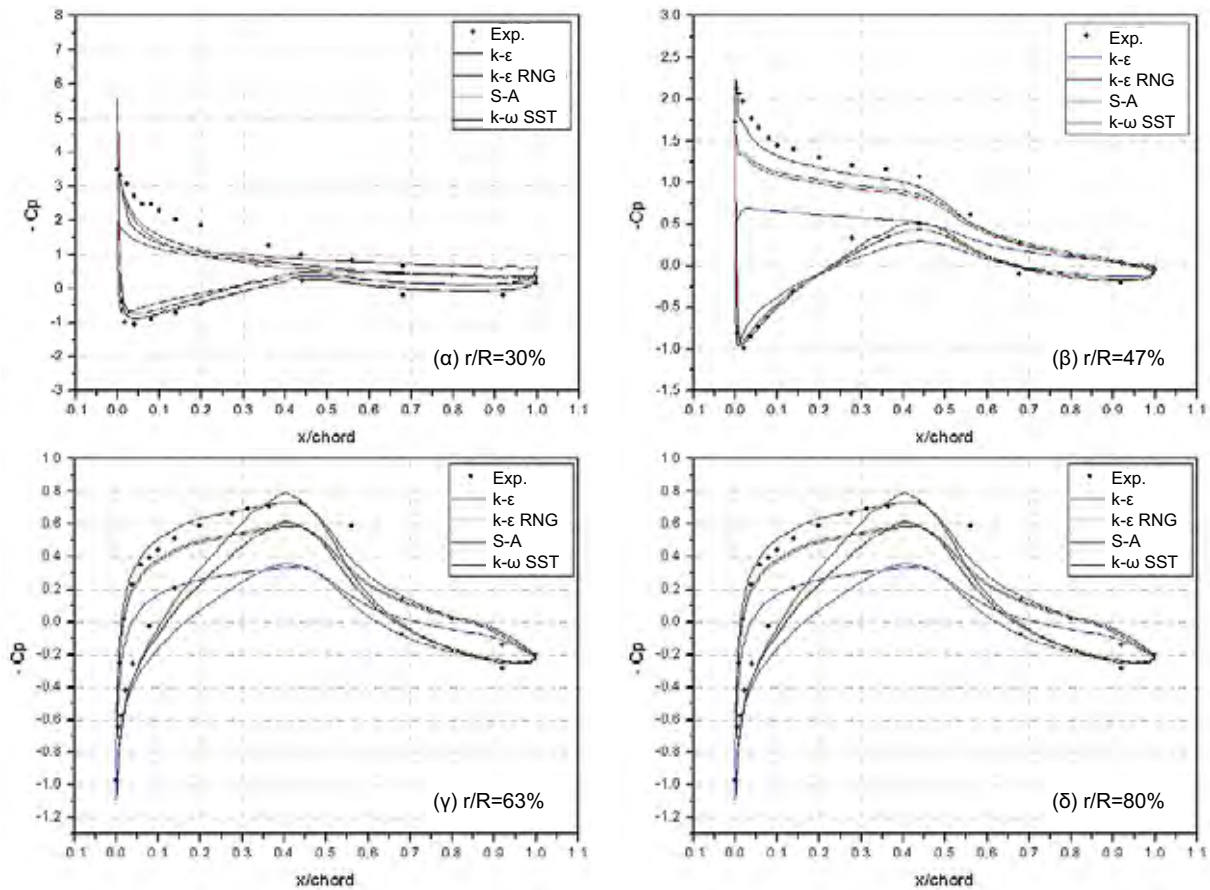


Σχήμα 2: Προσομοίωση ισοταχών και γραμμών ροής σε τέσσερις θέσεις κατά το εκπέτασμα του πτερυγίου με χρήση του μοντέλου τύρβης k- ω SST.

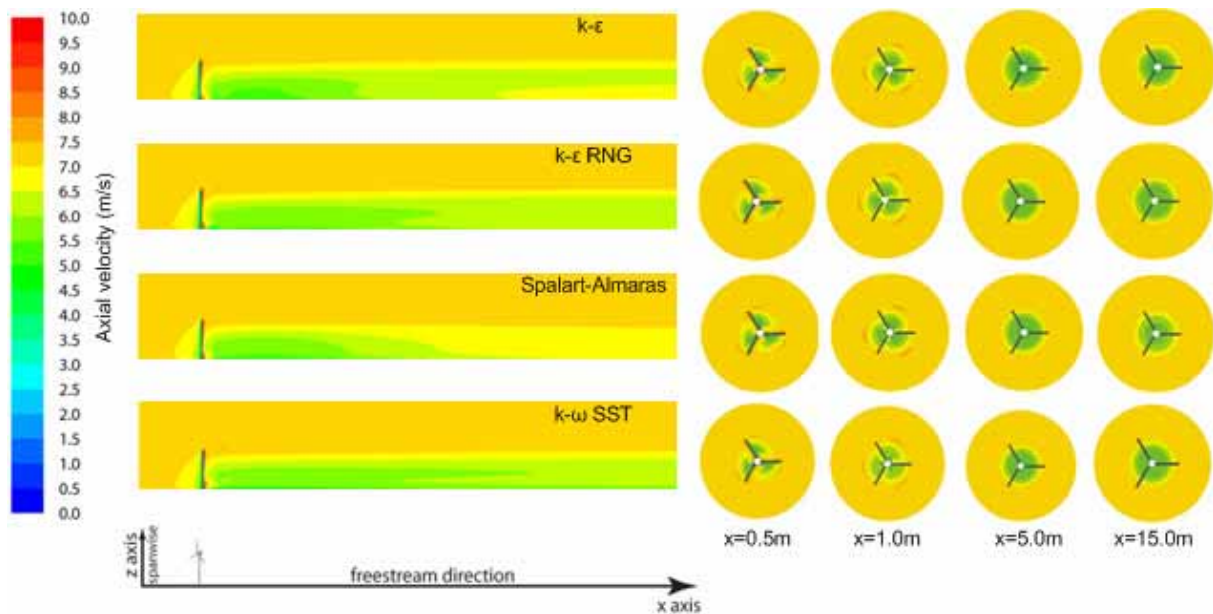


Σχήμα 3: Γραμμές αποκόλλησης (suction side) και οριακές γραμμές ροής (pressure side) στις πλευρές του πτερυγίου για τα τέσσερα μ.τ. που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται στο σχήμα 4 τα διαγράμματα των κατανομών των συντελεστών πίεσης του πτερυγίου για τα τέσσερα επιλεγμένα μοντέλα τύρβης σε σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις. Τα αποτελέσματα του μοντέλου k- ω SST παρουσιάζουν πολύ καλή συμφωνία με εκείνα των πειραματικών εκτός για τη θέση 30% r/R στην οποία παρατηρούνται έντονα φαινόμενα αποκόλλησης της ροής. Σε αντίθεση, τα υπόλοιπα μοντέλα τύρβης δεν παρουσιάζουν καλή συμφωνία και ειδικότερα το μοντέλο Spalart-Allmaras.



Σχήμα 4: Σύγκριση πειραματικών τιμών συντελεστή πίεσης με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με χρήση των τεσσάρων επιλεγέντων μοντέλων τύρβης.



Σχήμα 5: Ισοταχείς αξονικών ταχυτήτων στο πεδίο ροής του πειραματικού ανεμοκινητήρα.

Τέλος, στο σχήμα 5 απεικονίζονται οι ισοταχείς των αξονικών ταχυτήτων για τα επιλεγμένα μοντέλα τύρβης σε αξονικές και εγκάρσιες τομές κατά μήκος του απορρεύματος του στροφείου του α-ο-α. Σε αυτά παρατηρείται η εξέλιξη του απορρεύματος και δημιουργία ακροστροβίλων κοντά στο στροφείο οι οποίοι γρήγορα εξασθενούν.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία προσομοιώνεται το πεδίο ροής του πειραματικού α-ο-α του NREL για μια ταχύτητα ανέμου. Για την προσομοίωση γίνεται η επίλυση των εξισώσεων RANS με τη χρήση τεσσάρων μοντέλων τύρβης επιχειρώντας την αξιολόγησή τους. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με πειραματικά δεδομένα έχοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα. Παρόλα αυτά χρειάζεται περαιτέρω εργασία για την εξακρίβωση της απόκλισης του μοντέλου τύρβης Spalart-Allmaras. Από τα παρόντα αρχικά αποτελέσματα, επιβεβαιώνεται η δυνατότητα ανάλυσης των πεδίων ροής στροφείων α-ο-α με τις εξισώσεις RANS.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Wilson, R.E. and Lissaman, P.B.S. 'Applied aerodynamics of wind power machines', NTIS PB 2385594, Oregon State University, 1974.
2. Robinson, M.C., Hand, M. M., Simms, D.A., and Schreck, S.J., 'Horizontal axis wind turbine aerodynamics: Three-dimensional, unsteady, and separated flow influences', NREL/CP-500-26337. Presented at the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Energy Conference, San Francisco, CA., 1999.
3. Sørensen, N.N. and Hansen, M.O.L. 'Rotor performance predictions using a Navier-Stokes method', ASME Wind Energy Symposium, 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA-98-0025, Reno, NV, 1998.
4. Xu, G. and Sankar, L.N.. 'Computational study of horizontal axis wind turbines', ASME Wind Energy Symposium, 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA-99-0042, Reno, NV, 1999.
5. Duque, E.P.N., Johnson, W., vanDam, C.P., Cortes, R. and Karen Yee, K. 'Numerical predictions of wind turbine power and aerodynamic loads for the NREL phase II combined experiment rotor', AIAA 38th Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, January 10-13, 2000.
6. Sørensen, N.N., Michelsen J.A. and Schreck S., 'Navier-Stokes Predictions of the NREL Phase VI Rotor in the NASA Ames 80ftx120ft Wind Tunnel', Wind Energy, Vol. 5, pp. 151-169, 2002.
7. Chaviaropoulos, P.K., Nikolaou, I.G., Aggelis, K.A., Sørensen, N.N., Johansen J., Hansen, M.O.L., Mac-Gaunaa, T., Hambræus T., Von-Geyr, H.F., Hirsch, Ch., Shun, K., Voutsinas, S.G., Tzabiras, G., Perivolaris, Y. and Dyrmoose, S.Z., 'Viscous and aeroelastic effects on wind turbine blades. The VISCEL Project. Part I: 3D Navier-Stokes rotor simulations', Wind Energy, 2003, Vol. 6(4), pp. 365-385, 2003.
8. Gomez-Iradi, S. and Barakos, G.N., 'Computational fluid dynamics investigation of some wind turbine rotor design parameters', Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, Volume 222, Number 5, pp.455-470, 2008.
9. ANSYS Inc, Product: Fluent, <http://www.fluent.com/>.
10. Tannehill, J.C., Anderson, D.A. and Pletcher, R.H., Computational mechanics and heat transfer. Taylor & Francis Inc., NY, 2nd ed., 1997.
11. Launder, B.E. and Spalding, D.B. 'The numerical computation of turbulent flows, Comput. Methods, Appl.', Mech. Eng, Volume 3, pp. 269-289, 1974.
12. Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangham, S., Gatski, T.B. and Speziale, C.G., 'Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique', Phys. Fluids A, 4, pp. 1510-1520, 1992.
13. Spalart, P.R., and Allmaras, S.R., 'A one-equation turbulence model for aerodynamic flows', La Recherche Aerospatiale, 1994.
14. Menter, F.R., 'Zonal two equation k- ω turbulence models for aerodynamic flows', AIAA 93-2906, Proceeding 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics and Lasers Conference, Orland FL, 1993.
15. Schepers, J.G., Brand, A.J., Bruining, A., Graham, J.M.R., Hand, M.M., Infield, D.G., Madsen, H.A., Paynter, R.J.H. and Simms, D.A. 'Final report of IEA Annex XIV: field rotor aerodynamics', ECN-C-97-027, Energy Research Center of the Netherlands, pp. 1-104, 1997.

ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗ ΜΗΛΟ

Γ. Ρελάκης και Χ. Περάκης

Όμιλος εταιριών ΙΤΑ

Α. Παπανδρέου 150, 165 61 Γλυφάδα, e-mail: chp@ita-sa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το νησί της Μήλου αντιμετώπιζε τα τελευταία χρόνια έντονο το πρόβλημα της λειψυδρίας, με αποτέλεσμα το ελληνικό δημόσιο να επιβαρύνεται κάθε χρόνο με σημαντικά κονδύλια για τη μεταφορά νερού στο νησί με υδροφόρα πλοία από το δίκτυο της ΕΥΔΑΠ στην Αττική. Η λύση δόθηκε με την εγκατάσταση στη Μήλο, από τον Ιούλιο του 2007, μονάδας αφαλάτωσης θαλασσινού νερού αντίστροφης ώσμωσης δυναμικότητας $2.240\text{m}^3/\text{ημέρα}$, της οποίας οι ενεργειακές ανάγκες καλύπτονται πλήρως από ανεμογεννήτρια 600kW , η οποία εγκαταστάθηκε στο νησί γι' αυτό το λόγο. Η ανεμογεννήτρια και η μονάδα αφαλάτωσης αποτελούν ένα ολοκληρωμένο σύστημα, ενώ επικοινωνούν μέσω κεντρικού συστήματος τηλεέγχου τηλεχειρισμού (SCADA), ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη διαχείριση της λειτουργίας τους και να μεγιστοποιείται η απορρόφηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από την Α/Γ. Η μονάδα αφαλάτωσης στη Μήλο καλύπτει πλήρως το σύνολο των αναγκών ύδρευσης του νησιού με πόσιμο νερό υψηλής ποιότητας χρησιμοποιώντας πράσινη ενέργεια. Το πρωτοποριακό αυτό έργο μπορεί να αποτελέσει πιλότο εφαρμογής αντίστοιχων επενδύσεων και για τα υπόλοιπα ελληνικά νησιά.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια το νησί της Μήλου, όπως και άλλα κυκλαδίτικα νησιά, αντιμετώπιζε το πρόβλημα της λειψυδρίας. Προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες ύδρευσης του νησιού γινόταν μεταφορά με υδροφόρα πλοία πόσιμου νερού (περίπου 300.000 m^3 ετησίως) από το δίκτυο της ΕΥΔΑΠ στο Λαύριο Αττικής σε δεξαμενή στο λιμάνι του Αδάμαντα στη Μήλο [1]. Στην ποσότητα αυτή του νερού προσθέτονταν περίπου $170.000\text{ m}^3/\text{yr}$ νερού από δημοτικές γεωτρήσεις στο νησί της Μήλου. Η ποιότητα όμως του νερού των γεωτρήσεων στο νησί λόγω υπαλμύρισης του υδροφόρου ορίζοντα τα τελευταία χρόνια είναι κάκιστη, ενώ το γεγονός ότι αναμιγνύονταν με τις μεταφερόμενες ποσότητες νερού στις δεξαμενές του δικτύου ύδρευσης, καθιστούσε το σύνολο του νερού ύδρευσης ακατάλληλο ακόμα και για την καθημερινή υγιεινή των κατοίκων. Αυτό βέβαια είχε ως αποτέλεσμα την ευρεία κατανάλωση εμφιαλωμένου νερού όχι μόνο για πόση. Στα παραπάνω θα πρέπει να προσθέσει κανείς το πολύ υψηλό κόστος της μεταφοράς νερού από την Αττική στη Μήλο (περίπου 9 €/m^3), το οποίο επωμιζόταν εξολοκλήρου το ελληνικό Δημόσιο μέσω του Υπουργείου Αιγαίου, Ναυτιλίας και Νησιωτικής Πολιτικής [1]. Τέλος, σημαντικό πρόβλημα για την σωστή ύδρευση του νησιού αποτελεί το πεπαλαιωμένο δίκτυο ύδρευσης του Αδάμαντα, το οποίο παρουσιάζει μεγάλες απώλειες (της τάξης του 20-25%), καθώς και το ότι κάποιες περιοχές, όπως τα Πολλώνια, δεν είναι ακόμη συνδεδεμένες στο δίκτυο.

Για τη βέλτιστη περιβαλλοντικά και τεχνικο-οικονομικά επίλυση του έντονου προβλήματος λειψυδρίας που αντιμετώπιζε η Μήλος, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από την ΑΙΟΛΙΚΗ ΜΗΛΟΥ Α.Ε (μέλος του Ομίλου ΙΤΑ Α.Ε), ένα σύνθετο έργο το οποίο λειτουργεί από τον Ιούλιο του 2007 και αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά υποσυστήματα:

1. Μονάδα Αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης για την παραγωγή πόσιμου νερού, δυναμικότητας $2.240\text{ m}^3/\text{d}$.

2. Συστοιχία τεσσάρων κεντρικών δεξαμενών λειτουργίας – τροφοδότησης του δικτύου ύδρευσης του νησιού, συνολικής χωρητικότητας 3.000 m³.
3. Καταθλιπτικό αγωγό μήκους 2.800 m για τη σύνδεση της μονάδας αφαλάτωσης με τις δεξαμενές λειτουργίας.
4. Ανεμογεννήτρια Vestas V-52/850 kW (ρυθμισμένη στα 600 kW)
5. Ηλεκτρονικό Σύστημα Διαχείρισης-Λειτουργίας του σύνθετου Έργου Μονάδα Αφαλάτωσης – Ανεμογεννήτρια με το υπάρχον ηλεκτρικό σύστημα του νησιού.

Πρόκειται για ένα πραγματικά πρωτοποριακό έργο, το πρώτο στην Ελλάδα, το οποίο συμβάλει όχι μόνο στην αυτονομία του νησιού, αλλά και στην ουσιαστική βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων του και την ανάπτυξη του νησιού γενικότερα. Η θέση του έργου σε λειτουργία επιτυγχάνει την πλήρη υποκατάσταση ύδατος που μέχρι πρότινος προέρχονταν από μεταφορά υδροφόρων πλοίων ή από τοπικές γεωτρήσεις, με πόσιμο νερό άριστης ποιότητας.

Η μονάδα της Μήλου έχει σχεδιαστεί ώστε να καλύπτει πλήρως τόσο τις βραχυπρόθεσμες ανάγκες του νησιού σε νερό, καλύπτοντας μάλιστα και τις καλοκαιρινές αιχμές του συστήματος, όσο και τις μακροπρόθεσμες ανάγκες του σε ορίζοντα εικοσαετίας με πρόβλεψη επέκτασής της κατά 1.120 m³/d, με το σκεπτικό των πανομοιότυπων δομικών μονάδων (modular units) που επεκτείνουν τη δυναμικότητα συνδεόμενες μεταξύ τους.

Η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται λόγω της άντλησης και επεξεργασίας του νερού αντισταθμίζεται πλήρως από την ενέργεια που παράγει η ανεμογεννήτρια, με αποτέλεσμα να μην επιβαρύνεται το φυσικό περιβάλλον.

Τέλος, τα κρατικά κονδύλια που θα διέθετε ο Δήμος για την κατασκευή μονάδας αφαλάτωσης, θα διατεθούν για την ανακατασκευή και επέκταση του δικτύου ύδρευσης, ενώ το συμφωνηθέν τίμημα για την αγορά του παραγόμενου νερού ανέρχεται στο 1,8 €/m³.

Ακολουθώντας γίνεται μία πιο αναλυτική παρουσίαση του έργου και των αποτελεσμάτων λειτουργίας του.

2. Η ΜΟΝΑΔΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Για την παραγωγή πόσιμου νερού χρησιμοποιείται θαλασσινό νερό μετά από επεξεργασία και αφαλάτωση και εν συνεχεία εμπλουτισμό. Η μέθοδος αφαλάτωσης που επιλέχθηκε είναι η αντίστροφη ώσμωση (Reverse Osmosis, RO), η οποία βασίζεται κυρίως στην τεχνολογία ειδικών μεμβρανών με εφαρμογή υψηλής πίεσης νερού και χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό και ηλεκτρική ενέργεια [2].

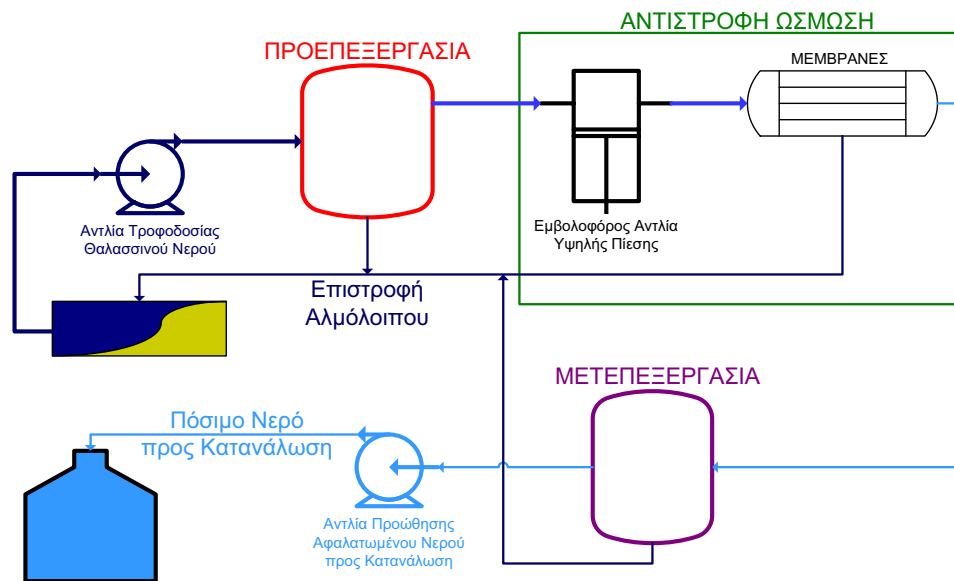
Επιπλέον, ο σχεδιασμός της μονάδας αφαλάτωσης της Μήλου βασίζεται στη χρήση των πλέον αξιόπιστων υλικών, καθώς και της πλέον σύγχρονης τεχνολογίας αντίστροφης ώσμωσης, που επιτρέπει την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και χημικών και έχει ως βασική κατεύθυνση τη βελτιστοποίηση της λειτουργικής αποδοτικότητας και αξιοπιστίας.

Είναι σημαντικό επίσης να τονιστεί ότι σε αντίθεση με άλλες παρόμοιες εφαρμογές αφαλάτωσης, στη μονάδα αφαλάτωσης της Μήλου, χάρη στο σχεδιασμό της και την τεχνολογία αιχμής που χρησιμοποιήθηκε, δεν πραγματοποιείται προχλωρίωση - αποχλωρίωση, δοσομέτρηση θειϊκού οξέος στην είσοδο των μεμβρανών, ούτε στο παραγόμενο νερό και γενικά έχει επιτευχθεί η ελάχιστη δυνατή χρήση χημικών.

Η Μονάδα Αφαλάτωσης αποτελείται από τέσσερα βασικά υποσυστήματα:

- α) το αντλιοστάσιο παροχής θαλασσινού νερού και τους σωλήνες προσαγωγής-απόρριψης,
- β) την προεπεξεργασία θαλασσινού νερού,
- γ) τη διάταξη των μεμβρανών (αντίστροφη ώσμωση),

δ) τη μετεπεξεργασία αφαλατωμένου νερού και τη δεξαμενή γλυκού νερού
Τα ανωτέρω υποσυστήματα αναπαρίστανται σχηματικά και στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 1: Βασικό διάγραμμα ροής της μονάδας αφαλάτωσης.

2.1. Προεπεξεργασία

Το θαλασσινό νερό που αντλείται από τη θάλασσα περνάει αρχικά από μια φάση προεπεξεργασίας με αυτόματα πολυστρωματικά φίλτρα χαλαζιακής άμμου/ανθρακίτη και σακόφιλτρα από πολυπροπυλένιο, για την κατακράτηση ξένων σωμάτων και οργανισμών. Ως χημικό προκατεργασίας χρησιμοποιείται μόνο αντικαθαλωτικό κατάλληλο για χρήση σε μονάδες αφαλάτωσης παραγωγής πόσιμου νερού.

2.2. Αντίστροφη Ωσμωση

Το φιλτραρισμένο νερό οδηγείται εν συνεχεία στις μεμβράνες υψηλής απόρριψης, χαμηλής ενέργειας, οι οποίες τροφοδοτούνται από αντλίες θετικής εκτόπισης, υψηλής απόδοσης κατασκευασμένες από υπερκράματα ανοξειδωτου χάλυβα.

Η μονάδα λειτουργεί σε τέσσερις (4) ημιαυτόνομες συστοιχίες των 560 m³/d, προσδίδοντας έτσι στο σύστημα σημαντική λειτουργική ευελιξία, μεγιστοποιώντας παράλληλα τη διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία της.

Το σημαντικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης τεχνολογίας που την καθιστά σαφώς πιο αποδοτική από οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία αντίστροφης ώσμωσης είναι το πλέον σύγχρονο σύστημα ανάκτησης ενέργειας που βασίζεται στην τεχνική της εναλλαγής πίεσης [3]. Με το πρωτοποριακό αυτό σύστημα ανακτάται το 97% της πίεσης του συμπυκνώματος και μεταφέρεται στο φρέσκο θαλασσινό νερό, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται εντυπωσιακά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, προσφέροντας παράλληλα υψηλή απόδοση και λειτουργική αξιοπιστία, ακόμα και για σημαντικές μεταβολές των παραμέτρων λειτουργίας της μονάδας (αλατότητα, θερμοκρασία θαλασσινού νερού κλπ), καθώς και μειωμένες ανάγκες συντήρησης.

2.3. Μετακατεργασία

Η μετακατεργασία του αφαλατωμένου νερού πραγματοποιείται με φίλτρα δολομιτικού

πετρώματος που επιτρέπει τη ρύθμιση της σκληρότητας και τον έλεγχο του pH χωρίς την ανάγκη δοσομέτρησης θειικού οξέος. Επιπλέον, πραγματοποιείται χλωρίωση του αφαλατωμένου νερού, όπως σε οποιαδήποτε εγκατάσταση ύδρευσης, με χρήση διαλύματος υποχλωριώδους νατρίου και ειδικό σύστημα δοσομέτρησης.

Το απομένον αλμόλοιπο απορρίπτεται στη θάλασσα σε κατάλληλο σημείο (μακράν του σημείου άντλησης), το οποίο επιλέχθηκε βάσει ειδικής μελέτης διάχυσης που εκπονήθηκε.

Η μονάδα είναι φυσικά εξοπλισμένη με όλο τον απαιτούμενο ηλεκτρολογικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό, καθώς και πληθώρα βοηθητικών συστημάτων (αυτόματη έκπλυση μεμβρανών και χημικού καθαρισμού κλπ) και οργάνων ελέγχου σε όλα τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας (τιμές ροών, αγωγιμότητας, pH, πιέσεων, θερμοκρασιών, σήματα alarm κλπ). Επιπλέον παρέχεται εξαιρετικά υψηλό επίπεδο αυτοματισμών και παρακολούθησης του συστήματος βάσει ειδικού προγράμματος που έχει αναπτυχθεί.

Το σύνολο του εξοπλισμού της προκατεργασίας, της αντίστροφης ώσμωσης και της μετεπεξεργασίας είναι εγκατεστημένο σε containers, ομαδοποιημένο σε δύο πλήρως αυτόνομες υπομονάδες των $1.120 \text{ m}^3/\text{d}$. Χωριστά μέρη του συστήματος αποτελούν οι αντλίες αναρρόφησης θαλασσινού νερού, το σημείο απόρριψης του αλμόλοιπου και η δεξαμενή πόσιμου ύδατος (100 m^3) απ' όπου το πόσιμο νερό οδηγείται μέσω αντλιών μεταπροώθησης στην κεντρική συστοιχία δεξαμενών (3.000 m^3) για διοχέτευσή του στο δίκτυο ύδρευσης του Δήμου Μήλου.

3. ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ-ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Πέραν των υποσυστημάτων της Μονάδας Αφαλάτωσης, στα πλαίσια της ολοκληρωμένης σχεδίασης των έργων, εντάσσονται τόσο ο καταθλιπτικός αγωγός, μέσω του οποίου το πόσιμο πλέον νερό οδεύει προς την κατανάλωση, όσο και οι κεντρικές δεξαμενές λειτουργίας - τροφοδότησης για την αποθήκευση του πόσιμου νερού πριν την έγχυσή του στο δίκτυο ύδρευσης του νησιού.

Ο καταθλιπτικός αγωγός, συνολικού μήκους 2.800 m , κατασκευάστηκε από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (3ης γενιάς, σ 0,8-MRS10-PE100) 16 bar με εξ. διάμετρο 220 mm . Οι δεξαμενές είναι κυλινδρικού σχήματος κατασκευασμένες εξωτερικά από γαλβανισμένη λαμαρίνα και εσωτερικά από θερμοπλαστική μεμβράνη EPDM, αποτελούμενη από φύλλα ενισχυμένου EPDM, τα οποία ενώνονται με θερμοκόλληση για τη δημιουργία σάκου. Ο σάκος αυτός είναι τοποθετημένος σε επίπεδο επιφάνειας άμμου ή γεωφάσματος, κατά τρόπο ώστε να παίρνει οιοδήποτε σχήμα, είναι κατάλληλος για αποθήκευση πόσιμου νερού και σε καμία περίπτωση δεν επιτρέπει το νερό να έρθει σε επαφή με τη λαμαρίνα.

4. Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης παράγεται από την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, με την επέκταση του υφιστάμενου Αιολικού Πάρκου της Αιολικής Μήλου Α.Ε στη θέση «Κουτσούνόρραχη» με μία νέα ανεμογεννήτρια Vestas τύπου V-52 850 kW , η οποία όμως είναι ρυθμισμένη στα 600 kW . Ουσιαστικά δηλαδή η ηλεκτρική ενέργεια την οποία καταναλώνει η μονάδα αφαλάτωσης από το δίκτυο, αντισταθμίζεται από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η οποία εγχέεται στο δίκτυο από την ανεμογεννήτρια.

Η συγκεκριμένη Α/Γ είναι οριζόντιου άξονα, τριπτέρυγη, με βελτιστοποιημένο σύστημα ελέγχου της κλίσης των περύγων (opti-tip) και της ολίσθησης της γεννήτριας (opti-speed) και με ενεργό σύστημα προσανατολισμού που στρέφει το δρομέα (rotor) με μέτωπο (ανάντι) στην κατεύθυνση του ανέμου (yaw system) [4].

Ο συγκεκριμένος τύπος ανεμογεννητριών αποτελεί προϊόν του πλέον καταξιωμένου και αξιόπιστου κατασκευαστή παγκοσμίως, της εταιρείας Vestas a/s, με το μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς παγκοσμίως και μεγάλη λειτουργική εμπειρία και στην Ελλάδα, ενώ επιπλέον αποτελεί και τον τύπο Α/Γ που έχει προκρίνει η ίδια η ΔΕΗ ως πιο ενδεδειγμένο για ένταξη σε αυτόνομα νησιωτικά συστήματα (από πλευράς διαταραχών τάσης, αρμονικών κλπ).

Η ανεμογεννήτρια έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε μεγάλο εύρος θερμοκρασίας περιβάλλοντος και έχει υπολογιστεί σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα ώστε να είναι ανθεκτική στις δυσμενέστερες συνθήκες ανέμου (έντασης, τύρβης κλπ), σύμφωνα με την κατηγορία IEC Class IA, ώστε να ανταποκρίνεται στις ιδιαίτερες συνθήκες των ελληνικών νησιών.

5. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΛΕΧΕΙΡΙΣΜΟΥ – ΤΗΛΕ-ΕΛΕΓΧΟΥ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η επένδυση στη Μήλο αποτελεί ένα σύνθετο έργο το οποίο συνδυάζει τη μονάδα αφαλάτωσης με τις δεξαμενές λειτουργίας - τροφοδότησης και την ανεμογεννήτρια. Κάθε υποσύστημα του έργου, δηλαδή η μονάδα αφαλάτωσης και η Α/Γ ελέγχονται μέσω αυτόνομων συστημάτων scada.

Επιπλέον, για το συντονισμό όλων των υποσυστημάτων και την κάλυψη των αναγκών του συστήματος πρόβλεψης και διαχείρισης της μονάδας αφαλάτωσης και της Α/Γ, έχει εγκατασταθεί ένα πρωτοποριακό κεντρικό σύστημα τηλεέγχου - τηλεχειρισμού (MASTER SCADA) που έχει αναπτυχθεί από τον Όμιλο ΙΤΑ, το οποίο έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι σε θέση να αντιμετωπίσει όλες τις ανάγκες πρόβλεψης, λειτουργίας και διαχείρισης της ΜΑ, των Κεντρικών Δεξαμενών λειτουργίας καθώς και της ανεμογεννήτριας και να επιτυγχάνει το βέλτιστο συνδυασμό τους.

Το Master SCADA έχει τον ρόλο του προγνώστη αλλά και του συντονιστή, δηλαδή προβλέπει και δίνει κατάλληλες εντολές στο υποσύστημα της Α/Γ και της αφαλάτωσης ανάλογα με τα εκάστοτε δεδομένα ζήτησης νερού, πληρότητας δεξαμενών, παραγωγής Α/Γ, εντολών διαχείρισης φορτίου από τη ΔΕΗ καθώς και αντίστοιχα ιστορικά στοιχεία περασμένων ετών. Μέσω επεξεργασίας των παραπάνω στοιχείων και σχετικών αλγορίθμων επιλέγεται ουσιαστικά η κατάλληλη φόρτιση της μονάδας αφαλάτωσης ώστε να μεγιστοποιείται η διείσδυση της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο.

Η επικοινωνία των υπομονάδων του συστήματος μεταξύ τους αλλά και η πρόσβαση από απομακρυσμένους χρήστες επιτυγχάνεται με χρήση δορυφορικών επικοινωνιών και τη δημιουργία ιδεατών ιδιωτικών καναλιών επικοινωνίας πάνω από το δημόσιο δίκτυο Internet. Τα ιδεατά δίκτυα έχουν την συμπεριφορά και την έννοια των παραδοσιακών μισθωμένων κυκλωμάτων. Η πρωτοπορία των ιδεατών δικτύων με τη χρήση των κατάλληλων VPN - Firewall είναι ότι μπορούν να δημιουργηθούν από σημείο σε σημείο ή από σημείο σε πολλαπλά σημεία. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, υπάρχουν και οι δύο διατάξεις ιδεατών δικτύων. Η πρώτη διάταξη, σημείο σε σημείο, αφορά στην επικοινωνία μεταξύ του συστήματος της Α/Γ και της αφαλάτωσης, ενώ η δεύτερη διάταξη, από σημείο σε πολλαπλά σημεία, αφορά στην επικοινωνία με τους περιφερειακούς χρήστες.

Δίνεται έτσι η δυνατότητα, βασικές πληροφορίες λειτουργίας όλων των συστημάτων των έργων να παρουσιάζονται σε πραγματικό χρόνο μέσω δυναμικών διαγραμμάτων και πινάκων σε απομακρυσμένους χρήστες του MASTER SCADA, όπως το κέντρο ελέγχου της εταιρείας, το Δημαρχείο του νησιού, περιφερειακοί Η.Υ. των συντηρητών κλπ. Στη Μήλο έχουν άλλωστε εγκατασταθεί οθόνες σε επίκαιρα σημεία του νησιού, όπως στο Δημαρχείο και στο λιμάνι άφιξης των πλοίων, όπου παρουσιάζονται βασικές πληροφορίες από τη λειτουργία όλων των συστημάτων του έργου όπως η συνολική και η τρέχουσα παραγωγή της μονάδας αφαλάτωσης και της Α/Γ, η στάθμη των δεξαμενών, η κατάσταση των μονάδων κλπ.

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η μονάδα αφαλάτωσης λειτουργεί από τον Ιούλιο του 2007 και από τότε μέχρι το Δεκέμβριο του 2008 είχε διοχετεύσει στο δίκτυο ύδρευσης του Δήμου Μήλου 314.000 m³ πόσιμου νερού.

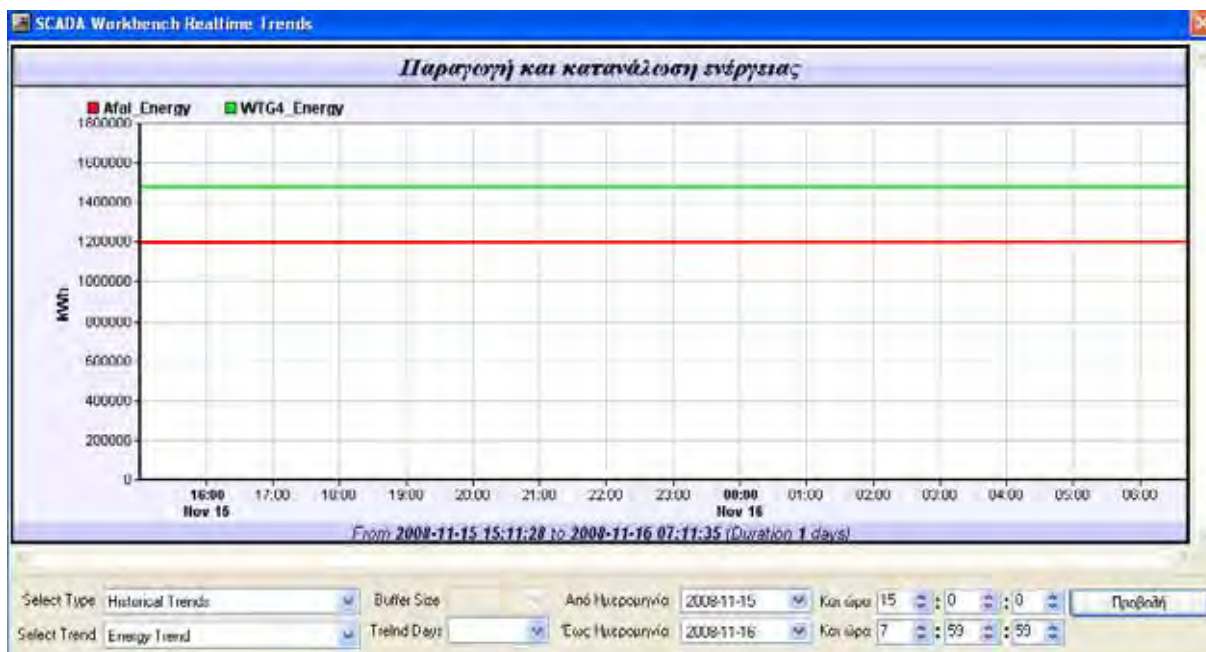
Η ποιότητα του παραγόμενου πόσιμου ύδατος είναι σύμφωνη με τις προδιαγραφές του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας, τις σχετικές οδηγίες της Ε.Ε. και τις προδιαγραφές του ελληνικού κράτους. Ειδικότερα το παραγόμενο νερό έχει τα ακόλουθα εγγυημένα χαρακτηριστικά:

- TDS: max 500 mg/L
- pH: 7,5 – 9,5 (ρυθμιζόμενο)
- Εντός των προδιαγραφών πόσιμου νερού σύμφωνα με τις παραμετρικές τιμές που θέτει η νέα οδηγία 98/83/EK, ΚΥΑ Υ2/2600/2001, ΦΕΚ 892/11.7.2001, «Ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης».

Τόσο η αγωγιμότητα όσο και το pH του παραγόμενου νερού ελέγχονται σε πραγματικό χρόνο από όργανα που είναι εγκατεστημένα στη μονάδα αφαλάτωσης. Επιπρόσθετα, πραγματοποιούνται τακτικές δειγματοληψίες νερού και τα δείγματα αποστέλλονται για χημικές και μικροβιολογικές αναλύσεις. Ενδεικτικές μετρήσεις φαίνονται στον κάτωθι πίνακα:

Πίνακας 1: Φυσικοχημική ανάλυση πόσιμου νερού αφαλάτωσης (ημ/νία δειγματοληψίας 15.04.08)		
Μέτρηση	Πόσιμο νερό αφαλάτωσης	Ανώτατη παραδεκτή τιμή
pH	9,3	≥6,5 και ≤9,5
Αγωγιμότητα (μS/cm) 25°C	445	-
Σκληρότητα (°dH)	1,1	-
Ανθρακικά HCO ₃ ⁻ (ppm)	36,6	-
Χλωρίοντα Cl ⁻ (ppm)	99,4	250
Θειικά SO ₄ ²⁻ (ppm)	1,76	250
Νιτρικά NO ₃ ⁻ (ppm)	0,88	50
Νιτρώδη NO ₂ ⁻ (ppm)	0,00	0,50
Αμμωνιακά NH ₄ ⁺ (ppm)	0,00	0,5
Ολ. Σίδηρος Fe (ppm)	0,00	-
Πυριτικά SiO ₂ (ppm)	0,00	-
Φωσφορικά PO ₄ ³⁻ (ppm)	0,00	5

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού δεν υπερέβη σε αυτό το χρονικό διάστημα τις 2,5 kWh ανά κυβικό μέτρο παραγόμενου πόσιμου νερού, ενώ συμπεριλαμβανομένης της άντλησης του θαλασσινού νερού, η ειδική κατανάλωση δεν υπερέβη τις 3,25 kWh/m³. Συνολικά, από την έναρξη λειτουργίας του έργου, για την αφαλάτωση και τη μεταπροώθηση του παραγόμενου νερού μέχρι τις δεξαμενές λειτουργίας-τροφοδότησης έχουν καταναλωθεί περίπου 1.250.000 kWh, ενέργεια που έχει υπερκαλυφθεί από τις περίπου 1.500.000 kWh που έχει παράγει η Α/Γ στο ίδιο χρονικό διάστημα.



Εικόνα 2: Στιγμιότυπο από την παρακολούθηση της ενεργειακής κατανάλωσης της μονάδας αφαλάτωσης μέσω του MASTER SCADA.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας θα θέλαμε να αναφερθούμε επιγραμματικά στα οφέλη που προέκυψαν από τη λειτουργία του υβριδικού έργου της αφαλάτωσης με αιολική ενέργεια, τα κυριότερα από τα οποία είναι τα ακόλουθα:

- άμεση και οριστική αντιμετώπιση προβλήματος λειψυδρίας της Μήλου με το βέλτιστο τεχνικά και περιβαλλοντικά τρόπο
- άριστη ποιότητα παραγόμενου νερού
- εφαρμογή της πλέον προηγμένης και αξιόπιστης τεχνολογίας
- εντυπωσιακά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη χάρη στο σχεδιασμό του συστήματος και στη χρήση ΑΠΕ για την κάλυψη των αναγκών της μονάδας
- υψηλή διαθεσιμότητα και αξιοπιστία
- πολλαπλά οικονομικά και κοινωνικά οφέλη:
 - μείωση κόστους προμήθειας νερού για το ελληνικό δημόσιο κατά 80%
 - μείωση δαπανών για άντληση και για χρήση εμφιαλωμένου νερού
 - ορθολογικότερη χρήση υδάτινων αποθεμάτων
 - απαλλαγή από προβλήματα συντήρησης οικιακών συσκευών (λόγω της κακής ποιότητας του νερού των γεωτρήσεων)
 - αποδέσμευση κονδυλίων για τη βελτίωση και επέκταση του δικτύου ύδρευσης του νησιού.

8. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το εν λόγω έργο επιδοτήθηκε από το μέτρο 6.3 του ΕΠΑΝ «Ειδικές ενεργειακές υποδομές για τα νησιά και για την προώθηση των ΑΠΕ» κατά 45%. Ο εγκεκριμένος τελικός προϋπολογισμός του Έργου (Μονάδα Αφαλάτωσης, Ανεμογεννήτρια, Δεξαμενές, Καταθλιπτικός Αγωγός και SCADA) ήταν €3.464.585.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Υπουργείο εμπορικής ναυτιλίας, Αιγαίου & νησιωτικής πολιτικής, Γενική γραμματεία Αιγαίου και νησιωτικής πολιτικής, Διεύθυνση γενικών υποθέσεων, διεθνών και ευρωπαϊκών θεμάτων, Τμήμα γενικών υποθέσεων
2. Yfantis N.D. et al, Design and Operation of a Reverse Osmosis Desalination Plant of high efficiency and friendly to the environment, Proceedings of 2nd Conference on Small and Decentralized water and wastewater treatment plants, Skiathos, 2-4 May 2008.
3. Stover R.L, 2007, Seawater reverse osmosis with isobaric energy recovery devices Desalination 203 : 168–175.
4. Jenkins, N., Walker, J.F., Wind Energy Technology, John Wiley and Sons, 1997, ISBN 0-471-96044-6

ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ - ΥΔΡΟΪΣΧΥΣ

ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΤΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΑ ΧΑΝΙΑ ΚΡΗΤΗΣ

Γιάννης Βουρδουμπάς, Κώστας Μαλακός, Ιωάννα Σπανουδάκη

ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ - ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

E-mail: gboyrd@tee.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αφαλάτωση του θαλάσσιου νερού επιτυγχάνεται σήμερα σε μεγάλη κλίμακα με τη χρήση των τεχνολογιών μεμβρανών, που είναι ιδιαίτερα ενεργειοβόρες τεχνολογίες. Η χρήση της ηλιακής ενέργειας για την αφαλάτωση του νερού έχει μελετηθεί αρκετά, ιδιαίτερα σε χώρες με έντονη ηλιοφάνεια, χωρίς να υπάρχουν αξιόλογες εμπορικές εφαρμογές σήμερα σε μεγάλη κλίμακα. Η πρόσφατη κρίση στις τιμές των ορυκτών καυσίμων και οι προοπτικές για σημαντικές αυξήσεις των τιμών του πετρελαίου και του φυσικού αερίου στο σύντομο μέλλον σε συνδυασμό με τα περιβαλλοντικά προβλήματα που σχετίζονται με τη χρήση των ορυκτών καυσίμων, κάνουν ελκυστική την περαιτέρω διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης της ηλιακής ενέργειας για την αφαλάτωση του νερού. Η παρούσα εργασία αφορά τη κατασκευή και τη διερεύνηση της λειτουργίας ενός μικρού συστήματος ηλιακής αφαλάτωσης νερού (ηλιακό αποστακτήρα) του θερινούς μήνες στα Χανιά Κρήτης (35ο 31' N).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλιακή ενέργεια βρίσκει σήμερα πολλές εφαρμογές στη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού, λόγω της εξαντλησιμότητας των ορυκτών καυσίμων και της όξυνσης των περιβαλλοντικών προβλημάτων που συνεπάγεται η χρήση τους. Μεταξύ των εφαρμογών της ηλιακής ενέργειας, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη ηλιοφάνεια είναι και η αφαλάτωση νερού, που αποτελεί μια εναλλακτική μέθοδο της αφαλάτωσης με τεχνολογίες μεμβρανών. Η χρήση της ηλιακής ενέργειας παρουσιάζει το πλεονέκτημα της μη χρησιμοποίησης συμβατικών καυσίμων, ενώ όμως απαιτεί μεγάλη έκταση γης για τους ηλιακούς συλλέκτες παραγωγής θερμότητας, σε αντιδιαστολή της αφαλάτωσης με μεμβράνες που απαιτεί σημαντική κατανάλωση ηλεκτρισμού,. Αρκετοί ηλιακοί αποστακτήρες είναι εγκατεστημένοι σε πολλά μέρη του κόσμου όπου βρίσκουν διάφορες εφαρμογές , χωρίς όμως να έχει προωθηθεί η χρήση τους σε ευρεία εμπορική κλίμακα. Η ηλιακή αφαλάτωση νερού δεν έχει βρει εκτετεμένες εφαρμογές στην Ελλάδα ακόμη, ενώ δεν υπάρχουν στη Κρήτη εφαρμογές πιλοτικής κλίμακας κάποιου μεγέθους. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός ηλιακού αποστακτήρα είναι:

- α) Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία
- β) Η αρχική ποσότητα άλμης στον αποστακτήρα
- γ) Η γεωμετρία και η κατασκευή του αποστακτήρα.

Η παραγωγικότητα του αποστακτήρα σε συνδυασμό με το κόστος κατασκευής του, καθορίζουν την οικονομική βιωσιμότητα του, καθώς αυτοί αποτελούν ηλιακά παθητικά συστήματα. Η ενεργειακή απόδοση των συστημάτων αυτών κυμαίνεται μεταξύ 20-40% και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Η πειραματική διάταξη του ηλιακού αποστακτήρα που χρησιμοποιήθηκε στα Χανιά Κρήτης φαίνεται στο παρατιθέμενο σχήμα 1.

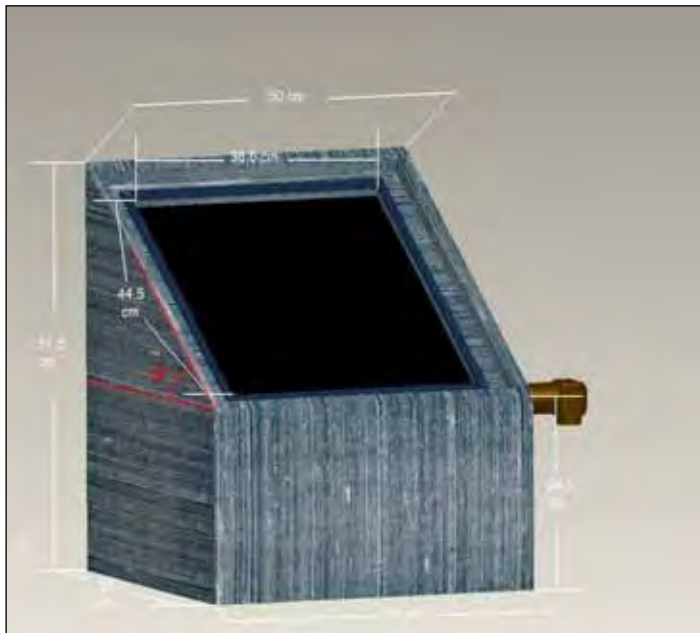
Στη κατασκευασθείσα συσκευή :

Σχήμα 1. Σκαρίφημα ηλιακού αποστακτήρα.

- Η μέγιστη χωρητικότητα του νερού είναι 61,25 lt, το εμβαδόν της γυάλινης επιφάνειας είναι 0,17 m² και η κλίση της γυάλινης επιφάνειας σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο είναι 35°.

- Το εσωτερικό δοχείο του αποστακτήρα αποτελείται από μεταλλικά φύλλα τα οποία έχουν βαφεί με μαύρο χρώμα για την όσο το δυνατό καλύτερη απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας. Η εξωτερική επιφάνεια του αποστακτήρα αποτελείται από ξύλο με ενδιάμεση παρεμβολή μονωτικού υλικού.

- Περιμετρικά της ωφέλιμης κεκλιμένης επιφάνειας για την εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια



βρίσκονται τοποθετημένα εύκαμπτα λάστιχα με τα οποία έρχεται σε επαφή το γυάλινο κάλυμμα για την αποφυγή διαρροής υδρατμών κατά τη λειτουργία του αποστακτήρα.

- Στην βάση της κατασκευής υπάρχει στρόφιγγα για την απομάκρυνση της άλμης στο τέλος της ημέρας. Επίσης, υπάρχει και ο σωλήνας που είναι τοποθετημένος στο ανώτερο σημείο του δοχείου συλλογής της άλμης στον οποίο οδηγείται το αφρατωμένο νερό από την γυάλινη επιφάνεια και συλλέγεται σε ένα ογκομετρικό κύλινδρο. Κατά τη λειτουργία του αποστακτήρα, το νερό αφού εξατμισθεί έρχεται σε επαφή με τη κεκλιμένη γυάλινη επιφάνεια και υγροποιείται. Στη συνέχεια κατερχόμενο στο κατώτερο σημείο της, συλλέγεται σε ένα ανοιχτό κανάλι και εξέρχεται από το θάλαμο απόσταξης.

Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων μετρήθηκαν :

- Η ηλιακή ακτινοβολία
- Η θερμοκρασία του νερού εντός του αποστακτήρα
- Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος
- Το pH και η αγωγιμότητα του αλμυρού και του γλυκού νερού
- Η αρχική ποσότητα του νερού μέσα στον αποστακτήρα
- Η ποσότητα του αφρατωμένου νερού που παραγόταν.

Στα διαγράμματα 3.3 και 3.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων για πέντε διαφορετικούς αρχικούς όγκους νερού στον ηλιακό αποστακτήρα.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

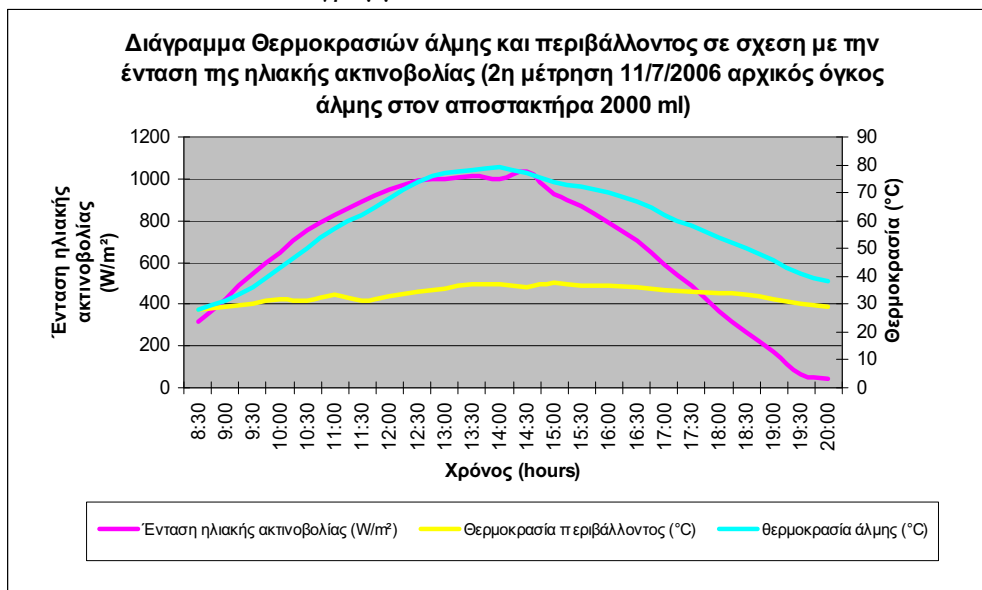
Στα διαγράμματα που ακολουθούν [3.1, 3.2, 3.4, 3.5] παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της λειτουργίας του ηλιακού αποστακτήρα στις 11-7-2007, με αρχικό όγκο νερού στη συσκευή 2000 ml, και τα οποία είναι αντιπροσωπευτικά των ληφθέντων πειραματικών μετρήσεων.

Πειράματα έγιναν στις 10-7-07, 11-7-07, 12-7-07, 15-7-07, 2-7-07, 4-7-07, 13-7-07, 6-7-07, 14-7-07, 16-7-07. Η διάρκεια των ημερήσιων πειραμάτων ήταν από τις 8.30 π.μ έως 20.00 μ.μ., ενώ ο αρχικός όγκος του διαλύματος στον αποστακτήρα κυμαινόταν από 1,5 λτ έως 8 λτ, και συγκεκριμένα 1,5 λτ, 2 λτ, 4 λτ, 6 λτ και 8 λτ. Για κάθε αρχικό όγκο διαλύματος στον ηλιακό αποστακτήρα έγιναν 2 σειρές μετρήσεων.

Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν στις 11-7-2008 και είναι αντιπροσωπευτικά των ληφθέντων πειραματικών μετρήσεων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

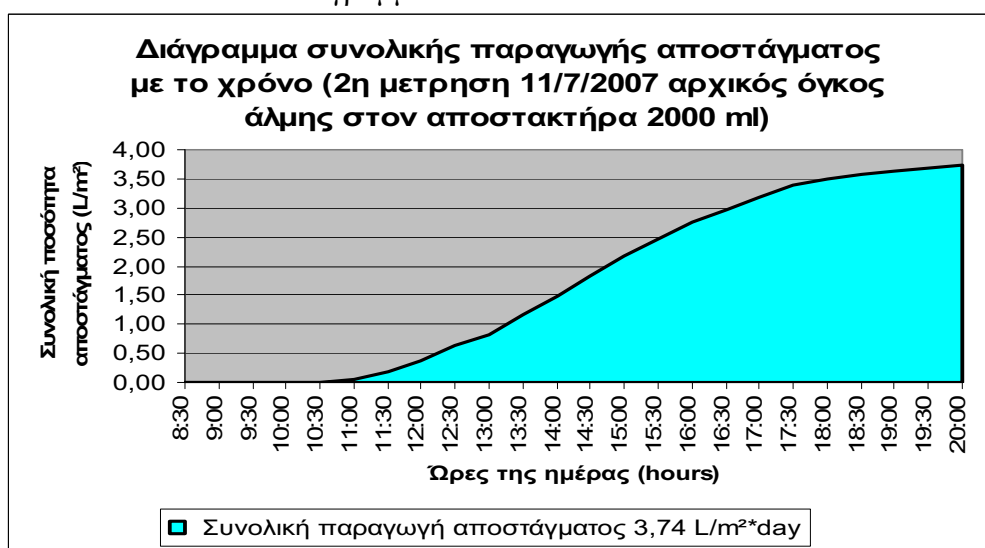
Στο διάγραμμα 3.1 παρουσιάζεται η θερμοκρασία του νερού, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει του χρόνου.

Διάγραμμα 3.1



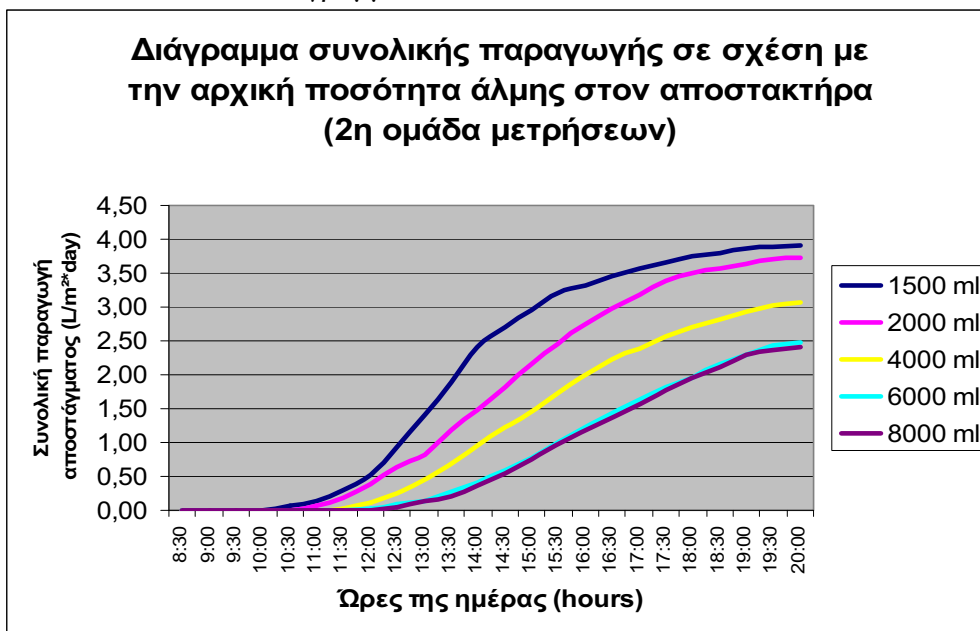
Στο διάγραμμα 3.2 παρουσιάζεται η παραγωγή αφαλατωμένου νερού συναρτήσει του χρόνου.

Διάγραμμα 3.2



Στο διάγραμμα 3.3 παρουσιάζεται η παραγωγή αφαλατωμένου νερού συναρτήσει του χρόνου για διαφορετική αρχική ποσότητα διαλύματος στον αποστακτήρα.

Διάγραμμα 3.3



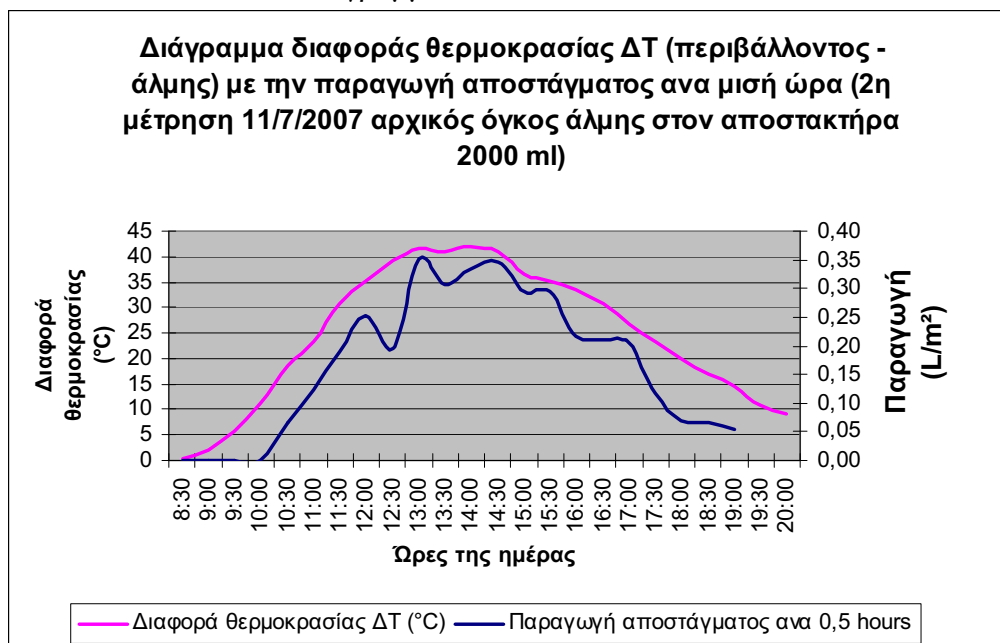
Στο διάγραμμα 3.4 παρουσιάζεται η παραγωγικότητα του ηλιακού αποστακτήρα συναρτήσει του χρόνου.

Διάγραμμα 3.4



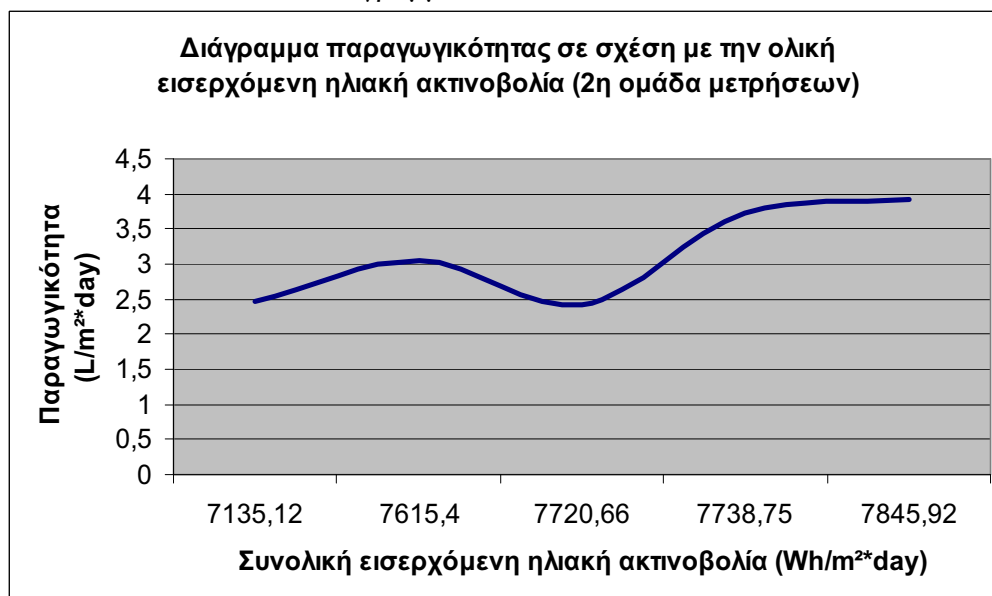
Στο διάγραμμα 3.5 παρουσιάζεται η διαφορά θερμοκρασίας (διαλύματος– περιβάλλοντος) και η παραγωγή αποστάγματος συναρτήσει του χρόνου.

Διάγραμμα 3.5



Στο διάγραμμα 3.6 παρουσιάζεται η απόδοση του ηλιακού αποστακτήρα συναρτήσει της συνολικά προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας.

Διάγραμμα 3.6



Η συνολικά προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια προκύπτει από το άθροισμα της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει κάθε μισή ώρα στον αποστακτήρα.

Τέλος, η αρχική αγωγιμότητα και το pH του διαλύματος ήταν 66,5 mS και 8,15 αντίστοιχα, ενώ του αποστάγματος 162 μ S και 6,3 αντίστοιχα.

4. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διαφορά των θερμοκρασιών περιβάλλοντος και διαλύματος κατά τη διάρκεια της ημέρας έφτανε μέχρι και τους 40 °C. Η έναρξη της απόσταξης του νερού άρχιζε περίπου 2,5 ώρες μετά την έναρξη του πειράματος και όταν η θερμοκρασία του διαλύματος ήταν ανώτερη των 60 °C. Η αρχικά προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια χρησίμευε για την αύξηση της θερμοκρασίας του διαλύματος.

Η ποσότητα του λαμβανομένου αποστάγματος κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κυμαινόταν από 2,5 έως 4 lt /m² . ημέρα. Η υψηλότερη παραγωγικότητα του αποστακτήρα επιτυγχανόταν κατά τις ώρες 13.00 – 15.30, όταν η διαφορά θερμοκρασίας διαλύματος και περιβάλλοντος λάμβανε τις μεγαλύτερες τιμές. Η εκατοστιαία ενεργειακή απόδοση [(Απαιτούμενη ενέργεια για την εξάτμιση του νερού)/(Συνολικά προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια στον αποστακτήρα)] του ηλιακού αποστακτήρα κυμαινόταν από 20% έως 35%. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος είναι

A) Η ηλιακή ακτινοβολία

B) Η αρχική ποσότητα διαλύματος στον αποστακτήρα .

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όσον αυξάνεται η αρχική ποσότητα διαλύματος στον αποστακτήρα τόσο μειώνεται το παραγόμενο απόσταγμα και η απόδοσή του συστήματος.

Η απόκλιση της απόδοσής του συγκεκριμένου ηλιακού αποστακτήρα από τις αποδόσεις διαφόρων άλλων που έχουν αναφερθεί στη διεθνή βιβλιογραφία κυμαίνεται από 7% έως 41%. Ιδιαίτερα για ποσότητες αρχικού διαλύματος στον αποστακτήρα έως 4 lt , η υπολογισθείσα απόδοση , είναι σύμφωνη με το προταθέν από τη βιβλιογραφία μαθηματικό μοντέλο με μια λογική απόκλιση. Όμως πέραν της ποσότητας αυτής των 4 lt, οι αποκλίσεις είναι αξιόλογες. Τέλος η μέτρηση της αγωγιμότητας του αφαλατωμένου νερού δείχνει ότι η επιτευχθείσα απομάκρυνση των αλάτων είναι πολύ ικανοποιητική. Τα ληφθέντα αποτελέσματα και η εμπειρία από τη λειτουργία του ηλιακού αποστακτήρα στα Χανιά Κρήτης , δείχνουν ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε ορισμένες περιπτώσεις για τη κάλυψη των απαραίτητων αναγκών σε γλυκό νερό εφόσον άλλες μέθοδοι δεν ενδείκνυνται. Οποσδήποτε όμως απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση της λειτουργίας του σε μεγαλύτερη κλίμακα και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. J. A. Eibling, S. G. Talbert , G.O.G. Lof, “Solar stills for community Use. Digest of technology” , Solar energy, Vol. 13 , p. 263-276, 1971.
2. E.Sartori, “ Solar still versus solar evaporator: A comparative study between their thermal behaviours” , Solar energy, Vol 56, p.199-206, 1996.
3. E. D. Howe, B. W. Tleimat, “ Twenty years of work on solar distillation at the University of California” , Solar energy, Vol.16, p.97-105, 1974.
4. J. W. Bloemer, J. A. Eibling, I.R. Irwin, G.O.G. Lof, ”A practical basin-type solar still” , Solar energy, Vol. 9, No4, p.197-200.
5. G.N Tiwaris, H.N. Singh, Ragesh Tripathi, “ Present status of solar distillation” , Solar energy, 75, (2003), p.367-373.
6. A. Hanson, W. Zachritz, K.Stevens, L. Mimbela, R.Polka, L.Cisneros, “ Distillate water quality of a single basin solar still : Laboratory and field studies” , Solar energy, Vol 76, p.635-645, 2004.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ε. Μαθιουλάκης, Γ. Πανάρας και Β. Μπελεσιώτης

Εργαστήριο Ηλιακών & άλλων Ενεργειακών Συστημάτων, ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»,
15310 Αγία Παρασκευή Αττικής, e-mail : sollab@ipta.demokritos.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η προτεινόμενη εργασία επιχειρεί μια κριτική αξιολόγηση της εμπειρίας από το σχεδιασμό, την υλοποίηση και τη λειτουργία μιας πιλοτικής μονάδας ηλιακής αφαλάτωσης, βασισμένης στην τεχνολογία αφαλάτωσης με την μέθοδο ύγρανσης-αφύγρανσης, η οποία εγκαταστάθηκε στην Κοινότητα Γεροσκήπου της Κύπρου. Παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας του συστήματος, καθώς και οι συγκεκριμένες τεχνολογικές λύσεις που υιοθετήθηκαν στη φάση του σχεδιασμού. Αξιολογούνται τα διαχειριστικά και λειτουργικά προβλήματα που εμφανίστηκαν κατά την εγκατάσταση και τη λειτουργία της μονάδας, καθώς και δυνατές βελτιώσεις. Αναλύονται τέλος οι κρίσιμες παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος και γενικότερα την οικονομικοτεχνική βιωσιμότητα του εγχειρήματος.

Λέξεις κλειδιά: Αφαλάτωση, Απόσταξη, Ηλιακή Αφαλάτωση, Ύγρανση-Αφύγρανση,

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

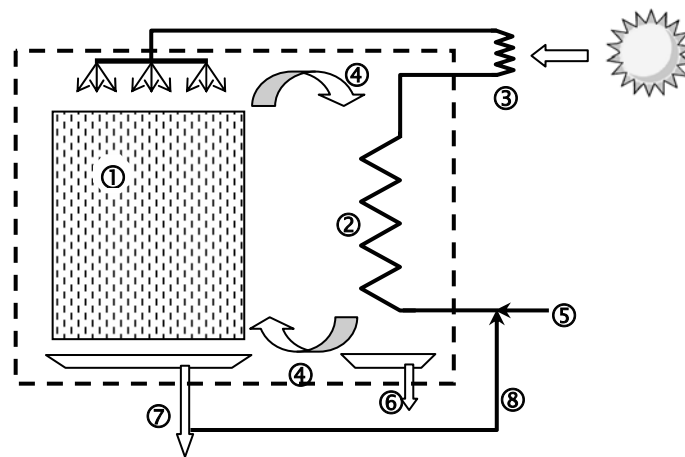
Για πολλές περιοχές, αλλά και ολόκληρες χώρες, η αφαλάτωση με χρήση ΑΠΕ παρουσιάζεται σήμερα ως η μόνη ρεαλιστική εναλλακτική απάντηση στις διαρκώς εντεινόμενες πιέσεις τόσο στο υδρολογικό όσο και στο ενεργειακό ισοζύγιο πολλών χωρών. Επιπλέον, η γεωγραφική και χρονική συνύπαρξη άφθονου ηλιακού δυναμικού και έντονα ελλειμματικών υδρολογικών ισοζυγίων, αναδεικνύει την ηλιακή αφαλάτωση ως μια ενδιαφέρουσα δυνατότητα, ειδικότερα στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου. Η λύση αυτή ενδιαφέρει ειδικότερα πολλές απομονωμένες περιοχές που διαθέτουν προβληματική ή και ανύπαρκτη σύνδεση με τα δίκτυα νερού και ενέργειας και οι οποίες συχνά χαρακτηρίζονται από ξηρασία, διαχρονικά ελλειμματικό υδρολογικό ισοζύγιο και αφθονία αλμυρού ή υφάλμυρου νερού. Επιπλέον πλεονεκτήματα για τις μεσογειακές χώρες συνιστούν η χρήση σχετικά απλών τεχνολογικών λύσεων, η δυνατότητα υποστήριξης σε τοπικό επίπεδο και η ύπαρξη εύρωστης εγχώριας βιομηχανίας θερμικών ηλιακών. Από την άλλη, τα μικρά αυτόνομα συστήματα αφαλάτωσης μπορούν να αποτελέσουν για τις περιοχές αυτές, ρεαλιστική και βιώσιμη απάντηση, μόνο υπό την προϋπόθεση ότι θα καταφέρουν να λύσουν τα προβλήματα κόστους, αξιοπιστίας και συντήρησης που συχνά υπονομεύουν την εμπιστοσύνη των χρηστών σε αυτά [1, 2].

Η ηλιακή αφαλάτωση μικρής δυναμικότητας βασίστηκε για πολλά χρόνια στην χρήση απλών αποστακτήρων τύπου θερμοκηπίου. Η ανάγκη ωστόσο επίτευξης μεγαλύτερων αποδόσεων οδήγησε σε τεχνολογικά πιο σύνθετες λύσεις, με κυριότερες εκδοχές την ύγρανση-αφύγρανση (humidification-dehumidification, HD) και, πιο πρόσφατα, την απόσταξη με μικροπερατές μεμβράνες (*membrane distillation*).

Η αφαλάτωση με ύγρανση-αφύγρανση αναπτύχθηκε ως απάντηση στο βασικό μειονέκτημα του απλού ηλιακού αποστακτήρα, δηλαδή τις μεγάλες απώλειες λανθάνουσας θερμότητας λόγω της συμπύκνωσης στο διαφανές κάλυμμα. Η αρχή λειτουργίας HD βασίζεται στην εξάτμιση του αλμυρού νερού σε ένα τμήμα του αφαλατωτή (τον εξεατμιστή) και στη συμπύκνω-

ση των παραγόμενων υδρατμών σε ένα άλλο τμήμα (τον συμπυκνωτή). Παρά τις επιμέρους διαφορές που παρουσιάζουν οι διάφορες πρακτικές εφαρμογές της αρχής αυτής, στην πλέον συνήθη εκδοχή τους η όλη διεργασία εξελίσσεται στο εσωτερικό ενός ενιαίου χώρου, χαρακτηριζόμενου από διαρκή φυσική κυκλοφορία υγρού αέρα σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης (Σχήμα 1).

Το εισερχόμενο στον εξατμιστή θερμό αλμυρό νερό έρχεται σε επαφή με τον αέρα, προσδίδοντάς του θερμότητα και υγρασία. Ο υγρός αέρας, ερχόμενος στη συνέχεια σε επαφή με τον συμπυκνωτή εγκαταλείπει μέρος της υγρασίας του ως αφαλατωμένο συμπύκνωμα, προθερμαίνοντας ταυτόχρονα το αλμυρό νερό που ρέει στο εσωτερικό του συμπυκνωτή. Το αλμυρό νερό, μετά την προθέρμανση του στον συμπυκνωτή, θερμαίνεται περαιτέρω προσλαμβάνοντας ηλιακή ενέργεια με τη βοήθεια εναλλάκτη, ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία του και, κατά συνέπεια, ο ρυθμός εξάτμισης. Ως βασικά στοιχεία που επιδρούν στην όλη διεργασία μπορούν επιπλέον να αναφερθούν η μεγιστοποίηση της επιφάνειας εξάτμισης με χρήση κατάλληλων διαβρεχόμενων υλικών στον εξατμιστή ή μεγιστοποίηση της εξωτερικής επιφάνειας του εναλλάκτη - συμπυκνωτή και η ανακύκλωση μέρους της εξερχόμενης άλμης με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης αλμυρού νερού [3, 4].



Σχήμα 1. Σχηματικό διάγραμμα μονάδας HD: ① περιοχή εξάτμισης, ② περιοχή συμπύκνωσης, ③ πηγή θερμότητας (από ηλιακό σύστημα) ④ φυσική κυκλοφορία αέρα ⑤ τροφοδοσία σε αλμυρό νερό, ⑥ απόσταγμα, ⑦ άλμη, ⑧ ανακυκλοφορία άλμης

Από την δεκαετία του '60 που εμφανίστηκαν οι πρώτες αναφορές σε πρωτότυπες πιλοτικές εγκαταστάσεις αφαλάτωσης HD, κατά καιρούς έγιναν διάφορες απόπειρες βελτίωσης της απόδοσης της όλης διεργασίας, με ορόσημο τη συστηματική διερεύνηση των επιδόσεων και τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού μιας συμπαγούς μονάδας με προοπτική να αποτελέσει εμπορικό προϊόν. Οι δοκιμές της μονάδας αυτής έδειξαν ότι οι αναμενόμενες επιδόσεις μπορούν να φτάσουν τα περίπου $12 \text{ lm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, απόδοση διπλάσια από αυτήν του κλασικού ηλιακού αποστακτήρα [5]. Ωστόσο, παρά τον σημαντικό αριθμό ερευνητικών εργασιών και επιδεικτικών δράσεων στο αντικείμενο, η εφαρμογή της σε πραγματική κλίμακα προσέκρουε, μέχρι πρότινος, στην έλλειψη τυποποιημένων, κατάλληλα δοκιμασμένων, έτοιμων προς εγκατάσταση εμπορικών προϊόντων.

Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε, στα πλαίσια του προγράμματος Ευρω-μεσογειακής συνεργασίας ADIRA [6], η υλοποίηση και η λειτουργική αξιολόγηση μιας τέτοιας μονάδας, δεδομένου επίσης ότι πολύ πρόσφατα εμφανίστηκε στην αγορά ένα συγκεκριμένο εμπορικό προϊόν [7]. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να παρουσιάσει τα συμπεράσματα από την υλο-

ποίηση και λειτουργία της μονάδας αυτής. Αξίζει να σημειωθεί ότι πρόκειται για την πρώτη προσπάθεια αντικειμενικής αξιολόγησης ενός τέτοιου συστήματος σε πραγματικές συνθήκες χρήσης, πολύ περισσότερο που η εμπειρία έχει αποδείξει ότι συχνά το πρόβλημα των μικρών μονάδων αφαλάτωσης έγκειται στην απόσταση μεταξύ θεωρητικά αναμενόμενων και εφαρμογής στην πράξη.

2. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Η συγκεκριμένη δράση του προγράμματος ADIRA αφορούσε την υλοποίησης μιας μικρής μονάδας ηλιακής αφαλάτωσης θαλασσινού νερού ονομαστικής παραγωγής 1000 l/d στην κοινότητα Γεροσκήπου της Κύπρου. Από τη φύση της, η δράση αυτή δεν είχε ως σκοπό την ουσιαστική παρέμβαση στο υδρολογικό ισοζύγιο της κοινότητας, αλλά την αξιολόγηση στην πράξη όλων των ζητημάτων που άπτονται της υλοποίησης μιας μικρής αυτόνομης εγκατάστασης αφαλάτωσης με χρήση θερμικής ηλιακής ενέργειας.

Για λόγους που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα κατάλληλων χώρων, το σύστημα εγκαταστάθηκε στο ολυμπιακό κολυμβητήριο της κοινότητας. Η επιλογή του χώρου σχετίζεται επίσης με τη δυνατότητα αξιοποίησης του δυνητικά υβριδικού χαρακτήρα του συστήματος, στην προοπτική βελτίωσης των όρων τεχνικό-οικονομικής εκμετάλλευσής του, δυνατότητα η οποία διερευνάται ευρύτερα τα τελευταία χρόνια στον τομέα της αφαλάτωσης [8]. Πιο συγκεκριμένα, με δεδομένο ότι το κύριο κόστος μιας τέτοιας εγκατάστασης αφορά το ηλιακό της τμήμα, ενδιαφέρον παρουσιάζει η δυνατότητα αξιοποίησης της συλλεγόμενης θερμότητας για της θέρμανση της κολυμβητικής δεξαμενής κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όταν η ανάγκες σε νερό είναι σαφώς μειωμένες. Αντίθετα, κατά τις θερμές περιόδους, όταν η ζήτηση για θερμότητα είναι μηδενική και η ανάγκες σε νερό έντονες, προκρίνεται η λειτουργία της αφαλάτωσης, προστατεύοντας ταυτόχρονα το ηλιακό πεδίο.

Για τον σχεδιασμό του ηλιακού συστήματος πάρθηκαν υπόψη τόσο η διαθέσιμη ελεύθερη επιφάνεια, όσο και η προβλεπόμενη ονομαστική τιμή της αναγκαίας θερμικής ισχύος του αφαλατωτή. Υπάρχει βεβαίως πάντα μια σχετική ελευθερία όσον αφορά την επιλογή των συλλεκτών, δεδομένου ότι μια ενδεχομένως χαμηλότερη απόδοσή τους μπορεί να αντισταθμιστεί από μεγαλύτερη συλλεκτική επιφάνεια. Άλλες σημαντικές παράμετροι που συνυπολογίστηκαν είναι η κατά το δυνατόν επιλογή προμηθευτών που δραστηριοποιούνται τοπικά, η υποχρέωση επιλογής των προμηθευτών των βασικών τμημάτων της εγκατάστασης με μειοδοτικό διαγωνισμό, καθώς και το προκαθορισμένο κόστος του συστήματος.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος που εγκαταστάθηκε τελικά, σχηματικό διάγραμμα του οποίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2, έχουν ως ακολούθως:

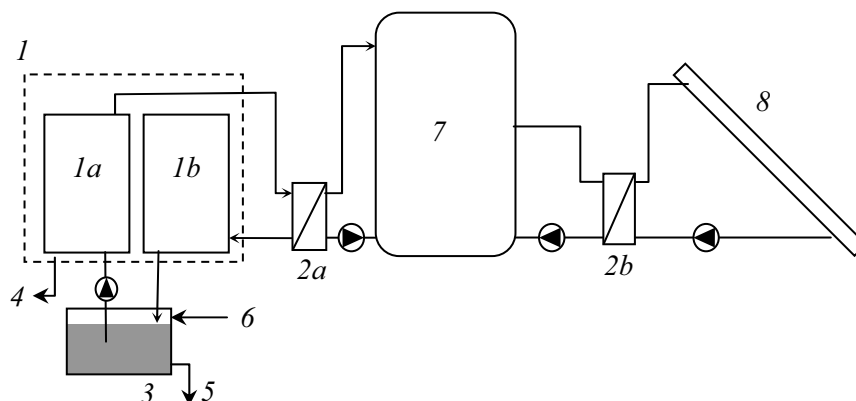
A. Μονάδα αφαλάτωσης HD:

- Προμηθευτής: TiNox – MAGE Water Management (Γερμανία).
- Διαστάσεις κύριας μονάδας: 1.08 m x 2.37 m x 2.70 m.
- Ολικό βάρος 480 kg (σε λειτουργία 650 kg).
- Ελάχιστη απαιτούμενη παροχή τροφοδοσίας σε αλμυρό νερό (σύμφωνα με κατασκευαστή) 0.5 m³/h.
- Θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό τροφοδοσίας μέγιστης αλατότητας TDS 100 000 ppm (μέγιστη αγωγιμότητα 120 000 μS/cm).
- Απαιτούμενη ονομαστική θερμική ισχύς: 4.5 kW με θερμοκρασία τροφοδοσίας 85 °C.
- Απαιτούμενη ονομαστική ηλεκτρική ισχύς: 200 W (230 V AC, 50/60 Hz).
- Ονομαστική παραγωγή απεσταγμένου νερού: 1000 l/d.

B. Θερμικό ηλιακό σύστημα:

- Προμηθευτής: KAFSON LTD (Γεροσκήπου - Κύπρος).

- Πεδίο συλλεκτών: 48 συλλέκτες συνολικής επιφάνειας 96 m².
- Τύπος συλλεκτών: επίπεδοι, με επιλεκτική απορροφητική επιφάνεια.
- Ηλιακή δεξαμενή όγκου 5 m³.
- Πλακοειδής εναλλάκτης ονομαστικής ισχύος 70 kW.



Σχήμα 2: Διάγραμμα ροής συστήματος αφαλάτωσης, 1: μονάδα HD, 1a: συμπυκνωτής, 1b: εξατμιστής, 2: εναλλάκτες θερμότητας, 3: δοχείο συλλογής άλμης, 4: παραγόμενο απόσταγμα, 5: απόρριψη άλμης, 6: τροφοδοσία σε αλμυρό νερό, 7: ηλιακή δεξαμενή, 8: πεδίο συλλεκτών

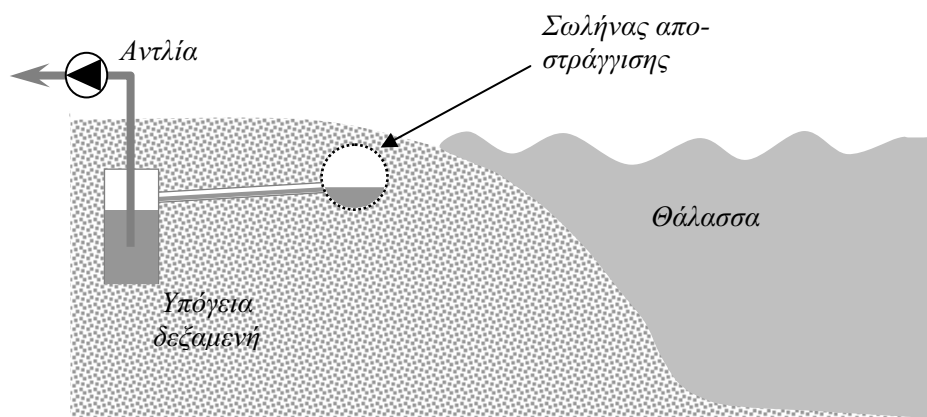
Η λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης χαρακτηρίζεται από συνεχή κυκλοφορία της άλμης η οποία εξέρχεται από τον εξατμιστή, αναμειγνύεται σε μικρό δοχείο με νέες ποσότητες θαλασσινού νερού, προωθείται στον συμπυκνωτή όπου προθερμαίνεται, θερμαίνεται περαιτέρω στον εναλλάκτη και, τέλος, οδηγείται στον εξατμιστή όπου αφήνει μέρος του νερού ως ατμό. Οι ασυνεχείς λειτουργίες της προσθήκης θαλασσινού νερού και απόρριψης άλμης ελέγχονται από προγραμματιζόμενο ηλεκτρονικό ελεγκτή με κριτήριο την μεγιστοποίηση της απόδοσης σε συνδυασμό με την αποφυγή υπερβολικής κατανάλωσης αλμυρού νερού. Το ίδιο σύστημα ελέγχει τη θερμοκρασία στην οποία παρέχεται η ηλιακή θερμότητα (<85 °C) με σκοπό την προστασία των υλικών από υπερθερμάνσεις και την αποφυγή επικαθίσεων στο δευτερεύον κύκλωμα του εναλλάκτη, όπως και την ελάχιστη θερμοκρασία έναρξης λειτουργίας της μονάδας. Για τον έλεγχο της λειτουργίας του ηλιακού συστήματος χρησιμοποιείται διακριτό σύστημα ελέγχου.

Σημαντικές είναι επίσης και οι διατάξεις επεξεργασίας του παραγόμενου αποστάγματος και προσαγωγής του θαλασσινού νερού. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, όσον αφορά το παραγόμενο απόσταγμα, προτιμήθηκε η απλή ανάμειξη με θαλασσινό νερό, σε αναλογία περίπου 150:1, με τη βοήθεια δοσομετρικής αντλίας και η εν συνεχεία αποστείρωση του με τη βοήθεια λάμπας UV. Η λύση αυτή κρίνεται αναγκαία για λόγους αντιδιαβρωτικής προστασίας και επαρκής στο βαθμό που το παραγόμενο νερό προορίζεται να αναμειχθεί με το νερό του δικτύου.

Η λύση στο πρόβλημα της τροφοδοσίας σε θαλασσινό νερό, **και** η οποία υλοποιήθηκε με επιτυχία, έχει περισσότερο ενδιαφέρον, λόγω της απουσίας σχετικής εμπειρίας. Σε κοντινή απόσταση, στο ίδιο ύψος και παράλληλα προς τον αιγιαλό τοποθετήθηκε αγωγός αποστράγγισης, μέσα σε κατάλληλο σκάμμα (Σχήμα 3). Πρόκειται για διάτρητο πλαστικό σωλήνα περιβαλλόμενο από γαιο-ύφασμα με στεγανοποιημένα τα δύο του άκρα, ρόλος του οποίου είναι να συλλέγει σχετικά διαυγές θαλασσινό νερό, χάρη στο φυσικό φιλτράρισμα που υφίσταται καθώς διαπερνάει το στρώμα άμμου που τον περιβάλλει. Το συλλεγόμενο από τον αγωγό νερό οδηγείται με φυσική ροή σε δοχείο συλλογής τοποθετημένο χαμηλότερα από τον σωλήνα α-

ποστράγγισης, από όπου και αντλείται προς τη δεξαμενή συλλογής της μονάδας αφαλάτωσης με τη βοήθεια κατάλληλης αντλίας.

Για την παρακολούθηση και καταγραφή των σημαντικότερων μεγεθών του συστήματος εγκαταστάθηκε σύστημα λήψης δεδομένων με δυνατότητα παρακολούθησης από μακριά μέσω μόντεμ GSM. Τα μεγέθη που καταγράφονται είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η θερμοκρασία στην ηλιακή δεξαμενή, η θερμοκρασία και η παρεχόμενη στη μονάδα αφαλάτωσης θερμική ισχύς και, τελευταίο αλλά και σημαντικότερο, η παραγόμενη ποσότητα απεσταγμένου νερού. Η μέτρηση του παραγόμενου αποστάγματος εμφανίζει ορισμένες δυσκολίες λόγω της σχεδόν μηδενικής πίεσης της ροής του στην έξοδο της μονάδας αφαλάτωσης, σε συνδυασμό με την απουσία αλάτων τα οποία θα επέτρεπαν την χρήση ηλεκτρομαγνητικών ροομέτρων. Για το λόγο αυτό προτιμήθηκε η συλλογή του αποστάγματος σε μικρή δεξαμενή 100 l, της οποίας η περιοδική εκκένωση, κάθε φορά που γεμίζει, καταγράφεται από το σύστημα συλλογής δεδομένων.



Σχήμα 3. Συλλογή θαλασσινού νερού

3. Εμπειρία από την υλοποίηση και λειτουργία της εγκατάστασης

2.1. Υλοποίηση της εγκατάστασης

Παρά το προφανές ενδιαφέρον για τις μικρής δυναμικότητας εγκαταστάσεις αφαλάτωσης, ειδικότερα σε περιοχές με ατελώς ανεπτυγμένα δίκτυα νερού και ενέργειας, η εμπειρία από την υλοποίηση τους είναι εξαιρετικά περιορισμένη. Ένας από τους λόγους είναι η απουσία επιλογών όσον αφορά τυποποιημένων, εμπορικά διαθέσιμων αφαλατωτών, με σαφή χαρακτηριστικά και επαρκή υποστήριξη, σε αντιδιαστολή με το ηλιακό μέρος των εγκαταστάσεων για το οποίο υπάρχουν και προϊόντα και επαρκής τεκμηρίωση. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε και κατά την υλοποίηση της παρούσας εγκατάστασης, αφού εντοπίστηκε μόνο ένα διαθέσιμο προϊόν, το οποίο μάλιστα θα εγκαθίσταντο για πρώτη φορά, αν εξαιρεθούν οι δοκιμές του σε εργαστηριακές συνθήκες.

Σημαντικό είναι επίσης το πρόβλημα της απουσίας τυποποιημένης και σαφούς διατύπωσης των χαρακτηριστικών και επιδόσεων της μονάδας αφαλάτωσης. Οι σχετικές πληροφορίες, αν και απαραίτητες για τη σωστή σχεδίαση μιας εγκατάστασης, είναι συνήθως ελλιπείς ή ασαφείς, με χαρακτηριστικότερο παράδειγμα αυτό της ονομαστικής απόδοσης, για την οποία δεν προσδιορίζονται συγκεκριμένες συνθήκες μέτρησής, όπως θερμοκρασία περιβάλλοντος, θερμοκρασία αλμυρού νερού τροφοδοσίας και θερμοκρασία στην οποία παρέχεται η απαιτούμενη ενέργεια. Υφίστανται, κατά συνέπεια, ορισμένες αβεβαιότητες όσον αφορά τόσο τις τεχνικές και οικονομικές παραμέτρους του εγχειρήματος, όσο και την βιωσιμότητά του σε βάθος χρόνου (ποιότητα και αντοχή υλικών).

Άλλη κατηγορία προβλημάτων για τα οποία δεν υπάρχει επαρκής εμπειρία και «έτοιμες» λύσεις, για εγκαταστάσεις μικρής δυναμικότητας, είναι η τροφοδοσία σε θαλασσινό νερό και η επεξεργασία του παραγόμενου συμπυκνώματος. Σε αντίθεση με τις μεγάλες βιομηχανικού τύπου εγκαταστάσεις αφαλάτωσης όπου το αντίστοιχο κόστος είναι σχετικά μικρό σε σχέση με τη συνολική επένδυση, απαιτούνται λύσεις κατά το δυνατό απλές και οικονομικοτεχνικά συμβατές με την όλη επένδυση. Με την έννοια αυτή, η εμπειρία από τις επιλογές που έγιναν για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση κρίνεται ως ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα, ειδικότερα όσον αφορά το απλό τεχνικό έργο που υλοποιήθηκε για την πρόσληψη θαλασσινού νερού.

2.2. Λειτουργικά προβλήματα και παρεμβάσεις

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι η σημαντικότερη παράμετρος επιτυχίας παρόμοιων εγκαταστάσεων σχετίζεται με την επίλυση των πάσης φύσεως λειτουργικών προβλημάτων που είναι λογικό να συνοδεύουν τα πρώτα πραγματικά βήματα μιας νέας τεχνολογίας. Έχει επομένως ιδιαίτερη σημασία ο εντοπισμός των προβλημάτων αυτών και η επεξεργασία λύσεων που θα διασφαλίζουν την βιωσιμότητα των εγκαταστάσεων.

Το σημαντικότερο ίσως λειτουργικό πρόβλημα αφορά διαφόρων ειδών αστοχίες σχετικές με την κυκλοφορία των ρευστών (διαρροές, αποφράξεις σωληνώσεων) οι οποίες εμφανίστηκαν στο εσωτερικό της μονάδας αφαλάτωσης, ιδιαίτερα κατά την πρώτη περίοδο λειτουργίας της, και οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν καθοριστικά τόσο την απόδοση όσο και την ποιότητα του παραγόμενου νερού. Ως κύρια αιτία μπορεί να αναφερθεί η εκτεταμένη χρήση σωλήνων και εξαρτημάτων σύνδεσης από πολυαιθυλένιο, το οποίο, πέρα από τα προφανή πλεονεκτήματά του (αντοχή σε θερμοκρασία και διάβρωση, ευκολία συναρμολόγησης, συμβατότητα με πόσιμο νερό), απαιτεί ιδιαίτερη φροντίδα στις συγκολλήσεις και στη διασφάλιση της στεγανοποίησης στις συνδέσεις μεταξύ εξαρτημάτων. Πολλά από αυτά τα προβλήματα μπορούν να εντοπιστούν με τη βοήθεια συστηματικών δοκιμών πριν την παράδοση, με τρόπο που να καλύπτονται όλες οι ακραίες συνθήκες στις οποίες αναμένεται να βρεθεί η μονάδα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ορισμένες από τις αστοχίες είχαν ως αιτία το γεγονός ότι η μονάδα αφαλάτωσης περιλαμβάνει στο εσωτερικό της πολλά κινούμενα μέρη (κουρτίνες εξάτμισης, σωληνώσεις) τα οποία, με τη μεταφορά της μονάδας, μετακινήθηκαν από την αρχική τους θέση ή αποσυνδέθηκαν μεταξύ τους.

Μια άλλη κατηγορία προβλημάτων, με περισσότερο μακροπρόθεσμες πιθανές επιπτώσεις, σχετίζεται με τις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας της μονάδας. Ειδικότερα, η απαίτηση για θερμοκρασίες της τάξης των 85 °C στον εναλλάκτη προσαγωγής της θερμότητας στην μονάδα αφαλάτωσης, οδηγεί σε ακόμα μεγαλύτερες θερμοκρασίες στο ηλιακό σύστημα. Στην περίπτωση μάλιστα ενός αυτόνομου ηλιακού συστήματος αφαλάτωσης, για να επιτευχθεί η ονομαστική ημερήσια παραγωγή των 1000 l/d, συμπεριλαμβανομένης δηλαδή και της νυκτερινής λειτουργίας, απαιτούνται θερμοκρασίες της τάξης των 90-100 °C. Η προφανής συνέπεια είναι ότι απαιτείται ιδιαίτερη φροντίδα κατά την επιλογή των υλικών και για το ηλιακό σύστημα (συλλέκτες, σωληνώσεις, μονώσεις και δεξαμενή), ώστε η μακροπρόθεσμη έκθεση σε αυτές τις θερμοκρασίες να μην έχει αρνητικές επιπτώσεις στην βιωσιμότητα της εγκατάστασης.

2.3. Επιδόσεις του συστήματος

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η αξιολόγηση των επιδόσεων της μονάδας σε σχέση με τα αναμενόμενα, όπως τουλάχιστον αυτά παρουσιάζονται από τον κατασκευαστή, προσκρούει σε μια αντικειμενική δυσκολία που αφορά την απουσία ευρέως αποδεκτής τυποποιημένης μεθοδολογίας αξιολόγησης συστημάτων αφαλάτωσης. Πολύ περισσότερο που η απόδοση της τεχνολογίας HD είναι συνάρτηση όχι μόνο της θερμοκρασίας και της παροχής με την οποία προ-

σάγεται η αναγκαία θερμότητα, αλλά και άλλων παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού και ο τρόπος ελέγχου της απόρριψης της άλμης.

Η μέχρι σήμερα περίοδος λειτουργίας αναλώθηκε κυρίως στην επίλυση των διαφόρων λειτουργικών προβλημάτων, με την καταγραφή των επιδόσεων της μονάδας για μεγάλες χρονικές περιόδους να είναι προγραμματισμένη για το καλοκαίρι του 2009. Παρόλα αυτά, μπορούν ήδη να διατυπωθούν τα ακόλουθα αρχικά συμπεράσματα από την δοκιμαστική λειτουργία του συστήματος:

- Το σύστημα ελέγχου της μονάδας HD, και μέσω αυτού ο χρήστης της εγκατάστασης, έχει δυνατότητα παρέμβασης στην ρύθμιση της θερμοκρασίας στην οποία προσάγεται η θερμότητα στη μονάδα αφαλάτωσης και στα κριτήρια απόρριψης της άλμης. Στην πράξη, με δεδομένο ότι η ρύθμιση στον εναλλάκτη προσαγωγής της θερμότητας αφορά μόνο την αποφυγή θερμοκρασιών μεγαλύτερων των 85°C , η μόνη δυνατότητα παρέμβασης στην λειτουργία της μονάδας είναι αυτή της απόρριψης της άλμης (θέση 5 στο Σχήμα 2). Η αρχική πρόβλεψη ήταν η απόρριψη να γίνεται με προκαθορισμένη συχνότητα, με πιθανό αποτέλεσμα την άσκοπη απώλεια θαλασσινού νερού, για παράδειγμα σε περιόδους με μειωμένη ηλιοφάνεια. Μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση, η οποία και ακολουθήθηκε τελικά, είναι η εκκένωση της δεξαμενής της άλμης (και η εκ νέου πλήρωσή της με θαλασσινό νερό) όταν η θερμοκρασία του υπερβεί ένα προκαθορισμένο όριο, π.χ. 40°C . Μεγαλύτερη τιμή του ορίου αυτού συνάγεται μεγάλη θερμοκρασία στον συμπυκνωτή και, επομένως, χαμηλότερη απόδοση. Αντίθετα, μικρότερη θερμοκρασία εκκένωσης σημαίνει μεγαλύτερη απόδοση αλλά και μεγαλύτερη κατανάλωση θαλασσινού νερού.
- Κρίσιμη παράμετρο αποτελεί η θερμοκρασία επιστροφής της άλμης στον συμπυκνωτή. Η μείωση της θερμοκρασίας αυτής επιταχύνει τον ρυθμό συμπύκνωσης, αυξάνει την παραγωγικότητα του αφαλατωτή και μειώνει την κατανάλωση θαλασσινού νερού, αν και έχει ως συνέπεια την μεγαλύτερη κατανάλωση θερμότητας. Η μείωση αυτή μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη κατάλληλης διάταξης (π.χ. πύργος ψύξης) ανάμεσα στο δοχείο της άλμης και τον συμπυκνωτή (θέσεις 1a και 3 αντίστοιχα στο Σχήμα 2).
- Από τις μέχρι σήμερα περιορισμένες περιόδους ομαλής λειτουργίας του συστήματος δεν κατέστη δυνατόν να επιβεβαιωθεί η αναμενόμενη ονομαστική απόδοση της μονάδας, με τις αποκλίσεις να είναι της τάξης του 30%. Η ανάλυση των αιτίων της μειωμένης απόδοσης, σε συνεργασία με τον κατασκευαστή, οδήγησε σε μια σειρά παρεμβάσεις που αφορούν κυρίως τα χρησιμοποιούμενα υλικά, παρεμβάσεις που θα αξιολογηθούν σε επόμενη περίοδο.

3. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΟΣΤΟΥΣ

Το συνολικό κόστος του συστήματος αφαλάτωσης, χωρίς τον εξοπλισμό προσαγωγής του θαλασσινού νερού και τον εξοπλισμό μετρήσεων, ήταν περίπου 38.000€. Είναι σαφές ότι ακόμα και εάν επιτευχθεί η μέγιστη ημερήσια παραγωγή των 1000 l/d, το κόστος του παραγόμενου νερού είναι αρκετά υψηλό και σε κάθε περίπτωση εξαρτάται από την ηλιοφάνεια του τόπου εγκατάστασης. Η διερεύνηση που έγινε με την βοήθεια λογισμικού οικονομικής αποτίμησης μονάδων αφαλάτωσης AUDESSY, το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ADIRA [6], οδήγησε για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση σε ένα εκτιμώμενο κόστος της τάξης των 16 €/m^3 .

Το κόστος αυτό, αν και είναι συμβατό με αυτό άλλων εγκαταστάσεων αφαλάτωσης μικρής δυναμικότητας που τροφοδοτούνται από ΑΠΕ, μπορεί να μεταβληθεί δραστικά εάν η λειτουργία του συστήματος εξεταστεί στα πλαίσια μιας λογικής υβριδικής χρήσης. Για παρά-

δειγμα, όπως ήδη αναφέρθηκε, η θερμότητα που παράγεται από το συγκεκριμένο ηλιακό σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση της κολυμβητικής δεξαμενής. Στην περίπτωση αυτή το ηλιακό σύστημα, που είναι και το ακριβότερο τμήμα της όλης εγκατάστασης, μπορεί να αποσβεστεί από το εξοικονομούμενο συμβατικό καύσιμο. Η επιλογή αυτή θα μετέβαλε δραστικά τα στοιχεία κόστους για το παραγόμενο νερό, με το τελικό κόστος να είναι συνάρτηση της χρονικής κατανομής μεταξύ των δύο λειτουργιών του συστήματος.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η υλοποίηση της πρώτης ουσιαστικά εγκατάστασης ηλιακής αφαλάτωσης HD σε πραγματικές συνθήκες χρήσης ανέδειξε την δυνατότητες αλλά και αδυναμίες της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Στις πρώτες συγκαταλέγονται η τεχνολογική απλότητα της διεργασίας, η αξιοποίηση τοπικών δεξιοτήτων - ειδικά για το ηλιακό μέρος της εγκατάστασης - και η βελτίωση των οικονομικότητας της επένδυσης μέσω της εκμετάλλευσης της παραγόμενης θερμότητας για άλλες χρήσεις σε περιόδους χαμηλής έντασης στο υδρολογικό ισοζύγιο. Στις αδυναμίες συγκαταλέγονται η απουσία επιλογών σε έτοιμα προς εγκατάσταση προϊόντα, η ελλιπής τυποποίηση όσον αφορά τον χαρακτηρισμό τους και η σχετικά ανεπαρκής εμπειρία από την λειτουργία τους σε πραγματικές συνθήκες. Η εμπειρία από την συγκεκριμένη εγκατάσταση μπορεί όμως να αξιοποιηθεί ώστε, σε συνεργασία με τους κατασκευαστές, να προταθούν λύσεις πιο αποδοτικές και, κυρίως, βελτιωμένες στο επίπεδο τεχνικής τεκμηρίωσης και της βιωσιμότητάς τους.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα υλοποιήθηκε στα πλαίσια του Έργου *ADIRA: Autonomous Desalination system concepts for sea water and brackish water In Rural Areas with renewable energies* (Πρόγραμμα Ευρω-Μεσογειακή Συνεργασίας, Δράση MEDA Water Programme)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] MEDRC R&D Report, Matching Renewable Energy with Desalination Plants, IT Power Ltd, 2001.
- [2] E. Mathioulakis, E. Delyannis, V. Belessiotis, Desalination by using alternative energy: Review and State-of-the-art, Desalination, Vol. 203, 346-365, 2007
- [3] MEDRC R&D Report, A comprehensive study of solar desalination with a humidification-dehumidification cycle, ZAE Bayern, Munich, Germany, 2002.
- [4] H. Müller-Holst, M. Engelhardt and W. Scholkopf, Small-scale thermal seawater desalination simulation and optimization of system design, Desalination, 122 (1999) 255–262.
- [5] H. Müller-Holst, M. Engelhardt and W. Scholkopf, Multi effect humidification sea water desalination using solar energy or waste heat - various implementations of a new technology, Proc. Mediterranean Conference on Policies and Strategies for Desalination and Renewable Energies, Santorini Island, Greece, 21–23 June 2000.
- [6] ADIRA Project, www.adira.info.
- [7] Minisal, <http://www.tinox-watermanagement.de/ie1024/watersitB1024.htm>.
- [8] Mathioulakis E. and Belessiotis V., Integration of solar still in a multi-source, multi-use environment, Solar Energy, Vol. 75(5), 2003, pp. 355-437.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ ΓΙΑ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Π. Πουλουπάτης¹, Γ. Φλωρίδης², Σ. Τάσσου³

¹ Υπηρεσία Ενέργειας, Υπουργείο Εμπορίου, Βιομηχανίας και Τουρισμού, Χρ. Εργατούδη 43, 3080 Λεμεσός, e-mail: cfs@cytanet.com.cy

² Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Επιστήμης και Μηχανικής Υλικών, Σχολή Μηχανικής και Τεχνολογίας, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Αρχιεπισκόπου Κυπριανού 31, Τ.Θ. 50329, 3036 Λεμεσός, e-mail: georgios.florides@cut.ac.cy

³ School of Engineering and Design, Brunel University, Uxbridge, Middlesex UB8 3PH, UK, e-mail: savvas.tassou@brunel.ac.uk

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η γνώση των θερμικών χαρακτηριστικών του εδάφους χρησιμεύει μεταξύ άλλων και στον καθορισμό της ικανότητας του εδάφους να ανταλλάσσει θερμότητα σε θερμικούς και ψυχτικούς κύκλους για τον κλιματισμό κτιρίων. Σκοπός της μελέτης αυτής ήταν η διερεύνηση της δομής του εδάφους σε διάφορες περιοχές της Κύπρου και η μέτρηση της θερμοκρασίας του σε διάφορα βάθη με στόχο τη δημιουργία βάσης δεδομένων που να αφορά το γεωθερμικό δυναμικό της Κύπρου σε διάφορες περιοχές. Η καταγραφή των δεδομένων έγινε σε μηνιαία βάση μέσω πιλοτικών πειραματικών μετρήσεων σε γεωτρήσεις οι οποίες θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν αστικές και ημιορεινές περιοχές χρησιμοποιώντας προηγμένα τεχνολογικά θερμοστοιχεία τύπου K. Χρησιμοποιήθηκαν υφιστάμενες γεωτρήσεις, δύο στις περιοχές Αγία Φύλα και Άγιος Γεώργιος στη Λεμεσό βάθους 7.8 και 120 μ αντίστοιχα και μία στην περιοχή Σαϊττά βάθους 185 μ. Επίσης, έχουν αναγνωριστεί και καταγραφεί τα γεωλογικά στρώματα στις περιοχές αυτές και μετρήθηκαν τα θερμικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους. Η βαθύτερη ζώνη που ξεκινά από βάθος 7 μ. έχει σταθερή θερμοκρασία περίπου 22.35 °C στις περιοχές Αγ. Φύλας και Αγ. Γεωργίου και περίπου, 18.1 °C, στην περιοχή Σαϊττά. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας συμφωνούν και με τα αποτελέσματα προηγούμενης έρευνας όπου έγινε για γεώτρηση βάθους 50 μ στην περιοχή Αθαλάσσας στην Λευκωσία [1].

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από μελέτες που έγιναν, είναι γνωστό ότι η θερμοκρασία του εδάφους είναι ψηλότερη από την ατμοσφαιρική κατά την χειμερινή περίοδο, χαμηλότερη κατά την καλοκαιρινή και επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες ανάλογα με το βάθος. Το έδαφος χωρίζεται κυρίως σε τρία στρώματα, το επιφανειακό, η θερμοκρασία του οποίου επηρεάζεται από την καθημερινή αλλαγή θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα και από παράγοντες όπως την ηλιακή ακτινοβολία, τον αέρα, τη βροχόπτωση, κτλ, το αβαθές, που επηρεάζεται κυρίως από εποχιακές καιρικές αλλαγές και το βαθύτερο, η θερμοκρασία του οποίου παραμένει σχετικά σταθερή και ανεπηρέαστη από τις καιρικές συνθήκες. Το πεδίο βάθους κάθε στρώματος σχετίζεται κυρίως με την μορφολογία του εδάφους και τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή.

Οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στις βόρειες χώρες της Ευρώπης και Αμερικής, από όπου προέρχονται και οι περισσότερες μελέτες [2-6], είναι τέτοιες που ευνοούν την εκμετάλλευση των γεωθερμικών χαρακτηριστικών του εδάφους κυρίως για θέρμανση των κτιρίων και σε μικρότερη κλίμακα για ψύξη ή δροσισμό. Μόλις τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να γίνονται έρευνες σχετικά με την εκμετάλλευση των γεωθερμικών χαρακτηριστικών του εδάφους σε χώρες με ζεστό κλίμα, όπως η Ελλάδα, η Τουρκία, η Νότια Αμερική [7], κ.α., όπου η ψύξη ή δροσισμός των κτιρίων είναι σημαντικότερα από τη θέρμανση. Δεδομένα από άλλες γειτονικές χώρες δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για την Κύπρο λόγω του ότι διαφέρουν σημαντικά. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι οι θερμοκρασίες εδάφους στη Νότια Ελλάδα σε 8 μ βάθος είναι 14-16 °C και στα νησιά 15-17 °C, σε σύγκριση με τους 21 °C στην περιοχή Άγιος Γεώργιος στην Λεμεσό.

Οι γεωεναλλάκτες είναι εναλλάκτες θερμότητας και είναι το μέσο με το οποίο γίνεται η εναλλαγή θερμότητας με το κτίριο είτε άμεσα, ανοικτού κυκλώματος, είτε έμμεσα, κλειστού κυκλώματος. Τοποθετούνται οριζόντια ή κάθετα στο έδαφος και χρησιμοποιούν την γη σαν μία μεγάλη πηγή θερμότητας ή σαν μια μεγάλη μάζα απόρριψης θερμότητας αναλόγως της χρήσης. Οι γεωεναλλάκτες μπορούν να συνδεθούν με αντλίες θερμότητας με σκοπό την αύξηση της αποδοτικότητας τους μιας και θα εναλλάσσουν θερμότητα με πηγή σταθερής θερμοκρασίας όπως είναι η γη αντί με την μεταβαλλόμενη που είναι η ατμόσφαιρα.

Τα τελευταία χρόνια στην Κύπρο, έχει παρατηρηθεί αυξημένη ζήτηση για την εφαρμογή συστημάτων με γεωεναλλάκτες συνδεδεμένους με θερμικές αντλίες και οι οποίοι επιδοτούνται από το Ειδικό Ταμείο για Εξοικονόμηση Ενέργειας (ΕΞΕ) και προώθηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Αλλά, παρατηρείται επίσης και έλλειψη επιστημονικής υποστήριξης και ειδικότερα δεδομένων που σχετίζονται με τη συμπεριφορά του εδάφους σε σχέση με τις κλιματικές συνθήκες και την απόδοσή τους. Η αποδοτικότητα (τεχνική και οικονομική) της τεχνολογίας σε χώρες με ζεστό κλίμα όπου η ζήτηση για ψύξη υπερτερεί, είναι ακόμα άγνωστη.

2. ΣΗΜΕΙΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Σκοπός της μελέτης αυτής είναι η διερεύνηση της δομής του εδάφους σε διάφορες περιοχές της Κύπρου και η μέτρηση της θερμοκρασίας του σε διάφορα βάθη με στόχο τη δημιουργία βάσης δεδομένων που να αφορά το γεωθερμικό δυναμικό της Κύπρου σε διάφορες περιοχές. Η καταγραφή των δεδομένων που παρουσιάζονται στη μελέτη αυτή έγινε σε δύο υφιστάμενες γεωτρήσεις στην περιοχή Λεμεσού και σε μία στην περιοχή Σαϊττά, βάθους 7.8, 120 και 185 μ αντιστοίχως.

Για την καταγραφή των θερμοκρασιών του εδάφους στα διάφορα βάθη χρησιμοποιήθηκαν προηγμένα τεχνολογικά θερμοστοιχεία τύπου K. Τα θερμοστοιχεία είναι κατασκευασμένα ειδικά για να χρησιμοποιούνται σε συστήματα όπου απαιτείται προστασία από επηρεασμό από ηλεκτρισμό. Είναι επίσης ανθεκτικά στην επαφή τους με υγρασία και χημικά καθώς επίσης μπορούν να μείνουν ανεπηρέαστα και από ηλιακή ακτινοβολία (UV light). Όλες οι μετρήσεις έγιναν σε μηνιαία βάση ανά διαστήματα 15 λεπτών καταγράφοντας μια τυπική μέρα του μήνα με μια συσκευή καταγραφής δεδομένων Omega OMB-DAQ 55/65.

Η γεώτρηση στην περιοχή Αγίας Φύλας στην Λεμεσό έχει διάμετρο 10 εκ. και βάθος 7.8 μ. Τα θερμοστοιχεία έχουν τοποθετηθεί στα τοιχώματα της γεώτρησης σε επαφή με το υπάρχον έδαφος. Το χώμα που αφαιρέθηκε κατά τη διάνοιξη της γεώτρησης καθώς και χώμα από την γύρω περιοχή χρησιμοποιήθηκε για το γέμισμα της. Η περιοχή γύρω από τον γεωεναλλάκτη

είναι καθαρή από βλάστηση κατά την θερινή περίοδο και με λίγη διάσπαρτη χαμηλή βλάστηση την υπόλοιπη περίοδο του χρόνου.

Στην περιοχή Αγίου Γεωργίου στην Λεμεσό η γεώτρηση έχει διάμετρο 20 εκ. και βάθος 120 μ. Τα θερμοστοιχεία έχουν τοποθετηθεί στο κέντρο της γεώτρησης και σε διάφορα βάθη μαζί με ένα διπλό εναλλάκτη θερμότητας σε σχήμα U κατασκευασμένο από σωλήνα HDPE εξωτερικής διαμέτρου 32 χιλ. Για το γέμισμα της γεώτρησης χρησιμοποιήθηκε πεντονίτης. Η περιοχή γύρω από τον γεωεναλλάκτη είναι καθαρή από βλάστηση καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου.

Ο δασικός σταθμός στο Σαϊττά βρίσκεται σε υψόμετρο περίπου 660 μ. από την επιφάνεια της θάλασσας (34.5° Βόρεια, 32.55° Ανατολικά). Στην γεώτρηση των 20 εκ. που έχει ανοιχτεί τοποθετήθηκαν στο κέντρο θερμοστοιχεία για την μέτρηση της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη μέχρι 178 μ καθώς επίσης και ένας HDPE εναλλάκτης θερμότητας σε σχήμα U με διαστάσεις 40 χιλ. εξωτερική διάμετρο και πάχος τοιχώματος 3.7 χιλ. Η γεώτρηση έχει γεμιστεί με πεντονίτη. Η περιοχή γύρω από τον γεωεναλλάκτη είναι καθαρή από βλάστηση καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου.

Στην εικόνα 1 πιο κάτω απεικονίζεται η περιοχή της Λεμεσού με τα 3 σημεία συλλογής δεδομένων.



Εικόνα 1: Σημεία συλλογής δεδομένων.

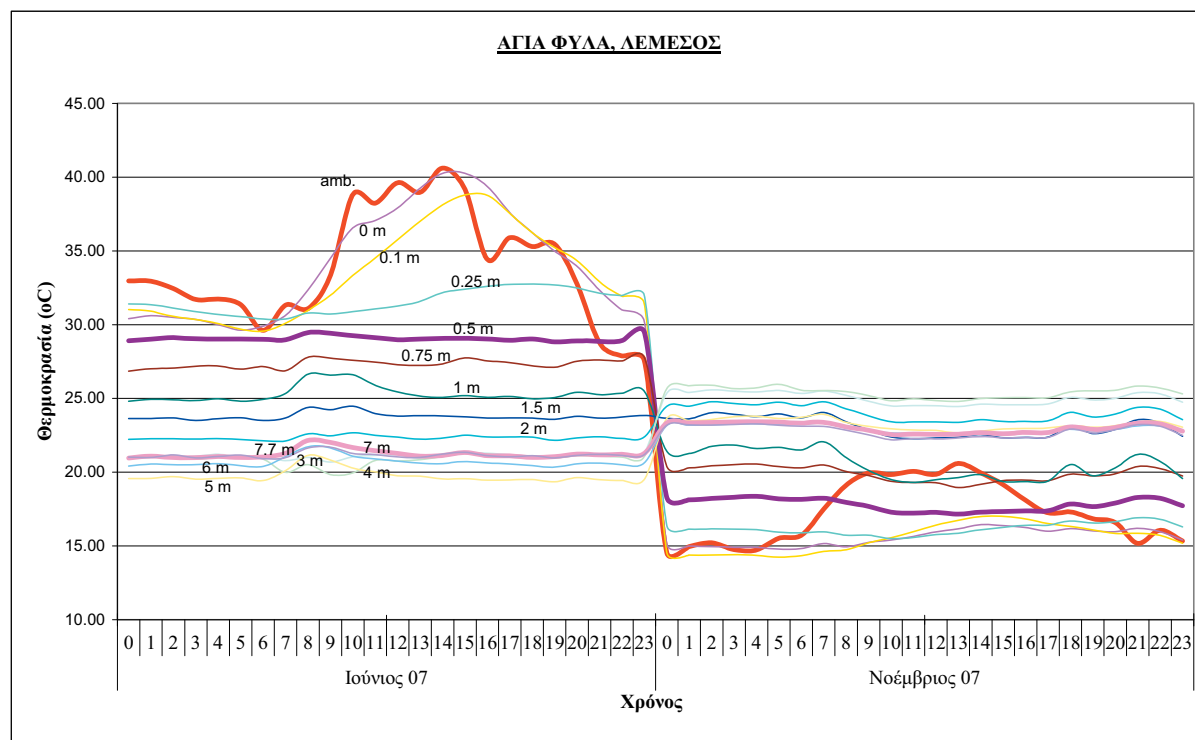
Το έδαφος στην περιοχή της Αγίας Φύλας αποτελείται κυρίως από σκληροπυρηνική υλική με σύσταση από μάργες και αμμοχάλικο. Η μέση πυκνότητα του εδάφους είναι περίπου 1550 kg/m^3 και η θερμική αγωγιμότητα του όταν είναι ξηρό, είναι 0.23 kW/mK . Επίσης, έχουν αναγνωριστεί και καταγραφεί γεωλογικά τα στρώματα του υπεδάφους και στις δύο άλλες περιοχές και καταγράφονται στον Πίνακα 1 πιο κάτω.

Πίνακας 1. Γεωλογικά στρώματα του υπεδάφους στα 3 σημεία συλλογής πληροφοριών			
Υπέδαφος – Άγιος Γεώργιος	Βάθος (μέτρα)		Υπέδαφος - Σαϊττάς
Κοκκινόχωμα (Red soil)	0-4	0-8	Επιφανειακό έδαφος (Top soil)
Αμμοχάλικα περιοχής (Silty sand with some gravels)	4-16		
Κίτρινες μάργες (Yellow marl)	16-38	8-178	Ηφαιστειακό πέτρωμα (Diabase)
Πράσινες μάργες (Green marl)	38-120		

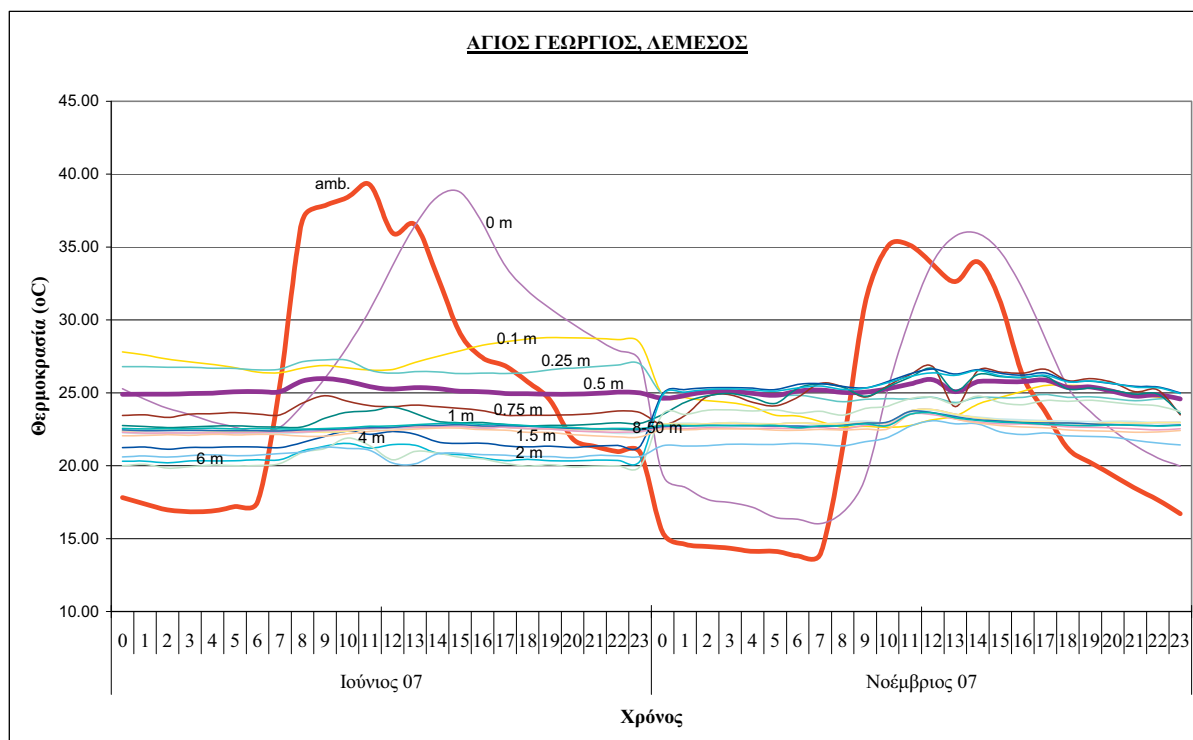
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Με την βοήθεια του πιο πάνω εξοπλισμού έχει καταγραφεί περιοδικά η θερμοκρασία του εδάφους σε διάφορα βάθη, στα τρία σημεία συλλογής πληροφοριών που αναφέρονται πιο πάνω όπου βρίσκονται οι γεωτρήσεις, με σκοπό την σύγκριση της θερμικής συμπεριφοράς του εδάφους σε σχέση με τις καιρικές συνθήκες. Μεγάλο ενδιαφέρον συγκεντρώνει η συμπεριφορά του εδάφους στην περιοχή του Σαϊττά αφού βρίσκεται σε ημιορεινή περιοχή με διαφορετικές καιρικές συνθήκες και σύσταση υπεδάφους σε σχέση με τις άλλες δύο γεωτρήσεις.

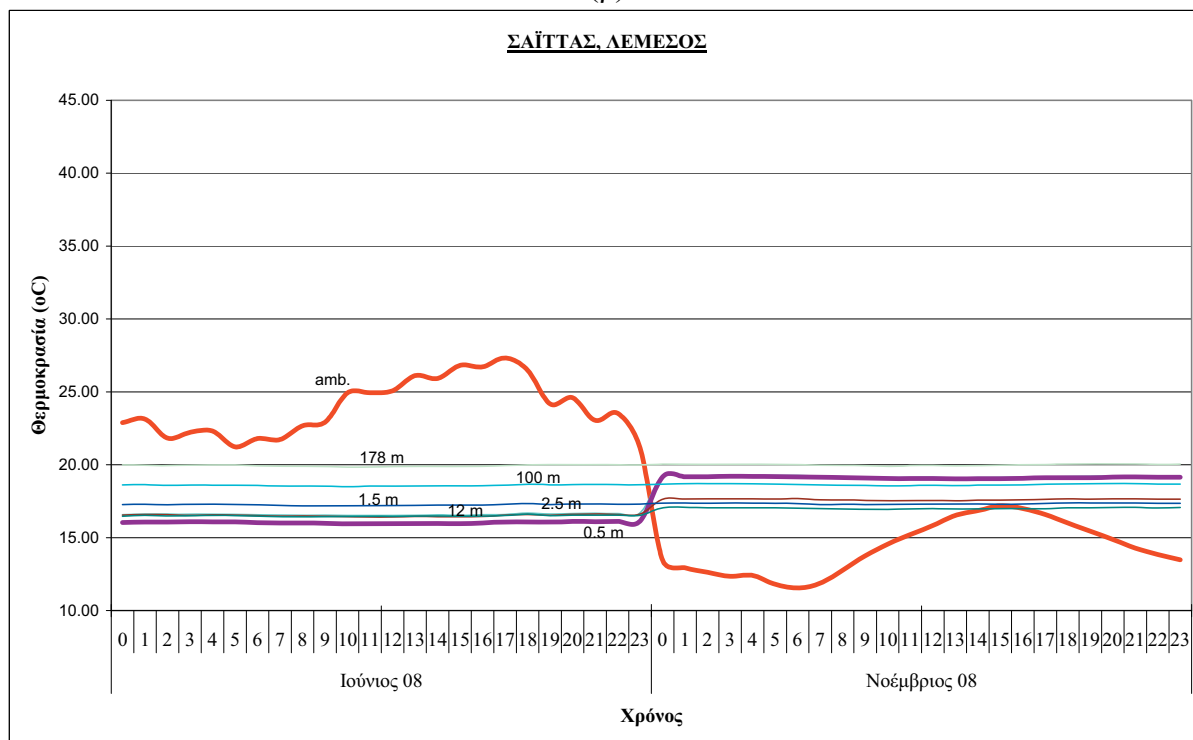
Στα Σχήματα 1(α) – 1(γ) που ακολουθούν παρατίθενται οι εναλλαγές της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη σε σχέση με την ατμοσφαιρική (amb.) κατά την διάρκεια μιας τυπικής ημέρας για τους μήνες Ιούνιο και Νοέμβριο του 2007 για τις περιοχές Αγίας Φύλας και Άγιος Γεώργιος και για τους μήνες Ιούνιο και Νοέμβριο του 2008 για την περιοχή Σαϊττά.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 1: Τυπική ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάφορα βάθη για τους μήνες Ιούνιο και Νοέμβριο στις περιοχές (α) Αγίας Φύλας, (β) Αγ. Γεώργιου και (γ) Σαϊττά στη Λεμεσό.

Από τα πιο πάνω σχεδιαγράμματα διακρίνεται η επιφανειακή ζώνη που επηρεάζεται από την ημερήσια μεταβολή τη θερμοκρασίας και φτάνει μέχρι και 0.5 μ βάθος. Από 0.5 μ έως και τα 7 μ βάθος περίπου, εκτείνεται η αβαθής ζώνη η οποία επηρεάζεται μόνο από τις εποχιακές

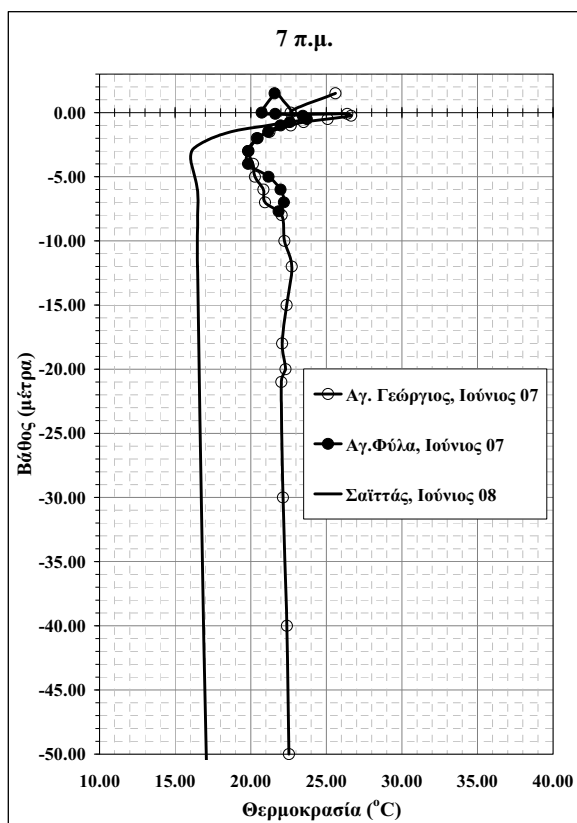
αλλαγές της θερμοκρασίας. Η βαθύτερη ζώνη ξεκινά από τα 7 μ και μένει ανεπηρέαστη από τις διακυμάνσεις των καιρικών συνθηκών.

Αξιοσημείωτη είναι και η μετακίνηση σε χαμηλότερα επίπεδα των καμπύλων που περιγράφουν την θερμοκρασία του εδάφους στα διάφορα βάθη αλλά και την ατμοσφαιρική θερμοκρασία στην περιοχή Σαϊττά, σε σχέση με τις άλλες δύο περιοχές συλλογής πληροφοριών. Αυτό μπορεί να διαφανεί επίσης και στα σχήματα 2(α) – 2(δ) πιο κάτω όπου αντιπαρατίθενται οι θερμοκρασίες του εδάφους σε σχέση με το βάθος στα 3 σημεία συλλογής πληροφοριών, για τις ώρες 7 το πρωί και 2 το απόγευμα για μια τυπική μέρα του Ιουνίου και Νοεμβρίου.

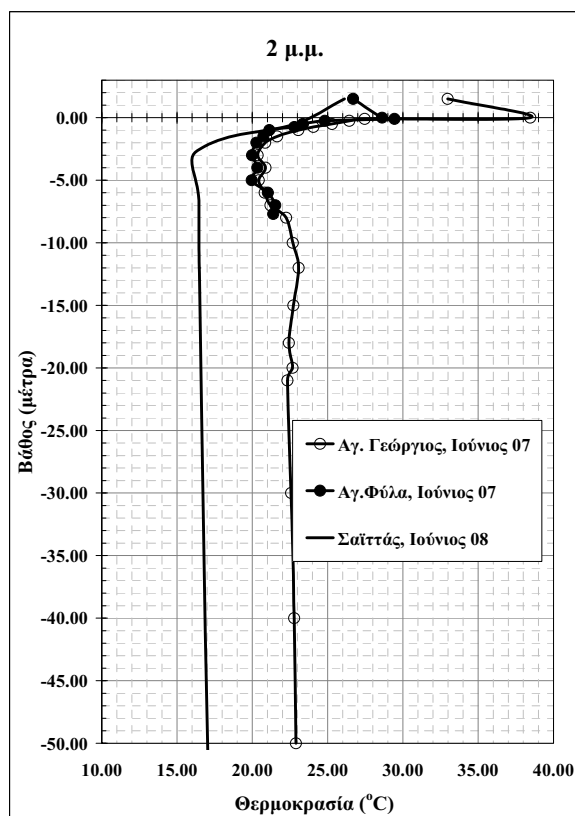
Η θερμοκρασία στην επιφανειακή ζώνη ακολουθεί πιστά την διακύμανση της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας, με την θερμοκρασία στην επιφανειακή ζώνη να είναι περίπου 1 °C πιο χαμηλή από την ατμοσφαιρική θερμοκρασία. Η μέση ημερήσια θερμοκρασία μειώνεται όσο αυξάνεται το υψόμετρο της περιοχής από την επιφάνεια της θάλασσας. Σημαντική μείωση παρουσιάζουν επίσης και η μέγιστη και ελάχιστη ημερήσια ατμοσφαιρική θερμοκρασία από την μέση ημερήσια στην περιοχή Σαϊττά, σε σχέση με τα άλλα δύο σημεία συλλογής πληροφοριών. Σημαντική μπορεί να χαρακτηριστεί και η μείωση των θερμοκρασιών, ατμοσφαιρικής και επιφανειακής ζώνης, από τον μήνα Ιούνιο στον μήνα Νοέμβριο.

Η αβαθής ζώνη παρουσιάζει μια πιο σταθερή μέση θερμοκρασιακή μεταβολή σε σχέση με την επιφανειακή ζώνη. Επηρεάζεται μόνο από την εποχιακή αλλαγή, με τις θερμοκρασίες μεταξύ των μηνών Ιουνίου και Νοεμβρίου να παρουσιάζουν σταθερή διαφορά. Στην βαθύτερη ζώνη παρουσιάζεται η αναμενόμενη σταθερότητα στην θερμοκρασία του εδάφους τόσο μεταξύ των τριών σημείων συλλογής πληροφοριών όσο και σε σχέση με την εποχή. Το πιο σημαντικό σημείο είναι η περίπου 4 °C μείωση που παρουσιάζει η μέση θερμοκρασία στην βαθύτερη ζώνη στην περιοχή Σαϊττά, σε σχέση με τις άλλες δύο περιοχές. Συγκριτικά στοιχεία για τη μέση θερμοκρασία στις τρεις ζώνες και την ατμοσφαιρική για τα τρία σημεία συλλογής πληροφοριών δίδονται στον πίνακα 2 πιο κάτω.

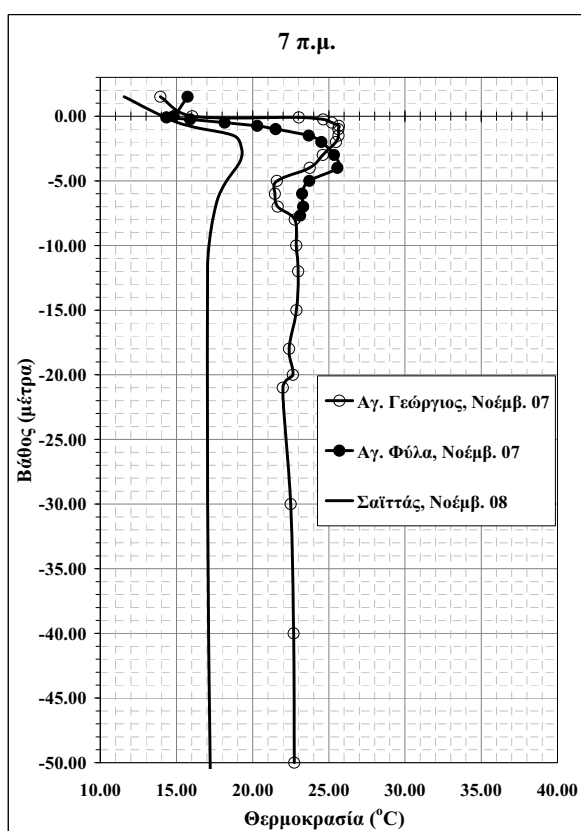
Πίνακας 2: Τυπικές μέσες θερμοκρασίες στα 3 σημεία συλλογής πληροφοριών.						
Μέση ημερήσια θερμοκρασία (°C)	Ιούνιος			Νοέμβριος		
	Αγία Φύλα	Άγιος Γεώργιος	Σαϊττάς	Αγία Φύλα	Άγιος Γεώργιος	Σαϊττάς
Ατμοσφαιρική	33.84	25.95	23.90	17.26	22.19	14.30
Επιφανειακή ζώνη	32.00	27.05	22.86	16.27	24.41	14.82
Αβαθής ζώνη	22.65	21.67	16.96	23.02	24.61	18.65
Βαθύτερη ζώνη	21.20	22.40	18.07	22.90	22.89	18.25



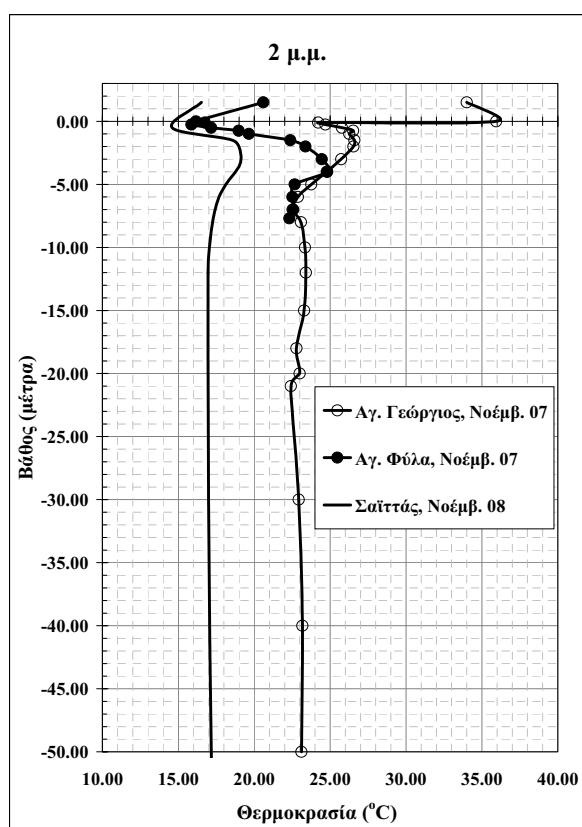
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 2: Σύγκριση της θερμοκρασίας του εδάφους στα 3 σημεία συλλογής πληροφοριών για τον μήνα Ιούνιο στις (α) 7π.μ. και (β) 2μ.μ. και το μήνα Νοέμβριο στις (γ) 7π.μ. και (δ) 2μ.μ.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της μελέτης αυτής ήταν η διερεύνηση της δομής του εδάφους και η μέτρηση της θερμοκρασίας του σε διάφορα βάθη σε διάφορες περιοχές της Κύπρου και πιο συγκεκριμένα στις περιοχές Αγίου Γεωργίου, που αντιπροσωπεύει μια τυπική αστική περιοχή στην Λεμεσό, Αγίας Φύλας, που αντιπροσωπεύει μια εξελισσόμενη αστική περιοχή βόρεια της Λεμεσού και Σαϊττά, που αντιπροσωπεύει μια ημιορεινή περιοχή με υψόμετρο 660 μ. Στόχος είναι η δημιουργία βάσης δεδομένων που να αφορά τα γεωθερμικά χαρακτηριστικά της Κύπρου σε διάφορες περιοχές.

Με βάση τα υπάρχοντα δεδομένα, διαφαίνεται ότι παρ' όλες τις διαφορές στην μορφολογία του εδάφους, η επιφανειακή, αβαθής και βαθύτερη ζώνη συμπίπτουν και για τα τρία σημεία συλλογής πληροφοριών. Η επιφανειακή ζώνη φτάνει σε βάθος έως και 0.5 μ. και η αβαθής έως και 7 μ.

Η βαθύτερη ζώνη που ξεκινά από βάθος 7 μ. έχει σταθερή θερμοκρασία περίπου 22.3 °C στις περιοχές Αγ. Φύλας και Αγ. Γεωργίου και περίπου 4 °C χαμηλότερη, 18.1 °C, στην περιοχή Σαϊττά. Αυτό οφείλεται κυρίως στη χαμηλότερη ατμοσφαιρική θερμοκρασία της περιοχής σε σχέση με τα άλλα 2 σημεία καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου.

Η συνέχιση της συλλογής των πληροφοριών αυτών για 1 περίπου χρόνο θα βοηθήσει στην επιβεβαίωση των πιο πάνω αποτελεσμάτων καθώς και στον υπολογισμό της χρονικής καθυστέρησης που παρουσιάζει η αλλαγή της θερμοκρασίας στα διάφορα βάθη σε σχέση με την ατμοσφαιρική. Στο παρόν στάδιο αυτή υπολογίζεται στις 15 μέρες για βάθος 1μ. έως και 3 μήνες για βάθη έως και 5 μ.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Pouloupatis D.P., Florides G., Tassou S. and Kalogirou S., 'Ground Heat Exchangers and Ground Temperatures in Cyprus', X WREC 2008, Glasgow, Scotland, 2008.
- [2] Popiel C.O., Wojtkowiak J. and Biernacka B., 'Measurements of temperature distribution in ground', *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 25, pp. 301-309, 2001.
- [3] Kelley S., 'Temperatures in the Kiowa Drill Hole', Denver museum of Nature & Science. <http://www.dmns.org/>, 2005.
- [4] Williams G.P. and Gold L.W., 'Ground temperatures', Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/cbd/cbd180_e.html. 1976.
- [5] Mands E., Sanner B., 'Shallow geothermal energy', <http://www.ubeg.de/Downloads/ShallowGeothEngl.pdf>, 2005.
- [6] Geothermal Heat Pump Consortium., <http://www.geoexchange.org>, 2003.
- [7] Sunner B., Karytsas C., Mendrinou D. and Rybach L., 'Current status of the ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe', *Geothermics*, Vol. 32, pp. 579-588, 2003.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΝΤΟΜΑΤΑΣ ΜΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Μ. Κώστογλου¹, Ν. Χρυσάφης², και Ν. Ανδρίτσος²

¹Τμήμα Χημείας Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, e-mail: kostoglu@cperi.certh.gr, τηλ. 2310-997767

²Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πεδίον Άρεως, 383 34, Βόλος, e-mail: nandrits@mie.uth.gr, τηλ. 24210-74072

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μία προσπάθεια μοντελοποίησης της διεργασίας της ξήρανσης βιομηχανικής τομάτας με τη χρήση γεωθερμικού νερού χαμηλής θερμοκρασίας, η οποία εφαρμόζεται εδώ και 10 χρόνια σε μονάδα στη Θράκη. Η διαδικασία μοντελοποίησης που ακολουθήθηκε συνίσταται από δύο στάδια: Το πρώτο αφορά στη μοντελοποίηση ξήρανσης ενός απλού τμήματος ντομάτας και το δεύτερο πραγματεύεται τη μοντελοποίηση της ξήρανσης με ρεύμα θερμού αέρα για ντομάτες που έχουν τοποθετηθεί σε δίσκους και οι οποίοι μετακινούνται με αργό ρυθμό κατ' αντιστροφή με το ρεύμα του θερμού αέρα. Το προτεινόμενο μοντέλο συσχετίζει ικανοποιητικά τις σχεδιαστικές παραμέτρους ενός ξηραντήρα ντομάτας και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως ξήρανση ορίζουμε τη χρήση της θερμότητας κάτω από επιλεγμένες συνθήκες για την απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους του νερού που υπάρχει σε ένα τρόφιμο μέσω του μηχανισμού της εξάτμισης [1]. Στόχος είναι η περιεκτικότητα σε νερό του τελικού προϊόντος να μην είναι μεγαλύτερη από 20 % κ.β. Η ξήρανση ή αφυδάτωση φρούτων και λαχανικών είναι από τις παλαιότερες μορφές συντήρησης τροφίμων που είναι γνωστές από τον άνθρωπο. Ο κύριος λόγος που χρησιμοποιείται η ξήρανση είναι η επιμήκυνση της ζωής ενός προϊόντος στο ράφι. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μείωση της ενεργότητας του νερού που περιέχει το κάθε προϊόν. Ως ενεργότητα του νερού ορίζεται ο λόγος της τάσης ατμών του νερού μέσα στο τρόφιμο προς την τάση ατμών του κορεσμένου νερού στην ίδια θερμοκρασία.

Τα αποξηραμένα φρούτα και λαχανικά μπορούν να παραχθούν από μία ποικιλία διεργασιών ξήρανσης. Η επιλογή της διεργασίας εξαρτάται από το ίδιο το τρόφιμο που θέλουμε να αποξηράνουμε, αλλά και από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά που θέλουμε να έχει το τελικό προϊόν. Γενικά στις διεργασίες ξήρανσης ακολουθούνται τα παρακάτω στάδια: (1) *προεπεξεργασία* (διαλογή νωπών προϊόντων, προετοιμασία του τροφίμου, διαδικασίες για τη διατήρηση του χρώματος), (2) *ξήρανση* (κυρίως με τη χρήση θερμού αέρα) και (3) *μεταξηραντική επεξεργασία* (διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου και συσκευασία των προϊόντων).

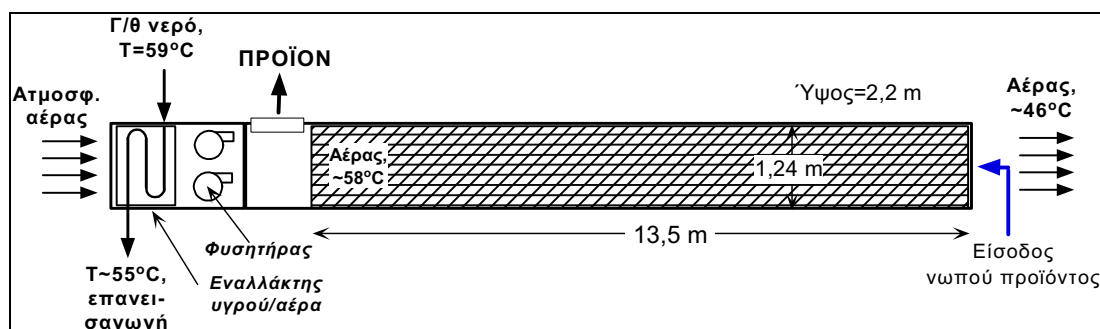
Η γεωθερμική ενέργεια μέσης θερμοκρασίας αποδεικνύεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για τη ξήρανση πολλών ευαίσθητων στη θερμοκρασία λαχανικών και φρούτων. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η μοντελοποίηση της διεργασίας της ξήρανσης ντομάτας σε ένα ξηραντήριο τύπου σήραγγας και συνεχούς λειτουργίας. Όπως συζητείται παρακάτω, η διεργασία αυτή εφαρμόζεται με επιτυχία και στη χώρα μας τα τελευταία 10 χρόνια.

2. ΞΗΡΑΝΣΗ ΜΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η αφυδάτωση-ξήρανση αγροτικών προϊόντων αποτελεί μία ενδιαφέρουσα εφαρμογή της γεωθερμικής ενέργειας χαμηλής-μέσης θερμοκρασίας, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για ευπαθή αγροτικά προϊόντα. Με στοιχεία του 2005, γεωθερμική ξήρανση καρπών, λαχανικών και φρούτων επιτελείται σε 15 χώρες στον κόσμο [2]. Η ξήρανση αγροτικών προϊόντων συμμετέχει κατά 0,8% στη συνολική χρήση θερμότητας από άμεσες εφαρμογές γεωθερμικής ενέργειας διεθνώς, οι οποίες για το 2005 ανέρχονταν σε 273372 TJ/έτος. Οι μεγαλύτερες μονάδες ξήρανσης είναι οι μονάδες ξήρανσης μηδικής, ξυλείας και χαρτοπολτού στη Ν. Ζηλανδία.

Στη χώρα μας λειτουργεί από το 2001 πρότυπη μονάδα αφυδάτωσης βιομηχανικής ντομάτας στο Νέο Εράσμιο Ξάνθης. Το αφυδατωμένο προϊόν, με μείωση της αρχικής του μάζας κατά 12 φορές, διανέμεται στην αγορά με την ονομασία «λιαστή ντομάτα». Μέχρι και σήμερα έχουν παραχθεί 68 τόνοι λιαστής ντομάτας, καθώς και 1 τόνος αφυδατωμένα σύκα, μήλα και πιπεριές. Η ξήρανση επιτελείται σε σήραγγα (οι διαστάσεις της δίνονται στο Σχήμα 1) με το θερμό αέρα να ρέει σε αντιστροφή με το προϊόν προς ξήρανση. Στη σήραγγα υπάρχουν Ν δίσκοι με ντομάτες κατά μήκος της ροής του αέρα. Σε κάθε χρονική στιγμή δτ οι δίσκοι προχωρούν κατά μία θέση, ο τελικός δίσκος με το αποξηραμένο προϊόν αποσύρεται και ένας νέος δίσκος με νωπό προϊόν προστίθεται στη γραμμή ξήρανσης. Οι θέσεις των δίσκων κατά μήκος της ροής συμβολίζονται με το δείκτη i ($i=1,2,N$). Περισσότερες λεπτομέρειες στην αναφορά [3].

Οι γεωθερμικές εφαρμογές ξήρανσης αποτελούν μονάδες μικρής κλίμακας με σημαντικό όμως τοπικό χαρακτήρα. Οι μονάδες αυτές εμφανίζουν αυξημένη ανταγωνιστικότητα καθώς το κόστος λειτουργίας τους είναι σαφώς μικρότερο από το κόστος των συμβατικών μονάδων. Παρόμοιες μονάδες μπορούν να εξασφαλίζουν σταθερό και σημαντικό εισόδημα στους αγροτικούς πληθυσμούς, ενώ αποτελούν πολύ καλό συνδυασμό με τη χρήση γεωθερμικών θερμοκηπίων καθώς τα ξηραντήρια λειτουργούν συγκεκριμένο διάστημα του έτους (κυρίως καλοκαίρι και φθινόπωρο). Πολύ σημαντικό πλεονέκτημα των γεωθερμικών ξηραντηρίων είναι ότι οι θερμοκρασίες θερμού αέρα που χρησιμοποιούνται για τη διεργασία της ξήρανσης είναι αρκετά χαμηλότερες από τις θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται στις συμβατικές βιομηχανικές μονάδες ξήρανσης. Επιτυγχάνεται έτσι παραγωγή προϊόντων με βελτιωμένη ποιότητα γεγονός που δημιουργεί ένα συγκριτικό πλεονέκτημα και βοηθάει την εμπορική τους πορεία.



Σχήμα 1: Σχηματική διάταξη της σήραγγας ξήρανσης.

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ

Η μοντελοποίηση της διεργασίας ξήρανσης αποτελείται από 2 στάδια: Στο πρώτο στάδιο γίνεται η μοντελοποίηση ενός μοναδικού τμήματος ντομάτας (μισή ντομάτα) και στο δεύτερο η μοντελοποίηση της ξήρανσης καρπών (κομμένων στη μέση) ντομάτας πάνω σε δίσκους που κινούνται αργά σε μία σήραγγα σε αντιστροφή με το θερμό αέρα. Για το πρώτο στάδιο, το

πρόβλημα έγκειται στην επιλογή (και όχι στην ανάπτυξη) ενός κατάλληλου μοντέλου ξήρανσης από τα πολλά που απαντούν στη βιβλιογραφία, τα οποία ποικίλλουν και είναι είτε εντελώς εμπειρικά είτε βασίζονται στις θεωρητικές αρχές της ξήρανσης. Το δεύτερο στάδιο απαιτεί την ανάπτυξη ενός μοντέλου που να βασίζεται στα κατάλληλα ισοζύγια μάζας και θερμότητας. Σημειώνεται ότι η διεργασία της ξήρανσης σε σήραγγα δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς στη βιβλιογραφία.

3.1. Μοντέλο ξήρανσης τμήματος ντομάτας

Τα τρόφιμα έχουν εξαιρετικά πολύπλοκη δομή και δεν υπάρχει κάποιος γενικά αποδεκτός τρόπος μοντελοποίησης της ξήρανσης, με αποτέλεσμα την ύπαρξη στη βιβλιογραφία πολλών μεθοδολογιών. Μία κοινή μεθοδολογία είναι ανάπτυξη εμπειρικών μοντέλων με την προσαρμογή των καμπυλών ξήρανσης [4]. Ορισμένες φορές επιχειρείται και η συσχέτιση των παραμέτρων που προήλθαν από την προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων με παραμέτρους που έχουν φυσική σημασία, όπως ο συντελεστής διάχυσης. Η χρήση φαινομενολογικών μοντέλων εξαρτάται από τη φύση του προς ξήρανση τροφίμου. Οι δύο κύριες κατηγορίες αποξηραμένων προϊόντων είναι τα πορώδη και μη-πορώδη προϊόντα. Οι μηχανισμοί ξήρανσης για αυτές τις δύο κατηγορίες προϊόντων είναι διαφορετικοί. Στην πρώτη περίπτωση επικρατούν τα τριχοειδή φαινόμενα και στη δεύτερη περίπτωση η μοριακή διάχυση, αν και κατά τη διεργασία ξήρανσης υλικά που είναι αρχικά μη-πορώδη μετατρέπονται σε πορώδη με την πρόοδο της ξήρανσης.

Η κύρια θεωρητική προσέγγιση στην περίπτωση των πορώδων υλικών είναι η άμεση λύση των σχετικών εξισώσεων (χρησιμοποιώντας και προχωρημένες τεχνικές όπως η μέθοδος Lattice-Boltzmann) για μία γεωμετρία παρόμοια με του υλικού. Αν και αυτή η προσέγγιση είναι εφικτή σήμερα, η αξία της για σχεδιαστικούς σκοπούς είναι ακόμη υπό διερεύνηση. Σε επόμενο επίπεδο, η γεωμετρία του υλικού απλοποιείται και αυτό θεωρείται ομογενές με αποτέλεσμα οι εξισώσεις που διέπουν τη διεργασία να μετατρέπονται σε «φαινομενικές». Στην βιβλιογραφία απαντούν τρεις προσεγγίσεις αναφορικά με τις σχέσεις που περιγράφουν τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και θερμότητας που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της ξήρανσης: (1) Το παλαιότερο για πορώδη μέσα είναι το μοντέλο ξήρανσης του Luikον, το οποίο περιλαμβάνει τις συνεξευγμένες εξισώσεις μεταφοράς μάζας και θερμότητας [5]. (2) Το απλό σχετικά μοντέλο που βασίζεται στις σχέσεις διάχυσης και αγωγής που συζευγνύονται μέσω των συνοριακών συνθηκών. Το μοντέλο αυτό ισχύει μόνο για μη-πορώδη υλικά, αλλά στη βιβλιογραφία της ξήρανσης χρησιμοποιείται και για πορώδη υλικά. (3) Η τρίτη και πλέον περίπλοκη προσέγγιση είναι το καλούμενο «πολυφασικό» μοντέλο, το οποίο περιλαμβάνει τις συνεξευγμένες εξισώσεις μεταφοράς μάζας, θερμότητας και ορμής. Είναι προφανές, ότι ένα τέτοιο μοντέλο περιέχει μεγάλο αριθμό φαινομενολογικών παραμέτρων.

Αναφορικά με τα μη-πορώδη υλικά, η προσέγγιση της μοντελοποίησης περιλαμβάνει τις εξισώσεις διάχυσης και αγωγής με συζευγμένες συνοριακές συνθήκες.

Ο καρπός της ντομάτας (*solanum lycopersicum*) είναι ένα μη-πορώδες υλικό με ιδιαίτερα ανομοιογενή δομή. Υπάρχουν περιοχές με αρκετά διαφορετικές ιδιότητες και, προφανώς, η ξήρανση του «υγρού» εσωτερικού της ντομάτας είναι ευκολότερη από την ξήρανση του υλικού κοντά στη φλούδα. Επίσης, ο βαθμός συρρίκνωσης του τελικού προϊόντος είναι ιδιαίτερα υψηλός. Παρόλη την πολυπλοκότητα της δομής της ντομάτας, οι καμπύλες ξήρανσης είναι απλές και μπορούν να παρασταθούν από ένα μοντέλο πρώτης τάξης [6-8] ή, ισοδύναμα, με ένα απλό μοντέλο διάχυσης.

Στην παρούσα εργασία θεωρείται ένα ημισφαιρικό τμήμα ντομάτας (μισή «στρόγγυλη» ντομάτα). Αν και ιδανικά η εξίσωση της διάχυσης θα έπρεπε να λυθεί σε σφαιρικές συντεταγμένες, η λύση της εξίσωσης σε κυλινδρικές συντεταγμένες είναι ρεαλιστική αφού

ουσιαστικά εξάτμιση νερού συμβαίνει μόνο στην επίπεδη (κομμένη) επιφάνεια. Στην περίπτωση ντομάτας με ακτίνα R , το ισοδύναμο πάχος της κυλινδρικής «φέτας» θα είναι:

$$V_{\text{hspher}} = V_{\text{slice}} \Rightarrow \frac{1}{2} \frac{4\pi R^3}{3} = \pi R^2 d \Rightarrow d = \frac{2R}{3} \quad (1)$$

Κανονικά το μοντέλο διάχυσης θα απαιτούσε επίσης και τη λύση της εξίσωσης αγωγής στο υλικό, αλλά, καθώς ο χρόνος ξήρανσης είναι αρκετά μεγαλύτερος από το χαρακτηριστικό χρόνο για την αγωγή της θερμότητας στην ντομάτα, οι μεταβατικές συνθήκες μπορούν να αγνοηθούν και να θεωρηθεί ότι η ντομάτα πάντα μέσα στον ξηραντήρα έχει ομοιόμορφη θερμοκρασία, ίση με τη θερμοκρασία του αέρα. Η συρρίκνωση του προϊόντος δεν λαμβάνεται άμεσα υπόψη, αλλά θεωρείται ότι η τυχόν επιτάχυνση της ξήρανσης λόγω της μείωσης του όγκου του ισοσκελίζεται από τη μείωση της διαχυτότητας καθώς μειώνεται το περιεχόμενο νερό. Έτσι, η όλη διεργασία μπορεί να μοντελοποιηθεί με μία εξίσωση διάχυσης σταθερού πάχους-σταθερής διαχυτότητας. Η μονοδιάστατη εξίσωση που διέπει τη διάχυση είναι:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (2)$$

όπου x είναι η κατακόρυφη απόσταση ($x=0$ πάνω στην επιφάνεια του δίσκου), t είναι ο χρόνος, X η υγρασία της ντομάτας σε ξηρή βάση και D η διαχυτότητα, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Μία συνοριακή συνθήκη είναι η μηδενική ροή νερού στην επιφάνεια του δίσκου (δηλ. $(\partial X / \partial x)_{x=0} = 0$), ενώ η δεύτερη είναι η συνήθης συνοριακή συνθήκη μεταφοράς μάζας με συναγωγή από το αέριο στο στερεό. Εδώ μπορεί να εισαχθεί μία ακόμη εμπειρική προσέγγιση με την αντικατάσταση της δεύτερης συνοριακής συνθήκης από τη συνοριακή συνθήκη Dirichlet θέτοντας την επιφανειακή υγρασία ίση με την υγρασία ισορροπίας X_e για συγκεκριμένες συνθήκες του αέριου ρεύματος (θερμοκρασίας T_g και υγρασίας X_g) και υποθέτοντας ότι η αναμενόμενη επίδραση της ταχύτητας του αερίου στο συνολικό ρυθμό ξήρανσης μπορεί να μεταφερθεί στη διαχυτότητα που επηρεάζεται από την ίδια παράμετρο. Έτσι η δεύτερη συνοριακή συνθήκη παίρνει τη μορφή $X(d,t)=X_e(T_g, X_g)$.

Η προσεγγιστική επίλυση της εξίσωσης (2) με τις οριακές συνθήκες της θεωρώντας ένα παραβολικό προφίλ της υγρασίας στην ντομάτα οδηγεί στην παρακάτω σχέση για την μέση υγρασία της ντομάτας:

$$\frac{dX_m}{dt} = 3D(X_m - X_e) \quad (3)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι ισοδύναμη με τον πρώτο όρο της αναλυτικής λύσης. Η παρούσα προσέγγιση καλείται προσέγγιση «γραμμικής ωθούσας δύναμης» και έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα σε μελέτες προσρόφησης. Η εξ. (3) αποτελεί συγκερασμό του θεωρητικού μηχανισμού και πειραματικών δεδομένων και συνδυάζει την απλότητα και την ευελιξία μιας σχεδιαστικής σχέσης. Σύμφωνα με αυτή τη σχέση η ταχύτητα του αέριου ρεύματος επηρεάζει την κινητική της διεργασίας (D), η υγρασία του αερίου επιδρά στην ωθούσα δύναμη (υγρασία ισορροπίας X_e) και η θερμοκρασία επηρεάζει και την κινητική και την ισορροπία.

3.2. Μοντέλο συνολικής διεργασίας ξήρανσης

Στην είσοδο της σήραγγας ξήρανσης ο θερμός αέρας έχει θερμοκρασία εισόδου T_{g0} και υγρασία X_{g0} (kg νερού/ kg αέρα) και μαζική παροχή F . Η θερμοκρασία και η υγρασία μεταβάλλονται κατά μήκος της σήραγγας ξήρανσης και αυτός είναι ο λόγος που πρέπει να αναπτυχθεί ένα μοντέλο που να περιγράφει τη συνολική διεργασία και όχι μόνο την ξήρανση μίας μοναδικής ντομάτας όπου οι δύο παράμετροι παραμένουν σταθεροί. Υποτίθεται ότι οι συνθή-

κες σε κάθε δίσκο είναι ομοιόμορφες, δηλ. στον ίδιο δίσκο οι ντομάτες ξηραίνονται με τον ίδιο ρυθμό. Αυτό υπονοεί βεβαίως ότι ο αέρας έχει σταθερές ιδιότητες πάνω από κάθε δίσκο.

Η μεταβολή της μέσης υγρασίας σε κάθε δίσκο i δίνεται από τη σχέση

$$\frac{dX_i}{dt} = \frac{3D_i}{d^2}(X_i - X_{ei}) \quad i=1,2,3,\dots,N \quad (4)$$

όπου X_{ei} είναι η υγρασία ισορροπίας που αντιστοιχεί στις τοπικές συνθήκες (T_{gi} , X_{gi}) και D_i είναι η διαχυτότητα που αντιστοιχεί στην T_{gi} . Το ισοζύγιο υγρασίας σε κάθε δίσκο είναι i (υποθέτοντας τέλεια ανάμιξη):

$$F(X_{g+1} - X_{gi}) = m_i \frac{dX_i}{dt} \quad (5)$$

Στην παραπάνω σχέση m_i είναι η μάζα της ντομάτας στο δίσκο i .

Δεν προκύπτει ανάγκη για μία σχέση που να δίνει της θερμοκρασίας τη ντομάτας, επειδή για μικρές σχετικά μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα μέσα στη σήραγγα οι ντομάτες βρίσκονται σε ισορροπία με το αέριο και έχουν πάντα την τοπική θερμοκρασία. Ένα συνολικό ισοζύγιο θερμότητας στην αέρια φάση για το δίσκο i μπορεί να γραφεί ως

$$F c_p (T_{g+1} - T_{gi}) = m_i \Delta H \frac{dX_i}{dt} \quad (6)$$

Οι συνοριακές συνθήκες για το παραπάνω πρόβλημα είναι $X_{gl} = X_{go} =$ υγρασία αερίου στην είσοδο και $T_{gl} = T_{go} =$ θερμοκρασία αερίου στην είσοδο. Στην περίπτωση διαλείπουσας διεργασίας οι αρχικές συνθήκες είναι απλά $X_l = X_o =$ αρχική υγρασία της ντομάτας. Για την περίπτωση της περιοδικά συνεχούς διεργασίας η κατάσταση είναι περισσότερο πολύπλοκη. Στη συγκεκριμένη θέση i υπάρχει μια περιοδικότητα των ιδιοτήτων της ντομάτας και του αέρα που σχετίζονται με τη χρονική περίοδο δt . Κάθε δίσκος έχει χρόνο παραμονής στη σήραγγα $N \delta t$ και η κίνησή του κατά μήκος της σήραγγας περιγράφεται (σε ένα Ολεριανό σύστημα αναφοράς) από τις παρακάτω συνθήκες ($j=1,2,\dots,N$):

$$\text{στο } t=j\delta t: X_{i+1}=X_i, X_f=X_N \quad (i=0,1,2,\dots,N-1) \quad (7)$$

όπου X_f είναι η υγρασία του τελικού προϊόντος. Εισάγονται οι παρακάτω αδιάστατες παράμετροι:

$$D_o = D(T_{go}), D_T = D(T_g)/D(T_{go}), \tau = 3D_o t/d^2, B = 3D_o m/(d^2 F), p = 3D_o \delta t/d^2 \quad (8)$$

Με τη χρήση των αδιάστατων παραμέτρων το σύστημα των εξισώσεων προς λύση διαμορφώνεται ως εξής:

$$\frac{dX_i}{d\tau} = (X_i - X_{ei}) \quad (9)$$

$$X_{gi+1} - X_{gi} = B D_{Ti} (X_i - X_{ei}) \quad (10)$$

$$T_{gi+1} - T_{gi} = B D_{Ti} (X_i - X_{ei}) \frac{\Delta H}{c_p} \quad (11)$$

Όπως προκύπτει από τις παραπάνω εξισώσεις οι κύριες σχεδιαστικές παράμετροι της διεργασίας είναι ο αριθμός των δίσκων, το αδιάστατο χρονικό βήμα και η αδιάστατη p παράμετρος B . Το παραπάνω σύστημα εξισώσεων έχει αναλυτική λύση που παρατίθεται παρακάτω. Για τη χρονική περίοδο μεταξύ $j p$ και $(j+1)p$ ισχύει ($j=0,1,2,\dots,N-1$):

$$\tau = j p + \tau' \quad (12a)$$

$$X_{j+1} = X_{ej+1} + (X_{jf} - X_{ej+1}) e^{-\tau'} \quad (12b)$$

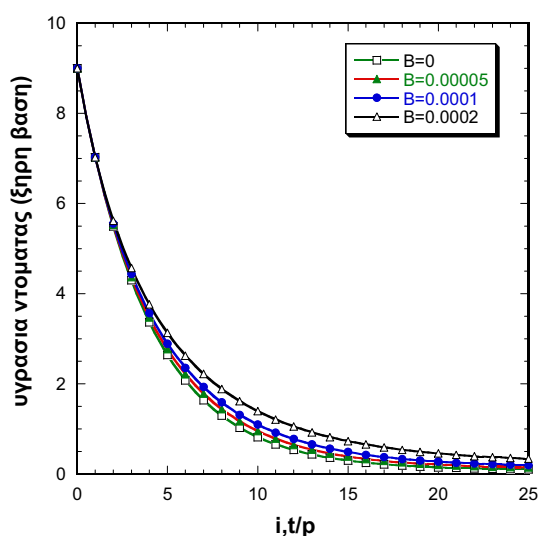
$$X_{jf} = X_{ej} + (X_{j-1f} - X_{ej}) e^{-p} \quad (12c)$$

$$X_{gj+1} = BD_{Tj}(X_j - X_{ej}) + X_{gj} \quad (12d)$$

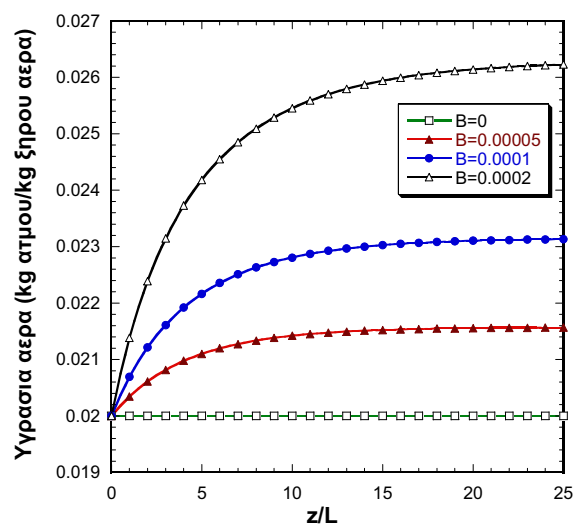
$$T_{gj+1} = BD_{Tj}(X_j - X_{ej}) \frac{\Delta H}{c_p} + T_{gj} \quad (12e)$$

όπου X_{jf} είναι η υγρασία του δίσκου j στο χρόνο $\tau=j\tau$ και $X_{1f}=X_o$. Οι παραπάνω σχέσεις, με διαδοχικές αντικαταστάσεις, δίνουν τη χωροχρονική εξέλιξη των μεταβλητών X , X_g και T_g . Η λύση είναι τύπου «Lagrangian» επειδή ο δείκτης j αναφέρεται τόσο στη θέση στο ξηραντήρα όσο και στο χρόνο. Για να εξεταστεί η εφαρμογή της παραπάνω λύσης σε ένα ειδικό αλγόριθμο, θα παρουσιαστούν ενδεικτικά αποτελέσματα που μπορούν να φανερώσουν την επίδραση των σχεδιαστικών παραμέτρων p και B στην όλη διεργασία. Θεωρείται το παρακάτω σύστημα τιμών των συνθηκών ξήρανσης, που αντιστοιχεί σχεδόν σε πραγματικές συνθήκες στον ξηραντήρα στο Ν. Εράσμιο: $X_o=9$, $X_{go}=0.02$, $T_{go}=60^\circ\text{C}$, $N=25$, $p=0.25$. Η επίδραση της παραμέτρου B απεικονίζεται στο Σχήμα 2. Οι καμπύλες σε αυτό το σχήμα μπορούν να ερμηνευτούν με δύο τρόπους: (1) ως κανονικές καμπύλες ξήρανσης του υλικού ενός συγκεκριμένου δίσκου καθώς αυτό κινείται κατά μήκος της σήραγγας ($t=0$ είναι η στιγμή που ο δίσκος εισέρχεται στη σήραγγα) και (2) ως χωρική κατανομή κατά μήκος της σήραγγας τη χρονική στιγμή $i\tau$ όπου i ακέραιος (στιγμή κατά την οποία αλλάζει θέση ο δίσκος).

Όταν $B=0$ η ταχύτητα του αέρα είναι αρκετά υψηλή ώστε να διατηρεί τις ιδιότητες του σταθερές κατά μήκος του αγωγού. Με αύξηση του B η υγρασία του αέρα αυξάνει (Σχήμα 3) και η θερμοκρασία του μειώνεται κατά μήκος του ξηραντήρα, με αποτέλεσμα την αύξηση της υγρασίας ισορροπίας της ντομάτας και, συνεπώς, τη μειωμένη ωθούσα δύναμη για ξήρανση. Σημειώνεται επίσης ότι το μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας απομακρύνεται στο μισό χρόνο παραμονής του υλικού. Αν και αυτή η συμπεριφορά ισχύει για όλες της διεργασίες ξήρανσης, φαίνεται ότι μια τέτοια συμπεριφορά είναι περισσότερο έντονη σε αυτού του είδους τον ξηραντήρα, όπως δείχνουν και υπάρχουσες μετρήσεις στη σήραγγα.

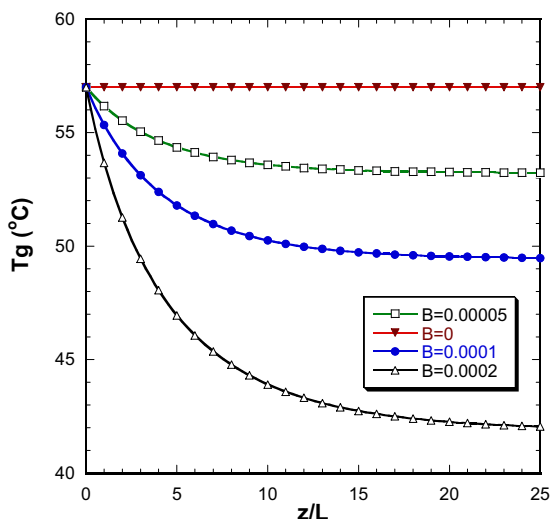


Σχήμα 2: Κατανομή της υγρασίας του προϊόντος κατά μήκος της σήραγγας

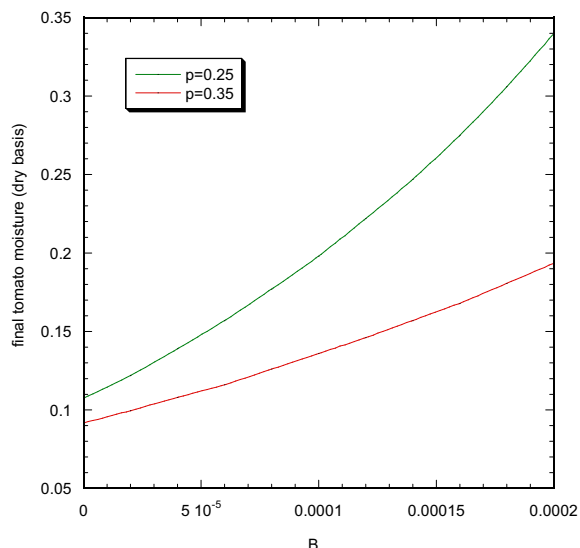


Σχήμα 3: Κατανομή της υγρασίας του αέρα κατά μήκος της σήραγγας

Η μεταβολή της υγρασίας του αέρα κατά μήκος της σήραγγας για διάφορες τιμές του B παρουσιάζονται στο Σχήμα 3. Με αύξηση του B έχουμε αύξηση της υγρασίας. Συγχρόνως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4, η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται κατά μήκος του ξηραντήρα, με το ρυθμό μείωσης να αυξάνει με το B . Από τα Σχήματα 3-5 γίνεται φανερό ότι οι πλέον απότομες αλλαγές συμβαίνουν πολύ κοντά στην είσοδο του ξηραντήρα.



Σχήμα 4: Κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος της σήραγγας



Σχήμα 5: Τελική υγρασία του προϊόντος ως συνάρτηση του αδιάστατου χρόνου ρ

Η υγρασία του τελικού προϊόντος ως συνάρτηση του B παρουσιάζεται στο Σχήμα 5 για δύο τιμές της παραμέτρου ρ. Όπως αναμενόταν, η υγρασία του προϊόντος αυξάνει με αύξηση του B και μείωση του ρ. Από ένα τέτοιο σχήμα μπορεί να γίνει η επιλογή του κατάλληλου χρόνου ξήρανσης για δεδομένες τιμές της επιθυμητής υγρασίας του τελικού προϊόντος και του B.

Η υγρασία ισορροπίας X_e υπολογίζεται με τη χρήση του εξίσωσης GAB [6], η πλέον χρησιμοποιούμενη σχέση για τρόφιμα, που δίνει αποδεκτές προβλέψεις για κάθε περίπτωση:

$$X_e = X_m C k a_w [(1 - k a_w)(1 - (1 - C) k a_w)] \quad (13)$$

όπου X_m είναι η μονομοριακή υγρασία του τροφίμου (kg νερού/kg ξηρών στερεών), a_w η ενεργότητα του νερού και C, k σταθερές που η εξάρτησή τους από τη θερμοκρασία μπορεί να περιγραφεί με τη σχέση του Arrhenius. Οι τιμές των προεκθετικών συντελεστών και των ενεργειών ενεργοποίησης, καθώς και της X_m υπάρχουν πινακοποιημένες στη βιβλιογραφία για πολλά λαχανικά. Η ενεργότητα του νερού της ντομάτας υπολογίζεται από τη σχέση, $a_w = RH/100$ όπου RH είναι η σχετική υγρασία του αέρα (%).

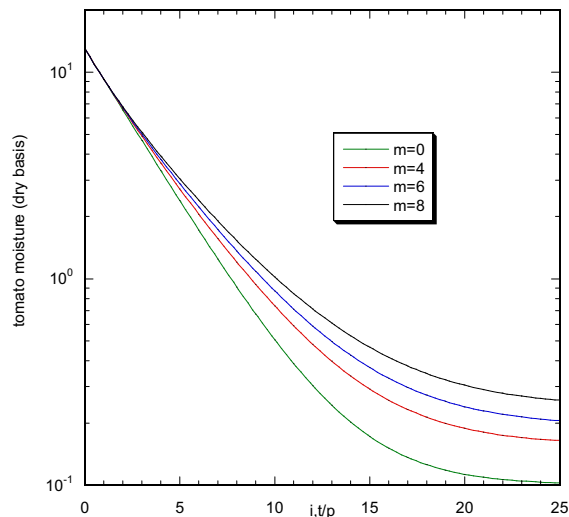
Για την επίδραση της ταχύτητας του αέρα και της θερμοκρασίας στην ενεργή διαχυτότητα του νερού στην ντομάτα χρησιμοποιείται η σχέση του Hawlander [8]:

$$D = D_0 e^{1.022u^{0.5}} e^{-3024/T_g} \quad (13)$$

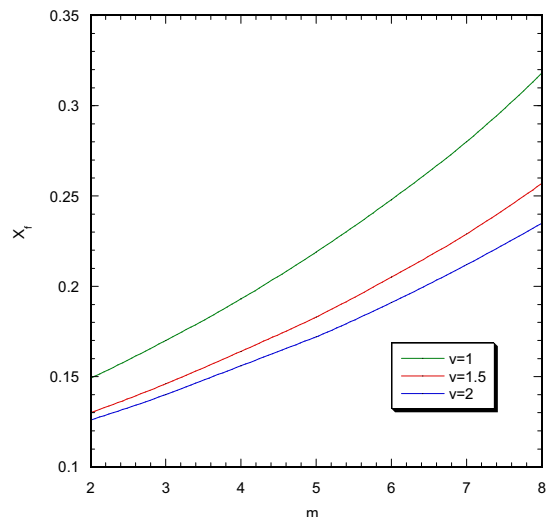
όπου u είναι η ταχύτητα του αέρα. Στην προηγούμενη παραμετρική ανάλυση, οι παράμετροι ήταν αδιάστατες και δεν ήταν απαραίτητη η γνώση του D_0 . Η τιμή του D_0 που χρησιμοποιείται από τη βιβλιογραφία είναι $D_0 = 2.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Ακολουθεί συζήτηση για το συνεχές ξηραντήρα ντομάτας στο Ν. Εράσμιο. Η συνολική παροχή αέρα είναι $28000 \text{ m}^3/\text{hr}$, η μοριακή υγρασία εισόδου είναι 4% (που αντιστοιχεί σε σχετική υγρασία 22%) και η θερμοκρασία του θερμανθέντος με γεωθερμικό νερό αέρα 58°C . Υπάρχουν 32 σειρές δίσκων και κάθε σειρά περιλαμβάνει $N=25$ δίσκους. Το χρονικό βήμα Δt είναι 1 ώρα. Η απόσταση ανάμεσα στους δίσκους είναι τέτοια που η μέση ταχύτητα του αερίου είναι 1.5 m/s . Η παράμετρος που θα εξεταστεί είναι η μαζική φόρτιση του δίσκου, m (σε kg ντομάτες). Η καμπύλη ξήρανσης για ένα συγκεκριμένο δίσκο (ή, ισοδύναμα, η κατανομή υγρασίας κατά μήκος του ξηραντήρα) παρουσιάζεται στο Σχήμα 6 για διαφορετικές τιμές της φόρτισης m. Στο όριο της μηδενικής φόρτισης η τελική υγρασία είναι

10%, αλλά για φορτίσεις με πρακτικό ενδιαφέρον η υγρασία του προϊόντος είναι αρκετά μεγαλύτερη και αυξάνει με τη φόρτιση. Ο άλλος τρόπος για να διατηρηθεί χαμηλή υγρασία στο προϊόν είναι να αυξηθεί η ταχύτητα του αέρα, κάτι όμως που αυξάνει την πτώση πίεσης. Στο Σχήμα 7 φαίνεται η τελική υγρασία της ντομάτας συνάρτηση της φόρτισης m (kg ανά δίσκο) για διάφορες τιμές της ταχύτητας του αέρα.



Σχήμα 6: Κατανομή υγρασίας κατά μήκος του ξηραντήρα για διαφορετικές φορτίσεις ντομάτας (kg/δίσκο)



Σχήμα 7: Τελική υγρασία του προϊόντος ως συνάρτηση της ταχύτητας του αέρα u

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το μοντέλο της «συνεχούς» ξήρανσης τροφίμων που αναπτύχθηκε σε αυτή την εργασία, με τη βοήθεια ορισμένων δεδομένων ξήρανσης για κάποιο συγκεκριμένο προϊόν (π.χ. να βρεθεί το D_0), μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση της συνεχούς διεργασίας ξήρανσης με τη βοήθεια της γεωθερμικής ενέργειας. .

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Fellows, P.J., 'Food Processing Technology: Principles and Practice', CRC Press, New York, pp. 311-339, 2000.
2. Lund, J.W., Freeston, D.H., Boyd, T.L., 'Direct application of geothermal energy: 2005 Worldwide review', Geothermics 34, 691-727, 2005.
3. Andritsos, N., Dalampakis, P., Kolios, N., 'Use of Geothermal Energy for Tomato Drying', GHC bulletin, 2003.
4. Mujumdar, A.S., 'Handbook of Industrial Drying', Marcel Dekker Inc., New York, pp. 137-145, 1987.
5. Luikov, A.V., 'Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies', Int. J. Heat Mass Transfer 18, 1-14, 1975.
6. Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B., Tsami, E., Marinos-Kouris, D., 'Equilibrium Moisture Content and Heat of Desorption of Some Vegetables', J. Food Engineering, 20, 55-74, 1993.
7. Krokida, M.K., Karathanos, V.T., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D., 'Drying Kinetics of Some Vegetables', J. Food Engineering, 59, pp. 391-403, 2003.
8. Hawlader, M.N.A., Uddin, M.S., Ho, J.S., Teng, A.B.W., 'Drying Characteristics of Tomatoes', J. Engineering, 14, 259-268, 1991.

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Ν. Ανδρίτσος¹, Α. Αρβανίτης², Μ. Παπαχρήστου³ και Μ. Φυτίκας³

¹ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πεδίον Άρεως 383 34, Βόλος, e-mail: nandrits@mie.uth.gr, τηλ. 24210-74072

² Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Γ' Είσοδος, Ολυμπιακό Χωριό 136 77, Αχαρναί Αττικής, e-mail: arvanitis@igme.gr

³ Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 541 24 Θεσσαλονίκη, e-mail: fytkas@geo.auth.gr, mariap@geo.auth.gr, τηλ. 2310-998475

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εγκατεστημένη ισχύς γεωθερμικών εφαρμογών χαμηλής ενθαλπίας στο τέλος του 2008 υπερβαίνει τα 115 MW_{th}. Το κύριο χαρακτηριστικό των γεωθερμικών εφαρμογών τα τελευταία 3-4 χρόνια είναι η αλματώδης ανάπτυξη των συστημάτων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, ενώ οι «κλασσικές» γεωθερμικές εφαρμογές (θέρμανση θερμοκηπίων και λουτρο-θεραπευτικές μονάδες) παρουσιάζουν μία διαρκή στασιμότητα τα τελευταία 10 χρόνια. Η θέρμανση κτιρίων, οι υδατοκαλλιέργειες και η ξήρανση αγροτικών προϊόντων έχουν έτσι κι αλλιώς μικρή σχετικά ανάπτυξη μέχρι τώρα. Με τα σημερινά τεχνικά και οικονομικά δεδομένα, η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μπορεί να επιτευχθεί από ρευστά μέσης ενθαλπίας με το δυαδικό κύκλο (σε μερικά νησιά του Αιγαίου, την Ανατολική Μακεδονία και Θράκη) και από ρευστά υψηλής ενθαλπίας με το συνδυασμένο κύκλο στη Μήλο και τη Νίσυρο. Και στα δύο συστήματα θα πρέπει να γίνεται επανεισαγωγή του συνόλου των γεωθερμικών ρευστών στον ταμιευτήρα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ελλάδα είναι μια χώρα ιδιαίτερα ευνοημένη γεωθερμικά. Η γεωτεκτονική της θέση στα νότια περιθώρια της Ευρασιατικής λιθοσφαιρικής πλάκας δημιουργεί συνθήκες έντονης και ενεργού τεκτονικής αλλά και ηφαιστειακής δραστηριότητας, που με τη σειρά τους ευνοούν την υψηλή ροή θερμότητας και τη δημιουργία γεωθερμικών πεδίων. Περιοχές ιδιαίτερου γεωθερμικού ενδιαφέροντος με υψηλή θερμική ροή είναι: (α) το ενεργό ηφαιστειακό τόξο του Νοτίου Αιγαίου (Μήλος, Κίμωλος, Νίσυρος, Σαντορίνη, Μέθανα, Σουσάκι, Κως), (β) οι Τριτογενείς ιζηματογενείς λεκάνες στην Ανατολική Μακεδονία και Θράκη, (γ) τα νησιά του Ανατολικού Αιγαίου (Σαμοθράκη, Λήμνος, Λέσβος, Χίος, Ικαρία) και (δ) οι γρανιτικές διεισδύσεις, που από μόνες τους παράγουν θερμότητα και συνεισφέρουν στην αυξημένη ροή θερμότητας [1]. Τα γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας Μήλου και Νισύρου έχουν βεβαιωμένο γεωθερμικό δυναμικό της τάξης των 25 MWe, ενώ το εκτιμώμενο υπερβαίνει τα 250 MWe (200 MWe στη Μήλο και 50 MWe στη Νίσυρο).

Πιθανές περιοχές για τον εντοπισμό ρευστών μέσης ενθαλπίας, τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με δυαδικό κύκλο αποτελούν οι ιζηματογενείς λεκάνες της Βόρειας Ελλάδας (Λεκάνες Στρυμόνα, Δέλτα Νέστου, Ξάνθης-Κομοτηνής, Έβρου-Αλεξανδρούπολης), η περιοχή Ακροποτάμου Καβάλας, η Λέσβος, η Σαμοθράκη και η Χίος [2].

Οι μακροχρόνιες γεωθερμικές έρευνες, που διεξάγει το Ι.Γ.Μ.Ε. από τις αρχές τις δεκαετίας του 1970, οδήγησαν στον εντοπισμό πολύ αξιόλογων γεωθερμικών κοιτασμάτων χαμηλής

ενθαλπίας σε όλη την Ελλάδα. Στη Βόρεια Ελλάδα διαπιστώθηκαν σημαντικά γεωθερμικά πεδία με θερμοκρασίες 30-90°C, στις περιοχές: (α) της Δυτικής Μακεδονίας (Φλώρινα, Πτολεμαΐδα), (β) της Λεκάνης Αλμωπίας, (γ) της ευρύτερης Λεκάνης Θεσσαλονίκης, (δ) της Λεκάνης Ανθεμούντα Θεσ/νίκης, (ε) της Λεκάνης Μυγδονίας Θεσ/νίκης (γεωθερμικά πεδία Λαγκαδά, Νυμφόπετρας, Βόλβης), (στ) της Ν. Τρίγλιας και της Χερσονήσου Κασσάνδρας Χαλκιδικής, (ζ) της Λεκάνης Στρυμόνα (γεωθερμικά πεδία Θερμών Νιγρίτας, Σιδηροκάστρου, Λιθοτόπου-Ηράκλειας, Αγκίστρου και Αχινού-Ιβήρων του Ν. Σερρών), (η) του Στρυμονικού Κόλπου (πεδίο Ακροποτάμου Καβάλας), (θ) της πεδιάδας στο Δέλτα του Ποτ. Νέστου (πεδία Ερατεινού Καβάλας και Ν. Εράσμιου Ξάνθης), (ι) της Λεκάνης Ξάνθης - Κομοτηνής (πεδία Ν. Κεσσάνης, Λίμνης Μητρικού, Σαππών) και (ια) της Λεκάνης Αλεξανδρούπολης - Έβρου (γεωθερμικό πεδίο Αρίστηνου, περιοχή Τυχερού). Στην υπόλοιπη χώρα αξιόλογα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας και περιοχές σημαντικού γεωθερμικού ενδιαφέροντος έχουν εντοπισθεί στη Λέσβο (Άργεννος, Πολιχνίτος, Στύψη - Καλλονή), τη Χίο (Νένητα, Θυμιανά), τη Βόρεια Εύβοια (Αιδηψός, Γιάλτρα - Χερσώνησος Λιχάδων), τη Λεκάνη του Σπερχείου (Θερμοπύλες, Καμένα Βούρλα, Υπάτη, Πλατύστομο), το Σουσάκι Κορινθίας, τα Μέθανα, την Κίμωλο, τη Σαντορίνη, την Κύθνο, την Κω, το Σμόκοβο Καρδίτσας, τις Συκιές Άρτας, την Κόνιτσα (Καβάσιλα, Αμάραντος), τη Ρίζα Αντιρρίου κ.ά. Το γεωθερμικό δυναμικό των πόρων χαμηλής ενθαλπίας υπερβαίνει τα 1000 MW_{th} παρέχοντας τη δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας, που αντιστοιχεί σε περισσότερους από 220.000 Τ.Ι.Π./έτος. Παρά το μεγάλο γεωθερμικό δυναμικό της χώρας, η αξιοποίησή του βρίσκεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

2. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Οι άμεσες θερμικές χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας στην Ελλάδα στο τέλος του 2008 παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς τους έφθασε το 2008 τα 115 MW_{th} έναντι περίπου των 57 MW_{th} που ήταν το 2000 [3] και των 75 MW_{th} το 2005 [4]. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής αύξησης αποδίδεται στη ραγδαία διάδοση των συστημάτων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Οι υπόλοιπες εφαρμογές δεν παρουσιάζουν σαφή διαφοροποίηση τα τελευταία 10 χρόνια, αν και υπάρχει μια μικρή αύξηση της επιφάνειας που πραγματοποιείται θέρμανση εδάφους για πρωίμηση σπαραγγιών. Αρκετά γεωθερμικά θερμοκήπια (σε Νιγρίτα Σερρών, Λαγκαδά, Ελαιοχώρια Χαλκιδικής και Ν. Κεσσάνη Ξάνθης), καθώς και η μικρή μονάδα αφαλάτωσης στην Κίμωλο είναι εκτός λειτουργίας για λόγους που δεν σχετίζονται άμεσα με τη γεωθερμία. Επίσης, παρά τη σημαντική συμμετοχή της λουτροθεραπείας και των ανοιχτών και κλειστών κολυμβητικών δεξαμενών (πισίνων) στη συνολική ισχύ, αυτός ο τομέας (με μερικές εξαιρέσεις) δεν έχει δείξει καμιά τάση επέκτασης ή χρήσης των γεωθερμικών νερών για τη θέρμανση των κτιριακών εγκαταστάσεων. Τέλος, εξαιτίας διοικητικών-διαχειριστικών προβλημάτων ανεστάλη η ολοκλήρωση ενός προγράμματος ισχύος 2 MW_{th} στον Λαγκαδά Θεσσαλονίκης για τη θέρμανση και ψύξη δημόσιων κτιρίων με γεωθερμικές αντλίες θερμότητας χρησιμοποιώντας ρηχές γεωτρήσεις με νερά θερμοκρασίας 20-40°C.

2.1. Θερμοκήπια και θέρμανση εδάφους

Τα πρώτα γεωθερμικά θερμοκήπια κατασκευάστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1980 στη Νέα Απολλωνία και στο Λαγκαδά Θεσσαλονίκης, στη Νιγρίτα Σερρών, στη Ν. Κεσσάνη Ξάνθης και στον Πολιχνίτο της Λέσβου. Σήμερα, τα γεωθερμικά θερμοκήπια σε όλη την χώρα καλύπτουν έκταση 18,2 ha (182 στρέμματα) και έχουν συνολική εγκατεστημένη ισχύ 18,3 MW_{th}. Από το 1995 και μετά δεν διαπιστώνεται καμιά πραγματική αύξηση στη συνολική έκταση που καλύπτουν τα γεωθερμικά θερμοκήπια.

Από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 αναπτύχθηκε η υπεδάφια θέρμανση εδάφους με χρήση του γεωθερμικού νερού για την καλλιέργεια πρώιμων σπαραγγιών στο Νέο Εράσμιο Ξάνθης,

η οποία σήμερα καταλαμβάνει έκταση περίπου 100 στρεμμάτων (10 ha). Η θέρμανση του εδάφους αρχίζει συνήθως στα μέσα Ιανουαρίου και τα πρώιμα σπαράγγια παράγονται μεταξύ Φεβρουαρίου και Απριλίου και διατίθενται σε τιμές μεγαλύτερες από αυτές των σπαραγγιών εντός εποχής. Η θέρμανση του εδάφους επιτυγχάνεται με άμεση ροή γεωθερμικού νερού μέσα σε σωλήνες πολυπροπυλενίου (PP) με πτυχώσεις, που έχουν εξωτερική διάμετρο 28 mm και τοποθετούνται υπόγεια (μέσα στο έδαφος). Η θέρμανση του εδάφους μπορεί να αυξήσει την θερμοκρασία του εδάφους κατά 4-10°C ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, την παροχή του νερού και τη θερμοκρασία, την παρουσία καλύμματος κτλ [5]. Στη Νιγρίτα Σερρών μια εγκατάσταση υπεδάφιας θέρμανσης, έκτασης περίπου 30 στρεμμάτων βρίσκεται εκτός λειτουργίας από το 2003, ενώ η μονάδα στη Νυμφόπετρα Θεσσαλονίκης επεκτάθηκε κατά 20 στρέμματα, με αποτέλεσμα να καλύπτει σήμερα έκταση 7 ha. Μια νέα μονάδα θέρμανσης εδάφους, έκτασης 20 στρεμμάτων, εγκαταστάθηκε στο Μυρωδάτο Ξάνθης το 2005, η οποία ενώ αρχικά σχεδιάστηκε για πρωίμηση καρπουζιών, τον επόμενο χρόνο χρησιμοποιήθηκε για καλλιέργεια σπαραγγιών εκτός εποχής. Τέλος, ένα νέο και πολλά υποσχόμενο εγχείρημα υλοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του 2006 στη Χρυσούπολη Καβάλας με τη θέρμανση εδάφους έκτασης 10 στρεμμάτων για την πρωίμηση σπαραγγιών χρησιμοποιώντας ανοικτό σύστημα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας (υπόγειο νερό). Η συνολική καλλιεργημένη έκταση με υπεδάφια θέρμανση ανέρχεται στα 20 ha (τέλος 2008).

Πίνακας 1. Γεωθερμικές εφαρμογές στην Ελλάδα (τέλος 2008)			
Χρήση	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW _{th}) - 2008	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW _{th}) - 2000	Ετήσια Χρήση Ενέργειας (10 ¹² J) - 2008
Θέρμανση χώρων	1,4	1,13	16
Θέρμανση θερμοκηπίων & Θέρμανση εδάφους	28	20,6	248
Ξήρανση αγροτικών προϊόντων	0,8	0	4
Υδατοκαλλιέργειες*	9,3	-	76
Ιαματικός Τουρισμός & Λουτροθεραπεία	36,0	35,0	182
Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας	40	0,4	200
Σύνολο	115,5	57,13	726
* Ιχθυοκαλλιέργειες & Καλλιέργεια <i>Spirulina</i>			

2.2. Θέρμανση χώρων

Στον τομέα της θέρμανσης χώρων δεν υπάρχει καμιά εξέλιξη. Η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας για το σκοπό αυτό εφαρμόζεται μόνο σε ένα συγκρότημα λουτροθεραπείας στην Τραϊανούπολη του Ν. Έβρου, σε ξενοδοχείο στη Μήλο, σε μερικά μεμονωμένα σπίτια σε Μακεδονία και Θράκη και σε ένα σχολείο στις Θέρμες Ξάνθης. Στην Τραϊανούπολη λειτουργεί το σύστημα θέρμανσης του κτιριακού συγκροτήματος των Λουτρών (πτέρυγες διαμονής, υδροθεραπευτήριο, εστιατόριο) έκτασης 1300 m². Η θέρμανση των χώρων επιτυγχάνεται με ενδοδαπέδιες σωληνώσεις και θερμαντικά σώματα, στα οποία κυκλοφορεί θερμό νερό, που θερμαίνεται μέσω εναλλάκτη πλακών (από τιτάνιο) από γεωθερμικό ρευστό θερμοκρασίας 52°C με παροχή 50 m³/h [6]. Στις Θέρμες Ξάνθης γίνεται θέρμανση χώρων του Γυμνασίου, συνολικής επιφάνειας περίπου 60 m², από γεωθερμικά νερά θερμοκρασίας 51,5°C. Η θέρμανση οικιών στη Μήλο επιτυγχάνεται με ένα είδος «υποβρύχιου εναλλάκτη θερμότητας». Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από μεταλλικό σωλήνα σχήματος U, που βυθίζεται σε ρηχή (20m) γεωθερμική γεώτρηση, με νερά 60°C, και ο οποίος άμεσα συνδέεται με θερμαντικά

σώματα των σπιτιών. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί σύστημα σωλήνων τοποθετημένων μέσα στη γεώτρηση, και ένα κυκλοφορούν ρευστό (συνήθως καθαρό νερό) αντλείται μέσω των σωλήνων ή αφήνεται να κυκλοφορεί με φυσική ροή προκειμένου να αποσπάσει θερμότητα από το νερό της γεώτρησης. Η συνολική εγκατεστημένη θερμική ισχύς των μονάδων θέρμανσης χώρων στην Ελλάδα εκτιμάται στα 1,4 MW_{th}.

2.3. Ξήρανση αγροτικών προϊόντων

Μια μονάδα αφυδάτωσης ντομάτας λειτουργεί από το 2001 στο Ν. Εράσμιο Ξάνθης και παράγει αποξηραμένες ντομάτες. Αυτή η μονάδα χρησιμοποιεί γεωθερμικό νερό χαμηλού κόστους για να θερμάνει τον ατμοσφαιρικό αέρα στους 55-56°C μέσω εναλλάκτη εκτεινόμενης επιφάνειας υγρού-αέρα [7]. Κατά τη διάρκεια των 8 χρόνων λειτουργίας παράχθηκαν περίπου 70 τόνοι «λιαστής» ντομάτας. Η μονάδα μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί ώστε να αποξηραίνει και πολλά άλλα λαχανικά (π.χ. πιπεριές, κρεμμύδια, μανιτάρια) ή φρούτα. Πράγματι, πάνω από 1000 κιλά πιπεριές, σύκα και βερίκοκα έχουν αποξηρανθεί μέχρι σήμερα. Η εγκατεστημένη θερμική ισχύς της μονάδας αυτής εκτιμάται σε 0,8 MW_{th}.

2.4. Υδατοκαλλιέργειες

Μονάδες χρήσης γεωθερμικών νερών για αντιπαγετική προστασία και θέρμανσης τεχνητών λιμνών ιχθυοκαλλιέργειας λειτουργούν στο Πόρτο Λάγος και το Ν. Εράσμιο Ξάνθης από το 1998. Αφορούν κυρίως τη θέρμανση των λιμνών διαχείμασης ψαριών, όπως οι τσιπούρες, που είναι πολύ ευαίσθητα στην απότομη πτώση της θερμοκρασίας κατά τη χειμερινή περίοδο. Στο Πόρτο Λάγος, το γεωθερμικό νερό προέρχεται από δύο (2) παραγωγικές γεωτρήσεις κοντά στις τεχνητές λίμνες. Η αντιπαγετική προστασία μιας τεχνητής λίμνης διαχείμασης 0,48 ha απαιτεί παροχή μέχρι 40 m³/h γεωθερμικών ρευστών μέσης θερμοκρασίας 34°C [8]. Η εισαγωγή θερμότερων ρευστών μέσα στην λίμνη όχι μόνο προστάτευσε τα ψάρια από τις άσχημες καιρικές συνθήκες αλλά αύξησε και την παραγωγή τους. Στην εγκατάσταση του Ν. Εράσμιου, το νερό με παροχή 60 m³/h και θερμοκρασία 60°C μεταφέρεται από απόσταση 4,5 km με μονωμένους πλαστικούς σωλήνες. Εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας του, το γεωθερμικό νερό αρχικά αναμιγνύεται με θαλασσινό και το τελικό μίγμα εισάγεται στις τεχνητές λίμνες με μέση θερμοκρασία 30°C [5]. Η εγκατεστημένη θερμική ισχύς και των δύο αυτών εγκαταστάσεων, στο Πόρτο Λάγος και στο Ν. Εράσμιο, υπερβαίνει τα 8 MW_{th}. Η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας σ' αυτές τις ιχθυοκαλλιέργειες αποδείχθηκε απολύτως απαραίτητη κατά τη διάρκεια του έντονου παγετού τις περιόδους 2001-2002 και 2002-2003 και απέτρεψε την ολοκληρωτική καταστροφή των ψαριών. Και οι δύο επενδύσεις αποσβέστηκαν κατά τη διάρκεια των τριών (3) πρώτων ετών λειτουργίας των εγκαταστάσεων.

Μια διαφορετική γεωθερμική εφαρμογή στον τομέα των υδατοκαλλιεργειών στην Ελλάδα αφορά στην καλλιέργεια του κυανοπράσινου μικροφύκου Spirulina στη Νιγρίτα Σερρών που ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1990 [9]. Η καλλιέργεια της σπιρουλίνας απαιτεί σημαντικές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), το μεγαλύτερο μέρος του οποίου είναι γεωθερμικής προέλευσης. Τα νερά της περιοχής περιέχουν περίπου 4 kg καθαρού CO₂ ανά m³ παραγόμενου νερού. Το γεωθερμικό νερό δεν χρησιμοποιείται άμεσα στις δεξαμενές καλλιέργειας, επειδή περιέχει περίπου 0,50 ppm As. Έχοντας θερμοκρασία 50°C και παροχή 0,5 kg/s οδηγείται αρχικά σε ένα διαχωριστή φάσεων και στη συνέχεια ρέει μέσω ενός ειδικά σχεδιασμένου εναλλάκτη θερμότητας, ο οποίος επιτρέπει τον εύκολο εντοπισμό και καθαρισμό αποθέσεων ανθρακικού ασβεστίου (CaCO₃). Η θέρμανση του νερού της καλλιέργειας με γεωθερμική ενέργεια και η χρήση γεωθερμικού CO₂ αυξάνει σημαντικά την παραγωγή του μικροφύκου, βελτιστοποιώντας τη φωτοσύνθεση. Η παραγωγή ξηρής Spirulina ανήλθε στα 4000 kg το 2007 και στα 4500 kg το 2008. Η ξήρανση του υγρού προϊόντος επιτυγχάνεται μέσα σε θερμοκήπιο με την τοποθέτησή του πάνω σε πλαστικά τραπέζια. Η εγκατεστημένη θερμική ισχύς της μονάδας καλλιέργειας Spirulina υπολογίζεται σε 1,3 MW_{th}.

2.5. Λουτροθεραπεία

Στην Ελλάδα υπάρχουν καταγεγραμμένες περισσότερες από 750 θερμές πηγές. Υπάρχουν 56 θερμές λουτροπόλεις και κέντρα λουτροθεραπείας, τα περισσότερα από τα οποία λειτουργούν μόνο κατά τη διάρκεια της περιόδου Ιουνίου-Οκτωβρίου. Εντούτοις, ο αριθμός των λουτροπόλεων (spa) που παραμένουν ανοικτές όλο το χρόνο, αυξάνεται συνεχώς. Η συνολική παροχή νερού των ελληνικών λουτροπόλεων υπερβαίνει τα 1000 kg/s, ενώ οι θερμοκρασίες των νερών είναι 18-90°C. Μια συντηρητική εκτίμηση (θεωρώντας ως θερμοκρασία εξόδου του νερού από τις εγκαταστάσεις τους 30°C) της συνολικής θερμικής ισχύος των Ελληνικών λουτροπόλεων είναι 36 MW_{th}, με μέσο συντελεστή αξιοποίησης 0,16. Η εκτίμηση αυτή περιλαμβάνει και τις περιπτώσεις των ανοικτών και κλειστών δεξαμενών κολύμβησης, που θερμαίνονται με γεωθερμικά νερά (Αιδηψός, Λουτράκι Αριδαίας, Σιδηρόκαστρο, Μήλος).

2.6. Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (ΓΑΘ)

Η χρήση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας (ΓΑΘ) στην Ελλάδα δεν είναι τόσο διαδεδομένη όσο σε ορισμένες χώρες της Κεντρικής και Βόρειας Ευρώπης (Γερμανία, Σουηδία, Ελβετία κ.ά.), όμως τελευταίως (μετά το 2005) παρουσιάζει ραγδαία αύξηση. Υπάρχει επίσης αυξημένο ενδιαφέρον για τη ψύξη χώρων με χρήση θαλασσινού νερού, ιδιαίτερα σε παράκτια ξενοδοχεία, που λειτουργούν μόνον το καλοκαίρι. Ανάλογα με τους περιορισμούς του εδάφους, τις ευνοϊκές γεωθερμικές συνθήκες, τις τοπικές κλιματικές συνθήκες, τη διαθεσιμότητα νερού και το μέγεθος της εγκατάστασης, αυτές οι μονάδες χρησιμοποιούν είτε γεωεναλλάκτες κλειστού βρόχου (οριζόντιους ή κάθετους) ή νερό (γεωθερμικό χαμηλής θερμοκρασίας ή υπόγειο). Οι συγγραφείς έχουν καταγράψει περισσότερες από 300 εφαρμογές τέτοιων συστημάτων σε όλη τη χώρα, αν και ο ακριβής αριθμός τους δεν είναι γνωστός. Η εγκατεστημένη ισχύς των καταγεγραμμένων συστημάτων ανέρχεται στα 25 MW_{th}, αν και πιστεύεται ότι η συνολική ισχύς του συνόλου των μονάδων μπορεί να είναι διπλάσια. Έτσι, μία ασφαλής εκτίμηση είναι τα 40 MW_{th}. Οι εγκαταστάσεις, που αφορούν κυρίως ΓΑΘ κλειστού βρόχου, οριζόντιας ή κάθετης διάταξης, χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση - ψύξη χώρων. Τα οριζόντια συστήματα τοποθετούνται κυρίως σε κατοικίες και τοποθετούνται σε βάθη 1,5-3 m, ενώ το βάθος των γεωτρήσεων για την τοποθέτηση κατακόρυφων συστημάτων γεωεναλλάκτη είναι 60-100 m. Τα ανοιχτά συστήματα χρησιμοποιούν υπόγειο νερό (το οποίο πάντοτε επανεισάγεται), υφάλμυρο ή και θαλασσινό νερό. Υπάρχουν μικρές (10-20 kW_{th}) αλλά και μεγάλες (>100 kW_{th}) εγκαταστάσεις ΓΑΘ. Πάνω από 40 εγκαταστάσεις έχουν εγκατεστημένη ισχύ μεγαλύτερη των 100 kW_{th}. Η κατανομή των καταγεγραμμένων συστημάτων ΓΑΘ στη χώρα μας σε μικρά (<100 kW) ή μεγάλα συστήματα και σε ανοικτού ή κλειστού (οριζόντια ή κατακόρυφα) βρόχου παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Παρά την έλλειψη μέχρι σήμερα οικονομικών κινήτρων από την Πολιτεία, η εγκατάσταση συστημάτων ΓΑΘ παρουσιάζει εντυπωσιακή ανάπτυξη, κάτι που οφείλεται, εκτός των άλλων, και στις διατάξεις της υφιστάμενης νομοθεσίας, δηλ. της Υπουργικής Απόφασης Υπ. Αριθμ. Δ9Β,Δ/Φ.166/ΟΙΚ.18508/5552/207 (Φ.Ε.Κ.1595/τ.Β/25-10-2004).

3. ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Οι δυνατότητες που υπάρχουν στην Ελλάδα για αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας είναι πολύ μεγάλες, αφού το γεωθερμικό δυναμικό που έχει εντοπισθεί είναι τεράστιο. Η συστηματική γεωθερμική έρευνα που πραγματοποιείται πάνω από 30 χρόνια από το Ι.Γ.Μ.Ε. οδήγησε στην εντοπισμό και μελέτη γεωθερμικών πεδίων σε όλη την Επικράτεια. Τα γεωθερμικά πεδία, ανάλογα με το βαθμό μελέτης τους και τη γνώση των χαρακτηριστικών τους, ταξινομούνται ως «βεβαιωμένα και πιθανά», σύμφωνα με τον Νόμο 3175/2003. Σε εφαρμογή του Νόμου αυτού εκδόθηκαν και δημοσιεύθηκαν στα ΦΕΚ 1012/Β'/19-7-2005 και ΦΕΚ 161/Β'/5-2-

2008 οι Υπουργικές Αποφάσεις βάσει των οποίων 25 περιοχές της χώρας χαρακτηρίζονται ως βεβαιωμένα ή/και πιθανά γεωθερμικά πεδία. Με την ολοκλήρωση των εργασιών του Γ' ΚΠΣ είναι προφανές ότι και άλλες γεωθερμικές περιοχές της Ελλάδας θα χαρακτηρισθούν ως βεβαιωμένα ή/και πιθανά γεωθερμικά πεδία. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, αφού με την κατάταξη και αναγνώριση από την Πολιτεία μιας περιοχής ως γεωθερμικού πεδίου δίνεται η δυνατότητα στην αρμόδια Περιφέρεια να προχωρήσει τις διαδικασίες μίσθωσης και διαχείρισης του πεδίου με την προκήρυξη σχετικής διακήρυξης και με πλειοδοτικό διαγωνισμό, σύμφωνα με τα όσα προβλέπει η Υπουργική Απόφαση Δ9Β/Φ. 166/οικ.8411/ΓΔΦΠ2373/117/05 (ΦΕΚ 635/τ.Β'/12-5-2005). Η πρώτη προκήρυξη για πλειοδοτικό διαγωνισμό μίσθωσης γεωθερμικού πεδίου έγινε με την ΑΠ 2141/2-8-2007 διακήρυξη από την Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης και αφορούσε το «βεβαιωμένο γεωθερμικό πεδίο Ερατεινού Καβάλας». Πλειοδότης του διαγωνισμού αναδείχθηκε ο Δήμος Χρυσούπολης. Μετά την εξέλιξη αυτή, και παρά τις όποιες δυσκολίες, είναι φανερό ότι θα ακολουθήσουν και νέες προκηρύξεις για μίσθωση και διαχείριση και άλλων γεωθερμικών πεδίων χαμηλής θερμοκρασίας ($T \leq 90^\circ\text{C}$) από τις κατά τόπους αρμόδιες Περιφέρειες, δίνοντας πλέον τη δυνατότητα εκμετάλλευσης και αξιοποίησής τους σε κάθε ενδιαφερόμενο.

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά των εφαρμογών ΓΑΘ (τέλος 2008)

	Αριθμός εφαρμογών	Κλειστού βρόχου-οριζόντια	Κλειστού βρόχου - κατακόρυφα	Ανοικτού βρόχου*
Μεγάλες εφαρμογές (>100 kW)	42	-	2852	13788
Μικρές εφαρμογές (<100 kW)	>300	2781	3714	1949
Σύνολο	>342	2781	6566	15737
* κυρίως υπόγειο νερό, αλλά και υφάλμυρο και θαλασσινό				

Είναι φανερό ότι για την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας στην Ελλάδα καθίσταται επιτακτική ανάγκη να επιλυθούν κάποια προβλήματα του νομοθετικού πλαισίου, το οποίο διέπει την αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού, με τροποποίηση κάποιων διατάξεων του Ν.3175/2003. Οι τροποποιήσεις, που έχουν προωθηθεί νομοθετικά από το αρμόδιο Υπουργείο Ανάπτυξης αποσκοπούν: (α) να ανοίξουν το δρόμο για την αξιοποίηση της γεωθερμίας και από μικρούς χρήστες-επενδυτές, κυρίως σε αγροτικές εφαρμογές και θερμικές χρήσεις, (β) να επιλύσουν προβλήματα μίσθωσης πιθανών και βεβαιωμένων γ/θ πεδίων στην ίδια περιοχή και (γ) να διαμορφώσουν το πλαίσιο για μελλοντική θέσπιση οικονομικών κινήτρων για οικιακές χρήσεις θέρμανσης - ψύξης.

Χωρίς να παραγνωρίζεται η άμεση αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου των γεωθερμικών ρευστών για την παραγωγή θερμότητας, σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της γεωθερμίας στην Ελλάδα πρέπει να αποκτήσει και η εκμετάλλευση των γεωθερμικών ρευστών για Ηλεκτροπαραγωγή και επομένως για Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ). Εξαιτίας της ατυχούς κατάληξης της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των 2 ΜWe στη Μήλο, που έκλεισε το 1989 εξαιτίας έκλυσης υδροθείου (H_2S) στην ατμόσφαιρα και έντονων διαμαρτυριών των κατοίκων, η ανανέωση του ενδιαφέροντος για ηλεκτροπαραγωγή στη Μήλο και τη Νίσυρο με μονάδες κύκλου εκτόνωσης (flash cycle units) δεν είναι πιθανή. Από την άλλη πλευρά, η εγκατάσταση μικρών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με δυαδικό κύκλο (Organic Rankine Cycle, ή Kalina) δεν μπορεί να αποκλεισθεί. Προς την κατεύθυνση αυτή αξίζει να διερευνηθούν οι δυνατότητες παραγωγής ηλεκτρισμού με το δυαδικό κύκλο από γεωθερμικά ρευστά μέσης ενθαλπίας (θερμοκρασίας $90-175^\circ\text{C}$) και στις βαθιές ιζηματογενείς λεκάνες του Ελλαδικού χώρου και ιδιαίτερα στις λεκάνες Στρυμόνα, Δέλτα Ποταμού Νέστου, Ξάνθης-Κομοτηνής και Έβρου [2]. Στο εσωτερικό γεωτρήσεων έρευνας υδρογονανθράκων

στις περιοχές αυτές και σε βαθιά ερευνητική γεωθερμική γεώτρηση στην πεδιάδα του Δέλτα του Νέστου έχουν καταγραφεί θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 90°C σε μικρά σχετικά βάθη. Για παράδειγμα, στη λεκάνη του Δέλτα του Νέστου και στο κέντρο του γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας Ερατεινού Καβάλας ανορύχθηκε η γεώτρηση N-1G, στο εσωτερικό της οποίας μετρήθηκε η θερμοκρασία των 122°C στα 1377m [10]. Στην περιοχή του Αρίστηνου Έβρου εντοπίζεται γεωθερμικός ταμιευτήρας με νερά θερμοκρασίας μεγαλύτερης των 86°C σε βάθος μόλις 360 m περίπου μέσα σε ηφαιστειακά πετρώματα, ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει και η περίπτωση του γεωθερμικού πεδίου Ακροποτάμου Καβάλας, στην παράκτια ζώνη του Στρυμονικού Κόλπου, όπου εντοπίστηκαν ρευστά θερμοκρασίας 83-90°C σε βάθη 240-515 m [2]. Συνεπώς, η δυνατότητα ηλεκτροπαραγωγής με τη χρήση γεωθερμικών ρευστών μέσης ενθαλπίας θα πρέπει να τύχει ιδιαίτερης προσοχής στην Ελλάδα. Στην Κεντρική Ευρώπη (Γερμανία, Αυστρία) κατασκευάζονται γεωτρήσεις βάθους 2-3,5 km για την παραγωγή ρευστών θερμοκρασίας 100-120°C, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στην ηλεκτροπαραγωγή και συμπαραγωγή (ΣΗΘ). Σε αρκετές περιοχές της Ελλάδας, οι γεωθερμικές συνθήκες είναι σαφώς πιο ευνοϊκές και τέτοιας τάξης θερμοκρασίες μπορούν να εντοπισθούν σε μικρότερα βάθη, με αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος κατασκευής των γεωτρήσεων. Υπάρχουν όμως κι άλλες, μεγαλύτερης έκτασης περιοχές με γεωθερμικό ενδιαφέρον, όπου λόγω της καλής γεωθερμικής βαθμίδας (ίσης ή μεγαλύτερης της μέσης γήινης) σε συνδυασμό με ευνοϊκές τεκτονικές και στρωματογραφικές συνθήκες, πιθανολογείται βάσιμα η ύπαρξη αξιοποιήσιμων γεωθερμικών ρευστών με θερμοκρασίες $\geq 120^\circ\text{C}$, που μπορούν να δώσουν συνολικά αρκετές εκατοντάδες MWe. Οι περιοχές των δύο προαναφερθέντων κατηγοριών βρίσκονται κυρίως στις ιζηματογενείς λεκάνες της Βόρειας και Κεντρικής - Ανατολικής Ελλάδος

Αυξημένη θερμική ροή παρουσιάζεται σε νησιά του Ανατολικού Αιγαίου, όπως στη Σαμοθράκη, Λέσβο, Χίο, Λήμνο, Ικαρία κ.α. Για παράδειγμα, στον χώρο των Λουτρών Θερμών Σαμοθράκης γεώτρηση βάθους μόλις 40 m παράγει με αρτεσιανή ροή νερά θερμοκρασίας 94-99°C, στα Νένητα της Χίου έχουν εντοπισθεί νερά θερμοκρασίας μέχρι 82°C σε βάθος 300-380 m, ενώ στη Λέσβο έχουν μετρηθεί θερμοκρασίες 92°C και 86°C σε γεωτρήσεις βάθους 200 m στη Στύψη και στην Άργεννο αντίστοιχα. Η αυξημένη θερμική ροή των νησιών του Ανατολικού Αιγαίου θα μπορούσε να αξιοποιηθεί τόσο σε άμεσες χρήσεις όσο και σε ηλεκτροπαραγωγή με την ανόρυξη γεωτρήσεων σε μεγαλύτερα βάθη για τον εντοπισμό γεωθερμικών ρευστών ακόμη μεγαλύτερης θερμοκρασίας. Τα τελευταία χρόνια η Δ.Ε.Η. διεξάγει ερευνητικές εργασίες στη Λέσβο, με σκοπό την εγκατάσταση και λειτουργία μιας γεωθερμικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής με δυαδικό κύκλο ORC. Στα πλαίσια αυτής της ερευνητικής προσπάθειας εντοπίστηκαν θερμοκρασίες 90-107°C σε γεωτρήσεις βάθους 300-1085 m στις περιοχές Άργεννου και Στύψης [4].

Στη Μακεδονία και Θράκη, στην Κεντρική και Ανατολική Ελλάδα καθώς και σε πολλά νησιά του Αιγαίου υπάρχουν εκτεταμένες γρανιτικές διεισδύσεις και γνευσιακοί σχηματισμοί. Τα πετρώματα αυτά είναι γεμάτα διακλάσεις, έχουν όμως σχεδόν μηδενικό πορώδες και υδροπερατότητα, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να συγκρατήσουν ποσότητες νερού. Η αναζήτηση της δυνατότητας ενεργειακής εκμετάλλευσής τους προβάλλει αρκετά ελκυστική, ιδιαίτερα στις περιοχές όπου οι τεράστιοι γρανιτικοί όγκοι συνδυάζονται με αυξημένη γεωθερμική βαθμίδα. Ενεργειακά μπορούν να αξιοποιηθούν με την εφαρμογή της τεχνολογίας των Βελτιωμένων Γεωθερμικών Συστημάτων (Enhanced Geothermal Systems, E.G.S.) σε συνδυασμό ίσως και με το δυαδικό κύκλο Rankine ή Kalina.

Ως Βελτιωμένα Γεωθερμικά Συστήματα ορίζονται αυτά στα οποία προκαλούνται με τεχνητό τρόπο διαρρήξεις, δημιουργώντας συνθήκες δευτερογενούς περατότητας, και στη συνέχεια εισπίζεται μέσω βαθιών γεωτρήσεων νερό από την επιφάνεια, το οποίο αφού κυκλοφορήσει μέσα από τις ανοιχτές διακλάσεις και διαρρήξεις θερμαίνεται και ανακτάται στην επιφάνεια με άλλες γεωτρήσεις με τη μορφή υπέρθερμων νερών, εύκολων για εκμετάλλευση (κυρίως συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας). Η εφαρμογή των E.G.S. μπορεί να γίνει, εκτός

από τους μεγάλους γρανιτικούς όγκους, σε όλες τις περιοχές που παρουσιάζουν αυξημένη θερμική ροή και χαμηλή διαπερατότητα καθώς και στους βαθύτερους ιζηματογενείς σχηματισμούς και στο μεταμορφωμένο υπόβαθρο βαθιών λεκανών, όπου υπάρχουν αξιόλογες θερμοκρασίες αλλά απουσιάζουν τα γεωθερμικά ρευστά.

Τέλος, τα συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας (ΓΑΘ) φαίνεται να αποτελούν μια εύκολη, οικονομικά προσιτή, πρόταση εφαρμογής, η οποία είναι απόλυτα φιλική προς το περιβάλλον, έχει γρήγορη απόσβεση και μπορεί να υλοποιηθεί - χωρίς ιδιαίτερες γραφειοκρατικές διαδικασίες - από κάθε ενδιαφερόμενο, που επιθυμεί μια εναλλακτική πηγή ενέργειας για τη θέρμανση και την ψύξη του χώρου, όπου ζει, κινείται και εργάζεται. Η θεαματική αύξησή τους τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα επιβεβαιώνει όλα τα παραπάνω. Η παροχή κάποιων οικονομικών κινήτρων θα μπορούσε να δώσει ακόμη μεγαλύτερη ώθηση στην ανάπτυξη αυτών των συστημάτων. Ο σχεδιασμός και η εγκατάσταση συστημάτων ΓΑΘ στα νεοανεγειρόμενα δημόσια κτίρια περιοχών, που βρίσκονται μακριά από γεωθερμικά πεδία, μπορεί να προχωρήσει άμεσα και με ταχείς ρυθμούς. Ήδη το Υπουργείο Ανάπτυξης (ΥΠ.ΑΝ.) σε συνεργασία με την Κεντρική Ένωση Δήμων και Κοινοτήτων Ελλάδος (Κ.Ε.Δ.Κ.Ε.), το Ινστιτούτο Τοπικής Αυτοδιοίκησης (Ι.Τ.Α.) και το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Κ.Α.Π.Ε.) ξεκίνησαν την υλοποίηση του Προγράμματος «ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΩ», το οποίο εκτός της εφαρμογής δράσεων και αποδεδειγμένων καλών πρακτικών για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης κυρίως στον κτιριακό τομέα (δημοτικά κτίρια) με έργα αναβάθμισης των υφιστάμενων κτιρίων προβλέπει μεταξύ άλλων και την εγκατάσταση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Το Πρόγραμμα παρουσιάστηκε στο Διοικητικό Συμβούλιο της Κ.Ε.Δ.Κ.Ε. στις 9-7-2008 από τον Γεν. Γραμματέα του ΥΠ.ΑΝ. Κάθε Δήμος μπορεί να καταθέσει το δικό του σχέδιο δράσης, η χρηματοδότηση των έργων θα γίνει κατά 70% από το ΕΣΠΑ και κατά 30% από ίδια συμμετοχή των Δήμων, η δε κατανομή του προϋπολογισμού θα γίνει με πληθυσμιακά κριτήρια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Φυτίκας, Μ. & Ανδρίτσος, Ν., 'Γεωθερμία', Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 416 σελ., 2004.
2. Kolios, N., Fytikas, M., Arvanitis, A., Andritsos, N. & Koutsinos, S., 'Prospective Medium Enthalpy Geothermal Resources in Sedimentary Basins of Northern Greece', Proc. European Geothermal Congress 2007, Unterhaching Germany (30 May - 1 June 2007), I.G.A.-European Branch Forum, GtV-BV, SVG/SSG, 11 pp, 2007.
3. Fytikas, M., Andritsos, N., Karydakis, G., Kolios, N., Mendrinou, D. & Papachristou, M. 'Geothermal Exploration and Development Activities in Greece during 1995-1999', Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, 2000.
4. Fytikas, M., Andritsos, N., Dalambakis, D. & Kolios, N., 'Greek Geothermal Update', Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
5. Andritsos N., Dalabakis P., Karydakis G., Kolios N. & Fytikas M., 'Update and Characteristics of Low-Enthalpy Geothermal Applications in Greece', Proceedings European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, Germany (30 May-1 June 2007), 7 pp, 2007.
6. Στυλιανού, Γ., 'Θέρμανση με ιαματικό νερό λουτρόπολης Τραϊανούπολης Έβρου', Εισήγηση σε ημερίδα με θέμα 'Αξιοποίηση γεωθερμικών εφαρμογών θέρμανσης - ψύξης και εξοικονόμησης ενέργειας' (11/12/2007), Θεσσαλονίκη, 2007.
7. Andritsos, N., Dalabakis, P. & Kolios, N., 'Use of Geothermal Energy for Tomato Drying', Geothermal Center Quarterly Bulletin, Vol. 24(1), p.9-13, 2003.
8. Gelegenis, J., Dalabakis, P. & Ilias, A., 'Heating of wintering ponds by means of low enthalpy geothermal energy. The case of Porto Lagos', Geothermics, Vol. 35, p.87-103, 2006.
9. Fournadzhieva, S., Pilarsky, P., Arvanitis, A., Fytikas, M. & Koultziakis, E., 'Use of Geothermal Fluids for Cultivation of the Microalga Spirulina in Nigrita - Serres', Πρακτικά 7ου Εθνικού Συνεδρίου του Ι.Η.Τ. (Πάτρα 6-8/11/2002), Τόμος Β', σελ. 97-104, 2002.
10. Sotiropoulos, S., Final Geological Report of Geothermal Well Nestos-1G', Internal Report, DEP/EKY, Athens, 25pp, 1989.

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Μ. Γρ. Βραχόπουλος και Μ.Κ. Κούκου

Εργαστήριο Περιβαλλοντικών Ερευνών, Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ιδρυμα
Χαλκίδας, 34400 Ψαχνά Εύβοια
e-mail: mvrachop@teihal.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με βάση πολυάριθμες μετρήσεις που έχουν γίνει στο υπέδαφος διαφόρων σημείων του κόσμου, έχει διαπιστωθεί ότι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες επηρεάζουν τη θερμοκρασία σε μικρό σχετικά βάθος, συνήθως μέχρι τα 15 m. Έχει αποδειχθεί με μετρήσεις ότι, η μεταβολή της θερμοκρασίας στα 2 m βάθους από την επιφάνεια του εδάφους δε μεταβάλλεται περισσότερο από $\pm 2^{\circ}\text{C}$ κατά τη διάρκεια του χρόνου και η θερμοκρασία πρακτικά σταθεροποιείται στα 18 μέτρα βάθους, με απόλυτη τιμή τα 30μ. για να αρχίσει από εκεί και κάτω η άνοδος με το ρυθμό της γεωθερμικής βαθμίδας.

Ο στόχος αυτής της επιστημονικής εργασίας είναι να μελετηθεί η ανάπτυξη των θερμοκρασιακών πεδίων που δημιουργούνται λίγα μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (κανονική γεωθερμία), σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν ενδείξεις γεωθερμικής ανωμαλίας σε σχέση με τα θερμοκρασιακά πεδία που συναντώνται στον ατμοσφαιρικό αέρα. Παράλληλα εξετάζεται η επίδραση της λειτουργίας εγκατάστασης γεωθερμικού κλιματισμού στα αναπτυσσόμενα θερμοκρασιακά πεδία περίξ ενός γεωθερμικού εναλλάκτη θερμότητας οριζοντίου τύπου, καθώς και η επίδραση τους στην απόδοση και λειτουργία της κλιματιστικής εγκατάστασης που λειτουργεί με κανονική γεωθερμία.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως κανονική γεωθερμία ορίζεται η θερμική κατάσταση που αναπτύσσεται κάτω από κάθε επιφάνεια εδάφους, ανεξάρτητα από την ύπαρξη γεωθερμικού δυναμικού, ή καλύτερα όταν αυτό δεν υφίσταται. Το χαρακτηριστικό της κανονικής γεωθερμίας είναι ότι δεν εξαρτάται μόνο από τη γήινη θερμότητα, η οποία ρέει συνεχώς με ένα ρυθμό από τον πυρήνα της γης προς την επιφάνεια αλλά και από τη θερμότητα που αποθηκεύεται στο φλοιό της γης και είναι κυρίως ηλιογενούς προέλευσης [1-3]. Η θερμότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των φορτίων θερινού και χειμερινού κλιματισμού με χαρακτηριστικά ωφέλη σε σχέση με τις μέχρι σήμερα εγκαταστάσεις αέρα. Το πλεονέκτημα των εγκαταστάσεων κλιματισμού με αξιοποίηση της κανονικής γεωθερμίας είναι ότι λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας των υλικών του εδάφους, (χώμα, νερό) η ανάπτυξη θερμοκρασιακού πεδίου εντός αυτών παρουσιάζει μικρότερο εύρος και μεγάλη θερμοκρασιακή υστέρηση [4].

Για την κάλυψη των φορτίων θερινού και χειμερινού κλιματισμού κτιρίων έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες και μοντέλα το κάθε ένα από τα οποία καταλήγει στον προσδιορισμό ενός κόστους λειτουργίας και ενός αρχικού κόστους κατασκευής. Ένα από τα εφαρμοζόμενα συστήματα αποτελεί και η εκμετάλλευση της κανονικής γεωθερμίας, που είναι αναπόσπαστο τμήμα κάθε υπεδάφους και κάθε οικοδομικής δραστηριότητας. Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μοντέλο με το οποίο προσδιορίζεται η απόδοση του οριζοντίου εναλλάκτη θερμότητας, με παραμέτρους το βάθος τοποθέτησης και το είδος του εδάφους, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ασφαλής και ακριβής μεθοδολογία υπολογισμού των συστημάτων αυτών.

2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΓΙΑ 0-5m

Από μετρήσεις που έχουν διεξαχθεί στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Περιβαλλοντικών Ερευνών του ΤΕΙ Χαλκίδας, έχει διαπιστωθεί η μεταβολή της θερμοκρασιακής διακύμανσης κατά βάθος και η διαφορά της από την αντίστοιχη του αέρα. Η διακύμανση των θερμοκρασιών έχει προσεγγιστεί με εφαρμογή σχέσης που προτάθηκε από το φυσικό ερευνητή Kasuda [5] ο οποίος έχει αναπτύξει μια συνάρτηση προσδιορισμού της θερμοκρασίας του υπεδάφους όταν αυτό βρίσκεται αποκλειστικά υπό την επίδραση του περιβάλλοντος και χωρίς εξωτερική ή ετερογενή πηγή θερμικής διαταραχής. Η σχέση δίνει το θερμοκρασιακό πεδίο του εδάφους συναρτήσει του βάθους και της ημέρας του μήνα ή του έτους ανάλογα με τον προσδιορισμό των θερμικών παραμέτρων του υπεδάφους, δηλαδή θερμική αγωγιμότητα, ειδική θερμότητα και θερμική διαχυτότητα.

Με εφαρμογή της σχέσης (1) υπολογίζεται η θερμοκρασία για σταθερό βάθος σε συνάρτηση των ημερών του μήνα ή του έτους για χαρακτηριστικά εδάφους $k=1,4 \text{ W/mK}$, $\rho=2000 \text{ kg/m}^3$, $C_p=1400 \text{ J/kgK}$:

$$T_{ground} = T_{mean} + T_{amb} * e^{\left(-Depth * \left(\frac{\pi}{365a}\right)^{0.5}\right)} * \cos\left(\left(\frac{2\pi}{365}\right) * \left(t_{now} - t_{shift} - \left(\frac{Depth}{2}\right) * \left(\frac{365}{\pi * a}\right)^{0.5}\right)\right) \quad (1)$$

όπου T_{ground} = η θερμοκρασία του εδάφους, °C

T_{mean} = η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας (μέση θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα) του έτους, °C

T_{amb} = η διακύμανση της θερμοκρασίας της επιφάνειας (του ατμοσφαιρικού αέρα) του έτους, °C

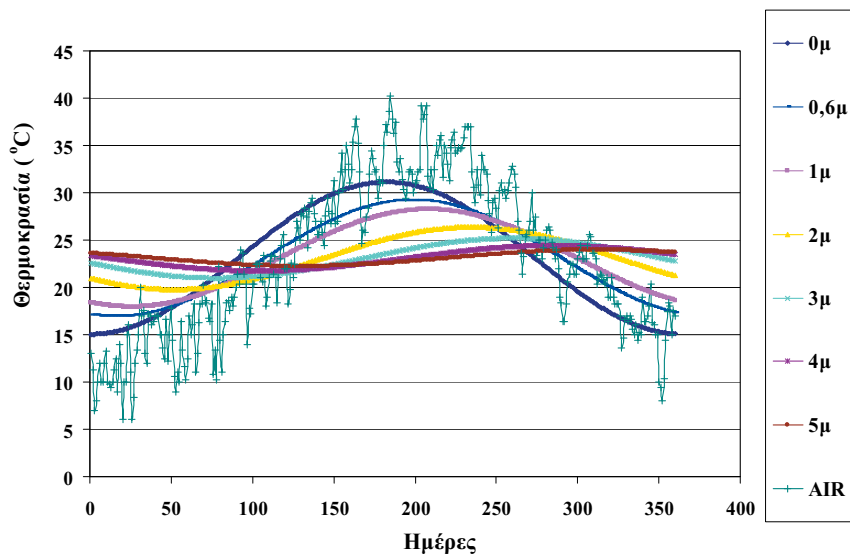
$Depth$ = το βάθος στο οποίο υπολογίζουμε τη θερμοκρασία του εδάφους, m

a = θερμική διαχυτότητα, m^2/day

t_{now} = η μέρα του μήνα ή του έτους που γίνεται ο υπολογισμός μας

t_{shift} = Χρονικός παράγοντας που βοηθά να ορισθεί ο μήνας των υπολογισμών στη διάρκεια του έτους, όταν υπολογίζεται η θερμοκρασία του εδάφους κατά τη διάρκεια ενός μήνα. Το t_{shift} παίρνει τιμές 0, 31, 59, 90..... για τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο, Απρίλιο αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 1 παρατηρείται η διακύμανση θερμοκρασίας που παρουσιάζεται στο έδαφος μετά από την εφαρμογή της σχέσης Kasuda και την επιβεβαίωση των τιμών μέχρι βάθους 1,3m από τις μετρήσεις. Συγκεκριμένα παρατηρείται πως η θερμοκρασία στο έδαφος μόλις στα 0,6m δεν ξεπερνά τους 30°C κατά τους θερινούς μήνες και τους 17°C τους χειμερινούς. Σε αντίθεση με τον αέρα που στο αντίστοιχο διάγραμμα η θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ των 6-42°C. Επίσης, επιβεβαιώνεται η αισθητή χρονική υστέρηση που υπόκειται το θερμοκρασιακό πεδίο κατά βάθος. Η εμφάνιση της μέγιστης θερμοκρασίας μεταφέρεται χρονικά καθώς αυξάνεται το βάθος σε σχέση με τον αέρα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγάλη θερμοχωρητικότητα του εδάφους σε σχέση με τον αέρα. Για μεγαλύτερη σαφήνεια η μέγιστη θερμοκρασία του αέρα παρουσιάζεται κατά το μήνα Ιούλιο ενώ η μέγιστη θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος 5m το μήνα Νοέμβριο. Αυτό επιβεβαιώνει ότι το έδαφος λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας του λειτουργεί σαν αποθήκη θερμότητας. Τη θερμότητα αυτή μπορεί να αποδώσει το υπέδαφος μέσω της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, τη στιγμή που τα φορτία ενός κτιρίου είναι θερμικά και όχι ψυκτικά. Αυτή η παρατήρηση δημιουργεί επίσης μια ιδιαιτερότητα, εφόσον στον αέρα όπου απορρίπτεται κατά το θέρος θερμότητα ο κοινός κλιματισμός, δεν παρουσιάζεται θερμική υστέρηση και η θερμότητα απορρίπτεται στον «καυτό» αέρα.



Σχήμα 1: Μεταβολή της θερμοκρασίας στον αέρα και στο έδαφος συναρτήσει του βάθους.

Η αναπτυσσόμενη χρονική υστέρηση 10-120 ημερών συνεπάγεται σημαντική υποβοήθηση στα εποχικά φορτία. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες ατμοσφαιρικού αέρα και εδάφους κατά βάθος καθώς και οι ημερομηνίες εμφάνισης αυτών.

Πίνακας 1: Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες αέρα και γης κατά βάθος

ΒΑΘΟΣ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΡΜ.	ΗΜΕΡ.	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΘΕΡΜ.	ΗΜΕΡ.
Αέρας	40,2 °C	6η/7ου	6 °C	26η /1ου
0,6μ	29,24 °C	17η /7ου	16,94°C	16η /1ου
1μ	28,24 °C	27η /7ου	17,94 °C	24η /1ου
2μ	26,38 °C	22η /8ου	19,72 °C	22η /2ου
3μ	25,20 °C	17η /9ου	20,98 °C	19η/3ου
4μ	24,44 °C	13η/10ου	21,74 °C	14η /4ου
5μ	23,95 °C	12η/11ου	23,23 °C	10η/5ου

3. ΑΠΟΡΡΙΨΗ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΠΡΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο υπολογισμός των ψυκτικών φορτίων, των θερμικών απωλειών και της κατανομής ενεργειών με τη μέθοδο της ισοδύναμης θερμοκρασιακής διαφοράς ψυκτικού φορτίου (CLTD) με σκοπό την απόρριψη και απορρόφησή τους προς και από το έδαφος. Η διαδικασία αυτή κρίθηκε ως απαραίτητη για τον προσδιορισμό των μεταβολών των θερμοκρασιών του επιφανειακού εδάφους κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της κλιματιστικής εγκατάστασης με κανονική γεωθερμία. Θα πρέπει να τονισθεί ότι σε αυτή την εργασία η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για πέντε συνεχή έτη χωρίς διακοπή και πως η εκτίμηση της εξοικονόμησης ενέργειας και του συντελεστή συμπεριφοράς της κλιματιστικής εγκατάστασης, που παρουσιάζονται στη συνέχεια αναφέρονται στο πέμπτο έτος λειτουργίας. Από τη μελέτη δεν κρίθηκε σημαντικό σφάλμα εάν τα συμπεράσματα που παρουσιάζονται είχαν προκύψει με βάση τον πρώτο χρόνο λειτουργίας της αλλά για λόγους ακρίβειας προτιμήθηκε η υπό συνεχή φορτίο επίδειξη των αποτελεσμάτων.

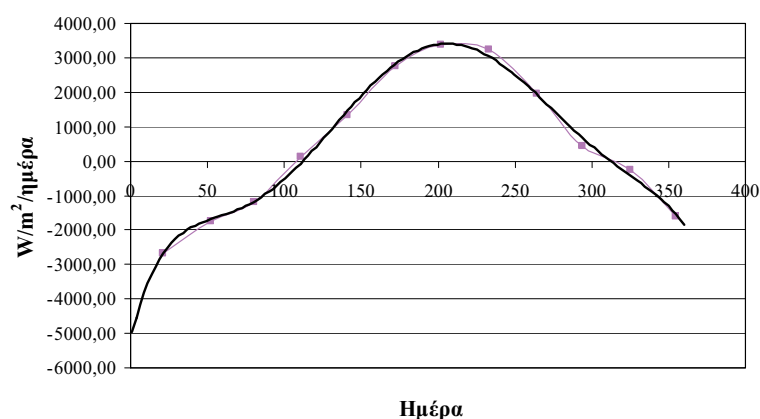
Η απόρριψη και η απορρόφηση θερμότητας προς και από το έδαφος των ψυκτικών και θερμικών φορτίων αντίστοιχα δίνεται από την παρακάτω σχέση που προέκυψε από ενεργειακό ισολογισμό [6] στο σύστημα οριζοντίου εναλλάκτη θερμότητας – έδαφος:

$$T_{ground,new} = T_{ground,old} + \frac{Q - 24 * \frac{k}{L} * (T_{ground,old} - T_w)}{\frac{24}{3600} * \pi * L * \rho * C_p} \quad (2)$$

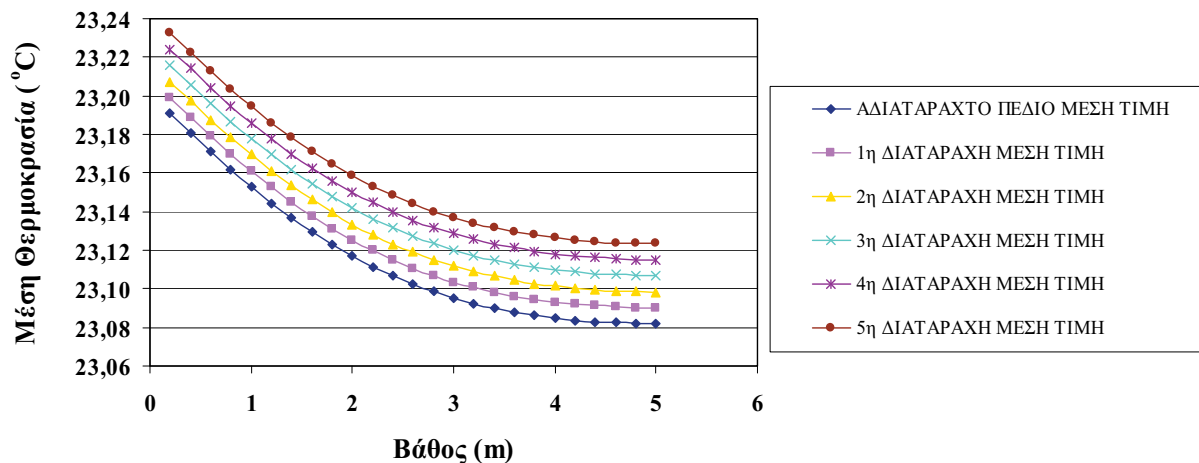
όπου $T_{ground,new}$ = η θερμοκρασία του εδάφους μετά την απαγωγή ή απορρόφηση θερμότητας προς ή από το έδαφος, °C

- $T_{ground,old}$ = η θερμοκρασία του εδάφους πριν την απαγωγή ή απορρόφηση θερμότητας προς ή από το έδαφος, °C
- T_w = θερμοκρασία εισόδου του νερού στον εναλλάκτη, °C
- Q = το θερμικό ή ψυκτικό φορτίο, W/m²
- k = η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους, W/m/K
- L = η ακτίνα ή απόσταση από το άκρο του εναλλάκτη που μετράμε τη θερμοκρασία σε m
- ρ = η πυκνότητα του εδάφους, kg/m³
- C_p = η ειδική θερμοχωρητικότητα του εδάφους, Wh/kg/K

Τα Σχήματα 2,3 αναφέρονται σε διαταραγμένο πεδίο για πρώτη φορά (εννοείται το 1^ο έτος λειτουργίας) και αδιατάραχτο πεδίο (δηλαδή έδαφος που δεν έχει φορτιστεί ποτέ στο παρελθόν). Παρουσιάζεται η συνολική θέρμανση του εδάφους, για την περιοχή της Χαλκίδας, εφόσον η μέση τιμή της θερμοκρασίας του εδάφους κατά βάθος αυξάνεται από το 1^ο έως το 5^ο έτος λειτουργίας της κλιματιστικής εγκατάστασης από 23,20-23,24 °C. Τονίζεται ότι οι παραπάνω τιμές ισχύουν για απόσταση (ακτίνα) αποκατάστασης 1μ από τον σωλήνα-εναλλάκτη. Μετά από την επεξεργασία των μετρήσεων και την προσομοίωση του εναλλάκτη θερμότητας κατά τους χειμερινούς μήνες παρατηρείται μικρή μείωση της θερμοκρασίας κατά βάθος λόγω της απορρόφησης θερμότητας από το έδαφος μέσω της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας μεγέθους 1,77 °C ενώ κατά τους θερινούς μήνες δημιουργείται μικρή αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1,8 °C κατά βάθος λόγω απόρριψης θερμότητας προς το έδαφος.



Σχήμα 2: Συνολικά φορτία σε όλο το έτος



Σχήμα 3: Μεταβολή της θερμοκρασίας του υπεδάφους μεταξύ διαταραγμένου και αδιατάρακτου πεδίου, κατά βάθος

4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ COP ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η αντλία θερμότητας (heat pump) είναι μία συσκευή που έχει την ικανότητα να μεταφέρει θερμότητα από μέσο με χαμηλή θερμοκρασία σε άλλο μέσο με υψηλότερη θερμοκρασία. Αυτό πραγματοποιείται με απορρόφηση θερμότητας από την πηγή χαμηλής θερμοκρασίας (όπως είναι το έδαφος ή το επιφανειακό νερό, ο εξωτερικός αέρας κτλ.) και τη μεταφορά της θερμότητας αυτής στο θερμότερο μέσο, όπως είναι το νερό ή ο αέρας, που χρησιμοποιείται για τη θέρμανση λ.χ. ενός κτηρίου, ενός θερμοκηπίου κ.λπ.. Ο υπολογισμός του συντελεστή συμπεριφοράς (επιτευξιμότητας) COP γίνεται μέσω της παρακάτω σχέσης (3):

$$COP = \frac{T_{ατμ} * (C_{p,gas} - C_{p,liquid})}{C_{p,gas} * (T_{Συμπ} - T_{ατμ} + \Delta T_c)} \quad (3)$$

όπου $T_{ατμ}$ = η θερμοκρασία ατμοποίησης του ψυκτικού μέσου, °C

$T_{Συμπ}$ = η θερμοκρασία συμπύκνωσης του ψυκτικού μέσου, °C

$C_{p,liquid}$ = η ειδική θερμοχωρητικότητα του ψυκτικού μέσου στην υγρή φάση πριν γίνει η ατμοποίηση στον ατμοποιητή, Wh/kg K

$C_{p,gas}$ = η ειδική θερμοχωρητικότητα του ψυκτικού μέσου στην αέρια φάση αφού γίνει η ατμοποίηση στον ατμοποιητή, Wh/kg K

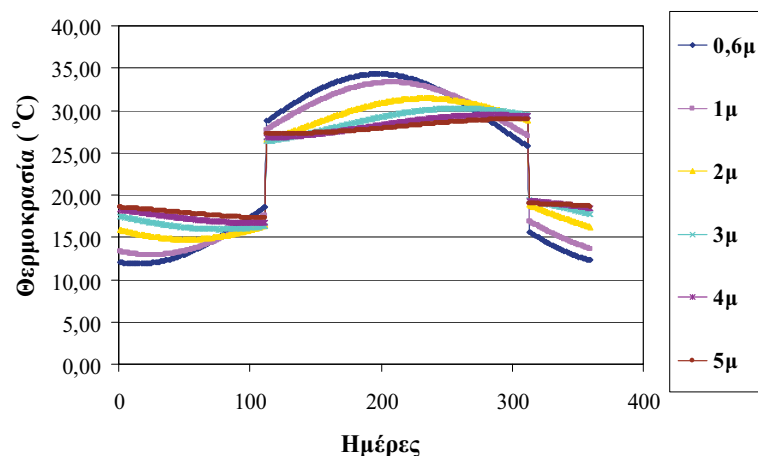
ΔT_c = η υπερθέρμανση που προκαλεί ο συμπιεστής στο αέριο ψυκτικό μέσο

Αν ο αντίστοιχος παράγοντας προσδιοριστεί από τα μεγέθη της αποδιδόμενης και αναρροφώμενης ενέργειας προκύπτει:

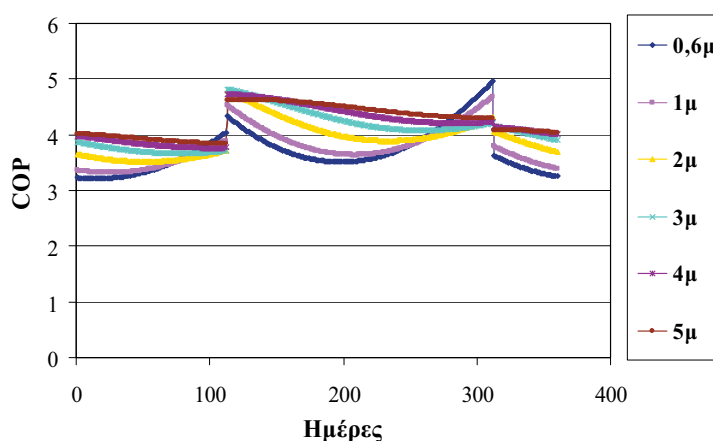
$$COP = \frac{\text{Αποδιδόμενη Ενέργεια}}{\text{Αναρροφώμενη Ενέργεια}} \quad (4)$$

Ως αποδιδόμενη ενέργεια ορίζεται το ψυκτικό ή θερμικό αποτέλεσμα και ως αναρροφώμενη ενέργεια εννοείται η κατανάλωση ηλεκτρικής κυρίως ενέργειας από τη γεωθερμική αντλία θερμότητας. Επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία για λειτουργία της κλιματιστικής εγκατάστασης με αέρα και μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων, προκύπτει η εξοικονόμηση ενέργειας από τη χρήση της κανονικής γεωθερμίας καθώς και ο υπολογισμός του κόστους λειτουργίας της εγκατάστασης, πίνακες παρουσιάζονται παρακάτω.

Στο Σχήμα 4, παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας εισόδου του εναλλάκτη εδάφους σε συνάρτηση του βάθους και στο Σχήμα 5, η ετήσια μεταβολή του COP με παράμετρο το βάθος τοποθέτησης του οριζοντίου εναλλάκτη.



Σχήμα 4: Ετήσια μεταβολή της θερμοκρασίας εισόδου του εναλλάκτη εδάφους σε συνάρτηση του βάθους.



Σχήμα 5: Ετήσια μεταβολή του COP με παράμετρο το βάθος τοποθέτησης του οριζοντίου εναλλάκτη.

Στον Πίνακα 2, παρουσιάζεται η σύγκριση του κόστους λειτουργίας της κλιματιστικής εγκατάστασης με αβαθή γεωθερμία και με αέρα σε λειτουργία inverter. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζεται η εξοικονόμηση ενέργειας κλιματιστικής εγκατάστασης με κανονική γεωθερμία και χρήση οριζοντίου εναλλάκτη θερμότητας όταν συγκριθεί με τον αέρα σε inverter λειτουργία. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Σχήματος 6 το βέλτιστο βάθος τοποθέτησης του γεωθερμικού εναλλάκτη προέκυψε στα 2-3μ. Συγκεκριμένα, διαπιστώνεται ότι καθώς αυξάνουν οι παράγοντες k , ρ οι καμπύλες των θερμοκρασιακών πεδίων από 0-5μ για την 21η μέρα κάθε μήνα του χρόνου γίνονται πιο γραμμικές χωρίς όμως τα όρια των μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών να μεταβάλλονται. Κατά τη λειτουργία ψυκτικής εγκατάστασης με ομαλή γεωθερμία από το 1ο έως το 5ο έτος λειτουργίας οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας του εδάφους, με την αύξηση των k , ρ μειώνονται αφού τα εδάφη με μεγαλύτερη θερμοκρασιακή αγωγιμότητα αποφορτίζονται πιο εύκολα. Ένα άλλο στοιχείο που

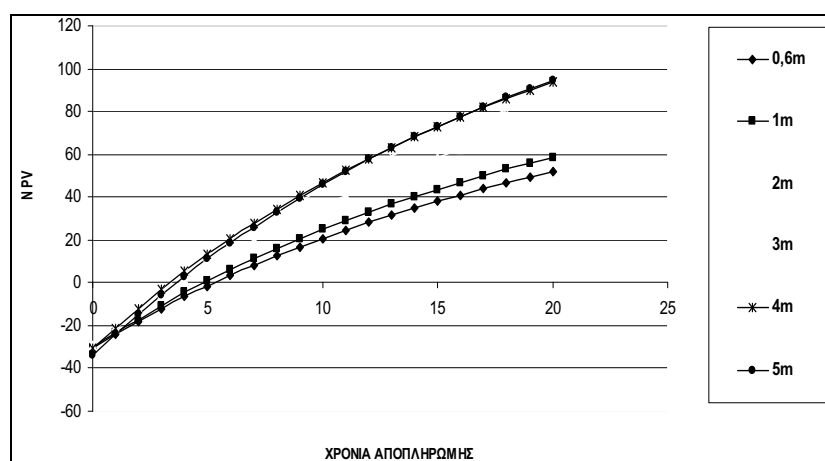
προκαλεί μείωση των μέσων θερμοκρασιών είναι η αύξηση της υγρασίας του εδάφους, γεγονός που οφείλεται στην απορρόφηση μέρους από την απαγόμενη θερμότητα, ως λανθάνουσα θερμότητα νερού.

Πίνακας 2: Σύγκριση κόστους λειτουργίας κανονικής γεωθερμίας και αέρα, σε λειτουργία inverter.

ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
Βάθος (m)	€/m ² /έτος
0,6	22,12
1	21,59
2	20,31
3	19,33
4	18,73
5	18,43
ΑΕΡΑΣ	28,52

Πίνακας 3: Σύγκριση της εξοικονόμηση ενέργειας κλιματιστικής εγκατάστασης με κανονική γεωθερμία όταν συγκριθεί με τον αέρα σε inverter λειτουργία.

ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ	ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
Βάθος (m)	%
0,6	22,4
1	24,3
2	28,8
3	32,2
4	34,3
5	35,4
ΑΕΡΑΣ	0



Σχήμα 6: Περίοδος αποπληρωμής εγκατάστασης αβαθούς γεωθερμίας, σε συνάρτηση του βάθους με επιτόκιο 5%.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι το υπέδαφος αποτελεί ένα ιδιαίτερα ευνοϊκό περιβάλλον για τη λειτουργία της κλιματιστικής εγκατάστασης. Παρατηρείται από τα διαγράμματα ότι οι θερμοκρασίες του εδάφους κυμαίνονται από 15-31 °C σε όλη τη διάρκεια του έτους από 0,6-5m. Το γεγονός αυτό εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία της κλιματιστικής εγκατάστασης γεγονός που παρατηρείται από τα διαγράμματα του συντελεστή συμπεριφοράς COP. Οι τιμές του COP κυμαίνονται μεταξύ του 3,2-5,5 για όλες τις εποχές, χειμώνα και θέρος αντίστοιχα και η μέση ετήσια τιμή κοντά στο 4. Επισημαίνεται ότι οι τιμές προκύπτουν για την αυτή λειτουργική αξία (ποιότητας) της αντλίας θερμότητας αέρα και γης. Οι υψηλές τιμές του COP, εξασφαλίζουν χαμηλές τιμές κατανάλωσης ενέργειας της κλιματιστικής εγκατάστασης, μικρό λειτουργικό κόστος και συνεπώς μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με τη λειτουργία στον ατμοσφαιρικό αέρα. Η ομαλότητα και χωρίς εξάρσεις λειτουργία της εγκατάστασης με γεωθερμία αποδεικνύει πέραν των άλλων και την μικρή καταπόνηση των διατάξεων αυτού του τύπου, τη μικρή ανάγκη συντήρησης και τη μεγάλη διάρκεια ζωής.

Το ποσοστό μείωσης του λειτουργικού κόστους, 22-32%, σε σχέση με το ποσοστό αύξησης του αρχικού κόστους της εγκατάστασης, 27-30%, αποσβένεται σε διάστημα μικρότερο από 3-4 χρόνια στην περίπτωση που ο ενδιαφερόμενος ολοκληρώσει την εγκατάσταση με ίδιο αρχικό κεφάλαιο. Στην περίπτωση που ο ενδιαφερόμενος δανειστεί το αρχικό κεφάλαιο με επιτόκιο 5-10% ο χρόνος αποπληρωμής όπως φαίνεται και στα ποιο κάτω διαγράμματα είναι μικρότερος από 5-6 χρόνια. Παρά το γεγονός της καλύτερης απόδοσης του γεωθερμικού εναλλάκτη με την αύξηση του βάθους όπως προέκυψε και από τα παραπάνω αποτελέσματα, η είσοδος του οικονομικού παράγοντα στην εν λόγω μελέτη ανατρέπει σε μικρό βαθμό τα αποτελέσματά της, που παρ' όλα αυτά παραμένουν εξίσου εντυπωσιακά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Βραχόπουλος, Μ.Γρ., Ι. Παπαγεωργάκης, “Εκμεταλλεύσιμη Ηλιογενής και Γηγενής Θερμότητα στο Αβαθές Υπέδαφος της Αττικής ”, Τεχνικά χρονικά ΤΕΕ, τεύχος 1, pp. 1-18, 1998.
- [2] Βραχόπουλος, Μ.Γρ.: “Γεωθερμία”. Έκδοση Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου 2001.
- [3] Mihalakakou, G., Santamouris, M. and Asimakopoulos, D., “Modeling the earth temperature using multiyear measurements”, Energy and Buildings, 19, 1-9, 1992.
- [4] Παπαγεωργάκης, Ι. (1992): “Θέρμανση - ψύξη κτιρίων με αβαθή γεωθερμική ενέργεια στην Ελλάδα”. 4ο Συνέδριο του Ινστιτούτου Ηλιακής Τεχνολογίας για τις ήπιες μορφές ενέργειας, Ξάνθη.
- [5] Kasuda, T., and Archenbach, P.R. "Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States", ASHRAE Transactions, Vol. 71, Part 1, 1965.
- [6] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Wiley, 6th Ed., (2007).

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΨΥΚΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ (VRV) ΜΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΓΕΩΕΝΑΛΛΑΚΤΗ

Α. Χ. Χριστοφορίδης¹, Σ. Ξανθόπουλος¹, Σ. Σπύρου²

¹ ALTEREN Ενέργεια & Περιβάλλον Α.Ε., Καλλιρόης 2, 555 35 Πυλαία Θεσσαλονίκης
Τηλ: +30 2310 282528, Fax: +30 2310 283725, e-mail: info@alteren.gr

² ΚΛΙΜΑΜΗΧΑΝΙΚΗ Ε.Π.Ε., Ελ. Βενιζέλου 5 - Αδριανουπόλεως, 551 33 Θεσσαλονίκη Τηλ: +30
2310 440844, Fax: +30 2310 432868, e-mail: info@klimamichaniki.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στην εγκατάσταση ενεργειακού συστήματος Γεωθερμικής Αντλίας Θερμότητας (ΓΑΘ, Ground Source Heat Pump) για την θέρμανση-ψύξη προσθήκης γραφείων σε βιομηχανικό κτίριο, που βρίσκεται στην περιοχή Ν. Ιωνίας Θεσσαλονίκης. Η εφαρμογή είναι πρωτοποριακή και καινοτόμα μιας και το συγκεκριμένο ενεργειακό σύστημα αποτελείται από υδρόψυκτη αντλία θερμότητας μεταβλητής παροχής ψυκτικού μέσου (Variable Refrigerant Volume, VRV) σε συνδυασμό με κλειστό κύκλωμα οριζόντιου γεωεναλλάκτη σπειροειδούς διαμόρφωσης (Slinky®). Το σύστημα ελέγχθηκε σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας, πλήρους ή μερικού φορτίου, στις διάφορες εποχές του χρόνου, μετρήθηκαν οι αποδόσεις της αντλίας θερμότητας και αποδείχθηκε ότι η συγκεκριμένη αντλία παρουσιάζει υψηλότερους βαθμούς απόδοσης από την αντίστοιχη αερόψυκτη αλλά και από άλλες αντίστοιχες γεωθερμικές αντλίες θερμότητας νερού-νερού ή νερού-αέρα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας (ΓΑΘ) αποτελούν φυσική εξέλιξη των υδρόψυκτων αντλιών θερμότητας. Στα συστήματα αβαθούς γεωθερμίας οι υδρόψυκτες αντλίες θερμότητας συνδυάζονται με κατάλληλες διαμορφώσεις και κατασκευές στο έδαφος (γεωεναλλάκτες), προσφέροντας όλα τα πλεονεκτήματα των υδρόψυκτων αντλιών θερμότητας και εξασφαλίζοντας υψηλότερη ενεργειακή απόδοση. Η σωστή σχεδίαση των διαμορφώσεων και η προσεκτική διαστασιολόγηση των γεωεναλλακτών εξασφαλίζει τη χαμηλότερη θερμοκρασία συμπίκνωσης στην θερινή λειτουργία και αντίστοιχα την υψηλότερη θερμοκρασία εξάτμισης κατά την χειμερινή λειτουργία οδηγώντας το σύστημα στην υψηλή ενεργειακή απόδοση και το χαμηλό κόστος λειτουργίας [1].

Οι ΓΑΘ αποτελούν ελκυστικές εναλλακτικές λύσεις σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης εξαιτίας της υψηλότερης ενεργειακής απόδοσής τους [2]. Σύμφωνα με τον Genchi κ.ά. [3] εκτιμάται ότι η χρήση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας σε σχέση με τις αερόψυκτες αντλίες θερμότητας θα μπορούσε να συμβάλει στη μείωση κατά 54% των εκπομπών CO₂, ή 39.519 ton CO₂ το έτος για τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης. Οι Sanner και Kohlsch [4] αναφέρθηκαν στη μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 48%, στην θερινή λειτουργία, μιας ΓΑΘ σε κτίριο εμπορικής χρήσης, συγκρινόμενη με ένα συμβατικό σύστημα με καύσιμο πετρέλαιο για θέρμανση και ηλεκτροκίνητο ψύκτη για ψύξη.

Οι Heally και Ugursal [2] προσομοίωσαν διάφορα συστήματα ΓΑΘ. Τα αποτελέσματα των μελετών τους δείχνουν ότι η απόδοση των ΓΑΘ επηρεάζεται από ένα πλήθος παραμέτρων του συστήματος (επιφάνεια γεωεναλλάκτη, βάθος τοποθέτησης του σωλήνα, παροχή, απόσταση οριζόντιων σωλήνων και μέγεθος αντλίας θερμότητας). Η μελέτη αυτή δείχνει καθαρά

ότι οι ΓΑΘ είναι οικονομικά συμφέρουσες σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης και θέρμανσης/ψύξης χώρων, που χρησιμοποιούνται σε κατοικίες σε ψυχρά κλίματα. Οι Ζώγου και Σταματέλος [5] επεσήμαναν την επίδραση των κλιματικών συνθηκών στη σχεδίαση των συστημάτων των ΓΑΘ για θέρμανση και ψύξη χώρων. Συμπεραίνουν ότι στα ήπια μεσογειακά κλίματα εάν συμπεριληφθεί και η λειτουργία της ψύξης τότε υπολογίζονται ποσοστιαία υψηλότερα κέρδη από τη λειτουργία των ΓΑΘ.

Σαν αποτέλεσμα των πλεονεκτημάτων των ΓΑΘ κλειστού κυκλώματος πολλές εργασίες έχουν εκπονηθεί σε όλο τον κόσμο και χρησιμοποιούνται σε πολυάριθμες εφαρμογές τόσο στον εμπορικό όσο και στον οικιακό τομέα. Ενδεικτικά από στοιχεία για το έτος 2005 υπολογίζεται πως η παγκόσμια εγκαταστημένη θερμική ισχύς των ΓΑΘ ανέρχεται σε 15.270 MW_{th} και η ετήσια χρήση ενέργειας σε 24.000 GWh, ενώ στην Ελλάδα η εγκατεστημένη θερμική ισχύς των ΓΑΘ εκτιμάται σε 2 MW_{th} [6].

Οι βασικοί και πιο διαδεδομένοι τύποι ΓΑΘ, που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές αβαθούς γεωθερμίας, είναι οι αντλίες θερμότητας νερού-αέρα και νερού-νερού. Στις περιπτώσεις των αντλιών αυτών το δευτερεύον κύκλωμα της ΓΑΘ τροφοδοτεί με αέρα ή νερό την εγκατάσταση κλιματισμού του κτιρίου. Πρόσφατα όμως έχουν κυκλοφορήσει υδρόψυκτες εκδόσεις πολυδιαιρούμενων συστημάτων αντλιών θερμότητας, στις οποίες η διανομή θέρμανσης/ψύξης στις πολλαπλές εσωτερικές μονάδες γίνεται με μεταβλητή παροχή του ψυκτικού μέσου (Variable Refrigerant Volume, VRV). Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι να παρουσιάσει μία πρωτοποριακή εγκατάσταση υδρόψυκτης αντλίας θερμότητας μεταβλητής παροχής ψυκτικού μέσου (VRV) σε συνδυασμό με κλειστό κύκλωμα οριζόντιου γεωεναλλάκτη σπειροειδούς διαμόρφωσης (Slinky®).

2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

2.1. Περιγραφή του συστήματος

Το κτίριο της προσθήκης γραφείων στο οποίο πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή είναι μονώροφο, τυπικό γραφείων και έχει ανεγερθεί σε επαφή στην μια πλευρά με υφιστάμενο βιομηχανικό κτίριο. Η συνολική στεγασμένη έκταση της προσθήκης είναι 240 m².

Οι καλυπτόμενοι από το σύστημα της υδρόψυκτης αντλίας θερμότητας χώροι είναι τυπικοί χώροι γραφείων. Η εγκατάσταση της ΓΑΘ, αφορά τόσο στην θέρμανση όσο και στην ψύξη των γραφείων, μέσω συστήματος διανομής θερμότητας και ψύξης στους χώρους μεταβλητής παροχής ψυκτικού μέσου (VRV).

Οι υδρόψυκτες αντλίες θερμότητας μεταβλητής παροχής ψυκτικού μέσου, VRV έχουν ένα αξιοσημείωτο δυναμικό για χρήση σε συστήματα αβαθούς γεωθερμίας, αλλά παρουσιάζουν έναν συγκεκριμένο περιορισμό όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με γεωεναλλάκτη κλειστού βρόχου (closed loop GSHP). Η αντλία θερμότητας πρέπει να συνδεθεί με το κλειστό κύκλωμα νερού του γεωεναλλάκτη έτσι ώστε να διασφαλίζεται υποχρεωτικά θερμο-κρασία εισόδου (EWT) στη μονάδα μεγαλύτερη των 10°C.



Εικόνα 1: Γεωθερμική αντλία θερμότητας VRV

Στον Πίνακα 1 δίνονται οι προδιαγραφές των κύριων στοιχείων του γεωθερμικού συστήματος.

Πίνακας 1: Προδιαγραφές των κύριων στοιχείων του γεωθερμικού συστήματος		
Στοιχείο	Περιγραφή	Τεχνικές προδιαγραφές
Γεωεναλλάκτης	Σωλήνας πολυαιθυλενίου (PE 100 - SDR 17) κατά DIN 8074/8075 3ης γενιάς, PN 10 atm	Συνολικό μήκος μαζί με τις κύριες σωληνώσεις 5.750m, ονομαστικής διατομής 1” (διαμέτρου και πάχους: Φ 32 X 2,0). Ο οριζόντιος γεωεναλλάκτης σπειροειδούς διαμόρφωσης (Slinky®) αποτελείται από έξη (6) βρόχους μήκους 900m ο κάθε ένας
Αντλία ανακυκλοφορίας	Κατακόρυφη πολυβάθμια φυγοκεντρική αντλία	GRUNDFOS CHV 4-80, ονομαστικής παροχής: 3,6 m ³ /h και μανομετρικού 40 m
Δοχείο αδράνειας	Δοχείο αδράνειας κλειστού κυκλώματος γεωεναλλάκτη	CORDIVARI, 300 lt
Γεωθερμική αντλία θερμότητας	Υδρόψυκτη αντλία θερμότητας μεταβλητής παροχής ψυκτικού μέσου (Variable Refrigerant Volume, VRV-WII)	RWEYQ10MY1, της εταιρίας: DAIKIN. Ονομαστική ψυκτική απόδοση 27,30kW, με ηλεκτρική ισχύ εισόδου 6,03kW (COP=4,53) και ονομαστική θερμική απόδοση 31,50kW, με ηλεκτρική ισχύ εισόδου 6,05kW (COP=5,21)
Εσωτερικές μονάδες οροφής	Τύπου κασέτας 4 κατευθύνσεων	FX2Q της εταιρίας: DAIKIN. Εγκαταστάθηκαν συνολικά 11 εσωτερικές μονάδες σε ισάριθμους χώρους γραφείων.

2.2. Κλιματολογικά στοιχεία και ιδιότητες εδάφους

Ο τόπος του έργου και η οικοπεδική έκταση στην οποία έγινε η εφαρμογή της τεχνικής της ΓΑΘ -VRV βρίσκεται στην περιοχή Διαβατών της Ν. Ιωνίας του Ν. Θεσσαλονίκης.

Για τον υπολογισμό των θερμικών/ψυκτικών φορτίων του κτιρίου και την επιλογή του μεγέθους της αντλίας θερμότητας, κατά την ενεργειακή μελέτη που εκπονήθηκε, χρησιμοποιήθηκαν τα κλιματικά δεδομένα της πόλης της Θεσσαλονίκης. Οι βασικές παράμετροι του κλίματος στην περιοχή δίνονται στον Πίνακα 2 [7].

Το συνολικό θερμικό φορτίο του κτιρίου κατά τη φάση σχεδιασμού υπολογίστηκε ίσο με 22,0kW με τις απώλειες αερισμού να είναι το 25% αυτού του φορτίου. Το συνολικό ψυκτικό φορτίο υπολογίστηκε ίσο με 23,5 kW και εμφανίζεται στις 15:00.

Πίνακας 2: Βασικοί παράμετροι κλίματος	
Γεωγραφικό πλάτος / μήκος	40.5° N / 23.0° E
Θερμαντική Περίοδος	Νοέμβριος–Μάρτιος
Συνθήκες Σχεδιασμού Θερμικού Φορτίου (99.6%)	-5.0°C
Μέση Ημερήσια Θερμοκρασία Ιανουαρίου	6.1°C
Βαθμομέρες Θέρμανσης (βάσης 18°C)	1725 Kdays
Ψυκτική Περίοδος	Μέσο Μαΐου–Σεπτέμβριος
Συνθήκες Σχεδιασμού Ψυκτικού Φορτίου (0.4% DB/MCWB)	34.0°C DB/ 21.0°C WB
Μέση Ημερήσια Θερμοκρασία Ιουλίου	26°C

Λιθολογικά η περιοχή ενδιαφέροντος μετά από την εκσκαφή που πραγματοποιήθηκε σε βάθος 2m περιμετρικά του οικοπέδου έδειξε ότι περιλαμβάνει αμμώδεις προσχώσεις με μη συνεκτικά εδάφη. Βασικά δεδομένα για την διαστασιολόγηση του οριζόντιου γεωεναλλάκτη αποτελούν η μέση θερμοκρασία και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους στο βάθος εγκατάστασής του.

Για τον υπολογισμό του οριζόντιου γεωεναλλάκτη χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα χαρακτηριστικά του εδάφους της εφαρμογής που δίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά του εδάφους της εφαρμογής	
Ιδιότητες Εδάφους	Τιμή
Θερμική Αγωγιμότητα	0,87 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Πυκνότητα	2.000 kg·m ⁻³
Ειδική Θερμοχωρητικότητα	840 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Θερμική Διαχυτότητα	0,045 m ² /day
Αδιατάρακτη θερμοκρασία εδάφους	16,7°C

Συγκεκριμένα για τις παραπάνω θερμικές ιδιότητες το έδαφος θεωρήθηκε μη συνεκτικό ελαφρύ, αμμώδες και σχετικά υγρό. Ενώ η ετήσια μέση αδιατάρακτη θερμοκρασία εδάφους (σε βάθος 2m) θεωρήθηκε ίση με την μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα συν 1,1°C [8].

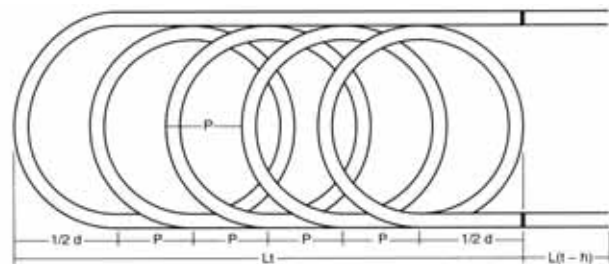
2.3. Περιγραφή και καθορισμός του οριζόντιου γεωεναλλάκτη

Με δεδομένη την ανάγκη για την κάλυψη όσο το δυνατόν μικρότερης έκτασης στο οικόπεδο της εφαρμογής αλλά και της μείωσης του κόστους εκσκαφής επιλέχθηκε η διαμόρφωση του οριζόντιου γεωεναλλάκτη με την μορφή του Slinky® (βλέπε Εικόνες 1 και 2).

Στη συνέχεια παρατίθεται υπολογισμός του απαιτούμενου μήκους εκσκαφής [9], για την τοποθέτηση σωλήνα μήκους 300 m.

Δεδομένα:

$d = 1,1 \text{ m}$	Διάμετρος βρόχου (loop)
$P = 0,25 \text{ m}$	Βήμα έλικας (βρόχου)
$L_p = 300 \text{ m}$	Συνολικό μήκος κουλούρα
$L_l = \pi \cdot d \text{ m}$	Μήκος βρόχου (περίμετρος)



Εικόνα 1: Διαμόρφωση Slinky®

Αποτελέσματα:

Αριθμός βρόχων (loops), N_l

$$N_l \approx 74 \text{ αριθμός βρόχων (loops)}$$

Μήκος εκσκαφής, L_t

$$N_l = \frac{L_p - d \cdot \left(\frac{\pi}{2} + 1,0 \right)}{L_l + 2 \cdot P} = \frac{L_p - d \cdot \left(\frac{\pi}{2} + 1,0 \right)}{\pi \cdot d + 2 \cdot P}$$

$$L_t = N_l \cdot P + d$$

$$L_p = 294 \text{ m} \quad \text{Μήκος σωλήνα για } N_l = 74$$

$$L_t = 20 \text{ m} \quad \text{Μήκος εκσκαφής για } N_l = 74$$

$$L(t-h) = 4 \text{ m} \quad \text{Μήκος σωλήνα από το τέλος της εκσκαφής μέχρι το φρεάτιο σύνδεσης}$$

Με τη χρήση ειδικού λογισμικού (Ground Loop Design v.5.3) σχεδιάσθηκε προσεκτικά το οριζόντιο κύκλωμα του γεωεναλλάκτη σε σπειροειδή διαμόρφωση (Slinky®), έτσι ώστε να τηρείται ο περιορισμός της θερμοκρασίας εισόδου (EWT) στη μονάδα (>10°C).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα σχεδιασμού ο οριζόντιος γεωεναλλάκτης αποτελείται από έξι (6) βρόχους μήκους 900m ο κάθε ένας.

Εγκαταστάθηκαν σωληνώσεις πολυαιθυλενίου (PE 100 - SDR 17) κατά DIN 8074/8075, 3^{ης} γενιάς, συνολικού μήκους μαζί με τις κύριες σωληνώσεις 5.750m και ονομαστικής διατομής 1" (διαμέτρου και πάχους: Φ 32 X 2,0).



Εικόνα 2: Εκσκαφή και τοποθέτηση Slinky®

Το υγρό του πρωτεύοντος κυκλώματος (γεωεναλλάκτη) είναι διάλυμα νερού-αντιψυκτικού (αιθυλενογλυκόλης) περιεκτικότητας 10% (προστασία έως τους -5°C) και δοκιμάστηκε σε πίεση 5 bar. Η παροχή του κλειστού κυκλώματος του γεωεναλλάκτη είναι: 60 lt/min ή 3,6 m³/h, ενώ η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου στον γεωεναλλάκτη κατά την χειμερινή λειτουργία σχεδιάστηκε να είναι: $6,5^{\circ}\text{C}/10^{\circ}\text{C}$.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τον Οκτώβριο του 2008 συμπληρώθηκαν 19 μήνες συνεχούς λειτουργίας και καταγραφής της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας του γεωθερμικού συστήματος (βλέπε Πίνακα 4). Η συνολική και η μέση ημερήσια κατανάλωση για το διάστημα αυτό διατηρήθηκε σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Πιο συγκεκριμένα σε σύνολο 517 ημερών καταγραφής, εκ των οποίων οι 370 ήταν εργάσιμες, καταναλώθηκαν 6.975 kWh οι οποίες αντιστοιχούν σε 19 kWh ανά εργάσιμη ημέρα.

Πίνακας 4: Καταγραφές καταναλώσεων ηλεκτρικής ενέργειας

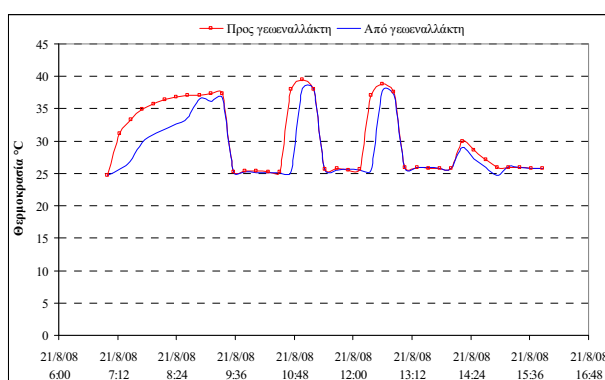
Ημερομηνία	Ένδειξη μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας	Κατανάλωση ανά ημέρα (kWh/εργάσιμη ημέρα)
30/04/2007	484,5	
03/05/2007	537,0	13,13
18/05/2007	566,8	2,48
25/05/2007	582,5	2,62
02/06/2007	596,1	2,27
04/06/2007	600,5	4,40
08/06/2007	609,2	1,74
02/02/2008	3.890,0	19,19
18/04/2008	5.244,0	24,62
05/08/2008	6.222,2	12,54
07/08/2008	6.275,2	17,67
10/09/2008	6.914,2	25,56
16/09/2008	6.952,8	7,71
26/09/2008	6.975,0	2,36

Για την παρακολούθηση της λειτουργίας διεξήχθησαν μετρήσεις σε διάφορες εποχές του χρόνου και σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας με σύστημα συνεχούς καταγραφής δεδομένων (data logger, τύπος: BABUC της LSI s.p.a.) αποτελούμενο από θερμόμετρα επαφής για τη μέτρηση των αγωγών προσαγωγής και επιστροφής του γεωεναλλάκτη καθώς και θερμόμετρο αντίστασης Pt100 για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.

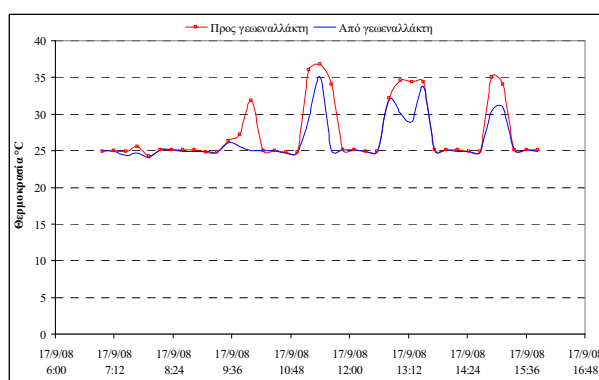
Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της αντλίας θερμότητας έγινε με φορητό αναλυτή ηλεκτρικής ενέργειας (τύπος: VIP System 3 Analyser της ELCONTROL s.r.l.).

Η παροχή νερού στο γεωεναλλάκτη διαπιστώθηκε ότι παραμένει σταθερή στην τιμή 3,6 m³/h, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο, αφού επιβάλλεται από τη λειτουργία της αντλίας κυκλοφορίας, και μηδενίζεται μόνο όταν σταματήσει η λειτουργία της αντλίας θερμότητας.

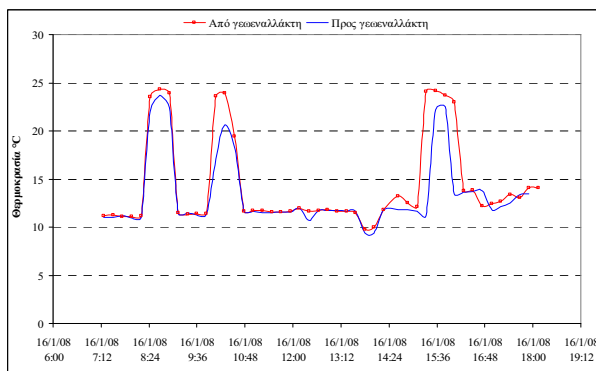
Μετρήσεις διεξήχθησαν και τις τέσσερις εποχές του χρόνου (Ιανουάριο, Μάρτιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο του 2008) διάρκειας μιας εβδομάδας την κάθε περίοδο. Στα Διαγράμματα 1-4 δίνονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα μετρήσεων της δυσμενέστερης ημέρας κάθε περιόδου.



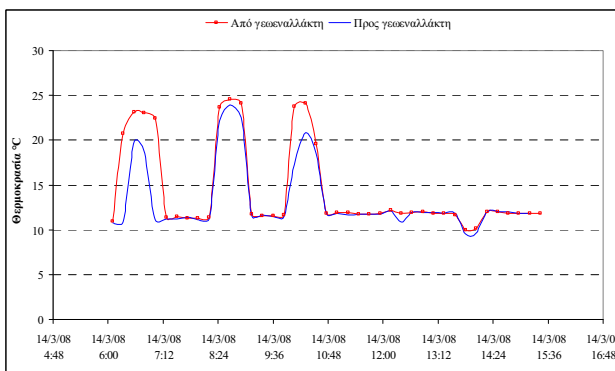
Διάγραμμα 1: Θερμοκρασίες εισόδου – εξόδου στον γεωεναλλάκτη, Αύγουστος '08



Διάγραμμα 2: Θερμοκρασίες εισόδου – εξόδου στον γεωεναλλάκτη, Σεπτέμβριος '08



Διάγραμμα 3: Θερμοκρασίες εισόδου – εξόδου στον γεωεναλλάκτη, Ιανουάριος '08



Διάγραμμα 4: Θερμοκρασίες εισόδου – εξόδου στον γεωεναλλάκτη, Μάρτιος '08

Παρατηρήθηκε ότι το σύστημα έχει λειτουργήσει ομαλά όλη την περίοδο της 17μηνος λειτουργίας και διαπιστώθηκε ότι το κλειστό κύκλωμα του γεωεναλλάκτη παρέχει την προβλεψιμη θερμοκρασία (>10°C) στην κεντρική μονάδα της αντλίας θερμότητας κατά την κρίσιμη χειμερινή περίοδο.

Στους Πίνακες 5 και 6 δίνονται αντιπροσωπευτικές τιμές μετρήσεων των παραμέτρων και αποτελεσμάτων για τις χαρακτηριστικές, δυσμενέστερες ημέρες των περιόδων μετρήσεων της θερμαντικής και ψυκτικής περιόδου, κατά τις τέσσερις εποχές του χρόνου.

Πίνακας 5. Αντιπροσωπευτικές μέσες τιμές μετρημένων παραμέτρων και αποτελεσμάτων τη ψυκτική περίοδο		
Παράμετρος	Αύγουστος 2008	Σεπτέμβριος 2008
<i>Μετρημένες παράμετροι</i>		
Θερμοκρασία εισόδου νερού στον γεωεναλλάκτη (°C)	35,7	34,4
Θερμοκρασία εξόδου νερού από τον γεωεναλλάκτη (°C)	31,0	29,0
Εξωτερική θερμοκρασία (°C)	38,5	32,6
Συνολική κατανάλωση ισχύος (kW)	3,181	3,575
<i>Υπολογισμένες παράμετροι</i>		
Θερμική απόρριψη στο έδαφος (kW)	19,483	22,196
Ψυκτική ισχύς (kW)	16,140	18,435
Συντελεστής απόδοσης αντλίας θερμότητας (COP)	5,07	5,16

Πίνακας 6. Αντιπροσωπευτικές μέσες τιμές μετρημένων παραμέτρων και αποτελεσμάτων τη θερμαντική περίοδο		
Παράμετρος	Ιανουάριος 2008	Μάρτιος 2008
<i>Μετρημένες παράμετροι</i>		
Θερμοκρασία εισόδου νερού στον γεωεναλλάκτη (°C)	20,7	20,9
Θερμοκρασία εξόδου νερού από τον γεωεναλλάκτη (°C)	23,9	24,1
Εξωτερική θερμοκρασία (°C)	7,3	12,0
Συνολική κατανάλωση ισχύος (kW)	2,654	2,458
<i>Υπολογισμένες παράμετροι</i>		
Θερμική εξαγωγή από το έδαφος (kW)	13,595	13,595
Θερμική ισχύς (kW)	16,168	15,972
Συντελεστής απόδοσης αντλίας θερμότητας (COP)	6,09	6,50

Από τις καταγραφές των χαρακτηριστικών μεγεθών λειτουργίας στις τέσσερις περιόδους λειτουργίας, μετρήθηκε μέγιστη θερμοκρασία εξόδου του νερού από το γεωεναλλάκτη από 21°C - 24°C κατά τους χειμερινούς μήνες και περίπου 39°C κατά τους θερινούς. Αντίστοιχα και όσο αφορά την ελάχιστη θερμοκρασία εξόδου του νερού από το γεωεναλλάκτη αυτή κυμαίνεται στους 10°C το χειμώνα και στους 32°C το καλοκαίρι.

Τα θερμοκρασιακά αυτά επίπεδα εξασφαλίζουν την οικονομική λειτουργία του συστήματος δεδομένου ότι η απόδοση του συστήματος στις περιόδους θέρμανσης είναι της τάξης του 6,0 με 6,5 ενώ αντίστοιχα κατά τις ψυκτικές περιόδους η απόδοση κυμαίνεται από 5,0 έως 5,2. Η απόδοση αυτή κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητική ειδικά στους χειμερινούς μήνες.

Οι αποδόσεις της συγκεκριμένης αντλίας θερμότητας (VRV) συγκρίθηκαν για τα ίδια επίπεδα θερμοκρασιών με τις αποδόσεις τόσο της αερόψυκτης αντλίας θερμότητας (VRV) τις ίδιες εταιρίας, όσο και με τις αποδόσεις άλλων αντίστοιχων ΓΑΘ νερού-νερού ή νερού-αέρα.

Στους Πίνακες 7 και 8 που ακολουθούν γίνεται η σύγκριση των αποδόσεων της υδρόψυκτης αντλίας θερμότητας (VRV) της εφαρμογής, με την αντίστοιχη αερόψυκτη και με ενδεικτικές αποδόσεις, αντίστοιχης ισχύος, αντλιών θερμότητας νερού – νερού και νερού – αέρα, όπως αυτές προκύπτουν από αναλυτικούς πίνακες αποδόσεων κατασκευαστών.

Από τη σύγκριση αυτή για τους μήνες Ιανουάριο, Μάρτιο, όπου η θερμοκρασία του αέρα μετρήθηκε περίπου 7-12°C και η απόδοση της αντλίας θερμότητας VRV ήταν μεταξύ 6,1 – 6,5 η χρήση αερόψυκτης αντλίας θερμότητας VRV θα ήταν σημαντικά χαμηλότερης απόδοσης (από 4,4 έως 5,0). Οι ενδεικτικές αποδόσεις άλλων συμβατικών ΓΑΘ νερού-νερού ή νερού-αέρα αντίστοιχα θα κυμαίνονταν σε χαμηλότερα επίπεδα αποδόσεων της τάξης των 5,3 έως 6,0.

Πίνακας 7. Σύγκριση αποδόσεων (COP) αντλιών θερμότητας στη ψυκτική περίοδο		
Υδρόψυκτη μονάδα VRV εφαρμογής	5,07	5,16
Αερόψυκτη μονάδα VRV	4,25	4,70
Αντλία θερμότητας νερού-νερού	3,70	3,90
Αντλία θερμότητας νερού-αέρα	3,55	3,80

Πίνακας 8. Σύγκριση αποδόσεων (COP) αντλιών θερμότητας στη θερμαντική περίοδο		
Υδρόψυκτη μονάδα VRV εφαρμογής	6,09	6,50
Αερόψυκτη μονάδα VRV	4,38	4,95
Αντλία θερμότητας νερού-νερού	5,25	5,80
Αντλία θερμότητας νερού-αέρα	5,50	6,00

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετρήθηκαν οι αποδόσεις της αντλίας θερμότητας μεταβλητής παροχής ψυκτικού μέσου (VRV) σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας πλήρους ή μερικού φορτίου στις διάφορες εποχές του χρόνου και αποδείχθηκε ότι η συγκεκριμένη αντλία παρουσιάζει υψηλότερους βαθμούς απόδοσης από την αντίστοιχη αερόψυκτη αλλά και από άλλες αντίστοιχες γεωθερμικές αντλίες θερμότητας νερού-νερού ή νερού-αέρα. Η χρήση υδρόψυκτης αντλίας θερμότητας μεταβλητής παροχής ψυκτικού μέσου (VRV) σε συνδυασμό με κλειστού κυκλώματος οριζόντιο γεωεναλλάκτη σε σπειροειδή διαμόρφωση (Slinky®), αποτελεί καινοτόμο εφαρμογή, που αποδεικνύεται αποδοτική ως ένα ενεργειακό σύστημα αβαθούς γεωθερμίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Swardt C., Meyer J., ‘A performance comparison between an air-source and ground-source reversible heat pump’, International Journal of Energy Research, p.899–910, 2001.
2. Healy P., Ugursal V., ‘Performance and economic feasibility of ground source heat pumps in cold climate’, International Journal of Energy Research, p. 857–870, 1997
3. Genchi Y., Kikegawa Y., Inaba A., ‘CO₂ payback-time assessment of a regional-scale heating and cooling system using a ground source heat-pump in a high energy consumption area in Tokyo’, Applied Energy; p.147–160, 2002.
4. Sanner B., Kohlsch O., ‘Examples of ground source heat pumps (GSHP) from Germany. International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy’, GtV IGD2001, 2001. <http://www.geothermie.de>
5. Zogou O., Stamatelos A., ‘Effect of climatic conditions on the design optimization of heat pump systems for space heating and cooling’, Energy Conversion and Management; p. 609–6221, 1998.
6. Φυτίκας Μ., Γεωθερμία στην Ελλάδα, Αγορά – Εφαρμογές – Θερμικό Πλαίσιο, Ημερίδα «Πρωτοβουλία για εξαγωγή τεχνολογιών ΑΠΕ», Ελληνογερμανικό ΕΒΕ, Θεσσαλονίκη, 09-11 Μαΐου 2007.
7. Μιχόπουλος Α., Μπόζης Δ., Κυριάκης Ν., Συμπεράσματα από τη λειτουργία του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας του νέου Δημαρχείου Πυλαίας κατά τα έτη 2003 – 2005, Πρακτικά 8ου Εθνικού Συνεδρίου για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, σελ. 511-518, Θεσσαλονίκη.
8. National Rural Electric Cooperative Association, International Ground-Source Heat Pump Association (IGSHPA), ‘Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems – Installation Guide’, Oklahoma State University, 1995.
9. National Rural Electric Cooperative Association, International Ground-Source Heat Pump Association (IGSHPA), ‘Closed-Loop Geothermal Systems – Slinky® Installation Guide’, Oklahoma State University, 1995.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ ΜΕ ΖΩΝΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΟΤΗΤΑΣ

Κ. Τσελεπίδου και Κ.Α. Κατσιφαράκης

Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ. 541 24
Θεσσαλονίκη, e-mail: klkats@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή μελετάται η βελτιστοποίηση ενός συστήματος εκμετάλλευσης γεωθερμικού υδροφορέα χαμηλής ενθαλπίας, με τη βοήθεια της μεθόδου των γενετικών αλγορίθμων, η οποία έχει ήδη χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε συναφή προβλήματα διαχείρισης υπόγειων υδατικών πόρων. Από υδραυλική άποψη, ο εξεταζόμενος υδροφορέας έχει δύο ζώνες διαφορετικής μεταφορικότητας, ενώ από θερμική μπορεί να έχει οποιονδήποτε αριθμό ζωνών διαφορετικής θερμοκρασίας. Στη διαδικασία βελτιστοποίησης υπεισέρχονται το ετήσιο κόστος άντλησης της απαιτούμενης παροχής και το κόστος απόσβεσης του δικτύου που συγκεντρώνει το θερμό νερό από τις γεωτρήσεις σε δεξαμενή στα όρια του γεωθερμικού πεδίου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας οδηγεί σε μείωση του κόστους εκμετάλλευσης γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας, η οποία μπορεί να είναι καθοριστική σε περιπτώσεις οριακής οικονομικής βιωσιμότητας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ήπιες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στις οποίες συγκαταλέγεται η γεωθερμία, αποτελούν, μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα, την καλύτερη, αν όχι τη μόνη, βιώσιμη λύση του ενεργειακού προβλήματος και από ποσοτική και από ποιοτική άποψη, για τους ακόλουθους λόγους: α) η χρήση τους επιβαρύνει πολύ λιγότερο το περιβάλλον, από όσο η χρήση των συμβατικών πηγών ενέργειας και β) ουσιαστικά είναι μηχανισμοί παροχής ενέργειας, αν και η παροχή αυτή δεν είναι απεριόριστη. Σε ό,τι αφορά τη γεωθερμία, οι περιορισμοί στην παροχή προκύπτουν από την ανάγκη διατήρησης τόσο του θερμικού περιεχομένου, όσο και του μέσου μεταφοράς του στην επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή του νερού των γεωθερμικών υδροφορέων.

Επιπλέον, η αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο συντελεί στην παγκόσμια σταθερότητα, διότι μειώνει την εξάρτηση των καταναλωτών ενέργειας από τις μεγάλες εταιρείες καυσίμων, καθώς και από τις χώρες παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου ή διέλευσης των αντίστοιχων αγωγών μεταφοράς. Ακόμη οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν έχουν καμιά σχέση με στρατιωτικές εφαρμογές.

Οι γεωθερμικές πηγές χαμηλής ενθαλπίας απαντώνται σε σχετική αφθονία σε πολλές περιοχές του πλανήτη [1] και μπορούν να καλύψουν σημαντικό μέρος της ζήτησης ενέργειας για θέρμανση χώρων και θερμό νερό για οικιακή χρήση. Ίσως μάλιστα η συμμετοχή τους στο ενεργειακό ισοζύγιο να υποτιμάται, διότι η χρήση τους σε πολλές περιπτώσεις δεν καταγράφεται με ακρίβεια. Η Ελλάδα είναι μια από τις χώρες με σημαντικό αναξιοποίητο γεωθερμικό δυναμικό [2], [3], αν και έχει γίνει σημαντική έρευνα πεδίου [4].

Καθώς η οικονομική απόδοση των εφαρμογών της γεωθερμικής ενέργειας εξακολουθεί να είναι οριακή, όταν δεν λαμβάνεται υπ' όψιν το περιβαλλοντικό κόστος, η βελτιστοποίησή της έχει εξαιρετική σημασία. Μπορεί μάλιστα να καθορίσει ακόμη και το αν θα υλοποιηθεί κάποιο επενδυτικό σχέδιο. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η ελαχιστοποίηση του κόστους ενός συλλογικού συστήματος θέρμανσης με γεωθερμική ενέργεια χαμηλής ενθαλπίας. Οι παράμετροι που συνεξετάζονται είναι το ετήσιο κόστος άντλησης του γεωθερμικού νερού και η απόσβεση του κόστους του δικτύου συλλογής του σε κατάλληλη δεξαμενή.

2. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στην παρούσα εργασία ως εργαλείο βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται η μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων. Για το θεωρητικό υπόβαθρο και τις εφαρμογές της μεθόδου αυτής υπάρχουν εκτεταμένα ειδικά συγγράμματα π.χ. [5], [6], [7]. Επιγραμματικά αναφέρουμε τα ακόλουθα: Οι γενετικοί αλγόριθμοι (Γ.Α.) είναι μια μαθηματική απομίμηση της βιολογικής διαδικασίας εξέλιξης των ειδών. Ξεκινούν με έναν αριθμό από τυχαίες δυνατές λύσεις του εξεταζόμενου προβλήματος. Οι λύσεις αυτές, που αποκαλούνται χρωμοσώματα, αποτελούν τον πληθυσμό της πρώτης γενιάς. Στους κλασικούς δυαδικούς Γ.Α. τα χρωμοσώματα είναι δυαδικές συμβολοσειρές (binary strings), π.χ. [01001110].

Ο πληθυσμός της πρώτης γενεάς υφίσταται αξιολόγηση, με βάση μια διαδικασία ή συνάρτηση αποτίμησης (evaluation function). Η διαδικασία αυτή εξαρτάται από το εξεταζόμενο πρόβλημα, π.χ. μπορεί να περιλαμβάνει ένα μοντέλο προσομοίωσης ροής. Μπορεί ακόμη να περιλαμβάνει «ποινή» για τη μη τήρηση κάποιου από τους περιορισμούς του προβλήματος. Κατόπιν, από τα χρωμοσώματα της πρώτης γενιάς παράγονται αυτά της δεύτερης γενιάς, με τη βοήθεια τριών βασικών τελεστών, που μιμούνται βιολογικές διαδικασίες. Αυτοί είναι: α) η επιλογή (selection) β) η διασταύρωση (crossover) και γ) η μετάλλαξη (mutation). Πολλές φορές, χρησιμοποιούνται επιπροσθέτως και άλλοι τελεστές.

Η διαδικασία της επιλογής, που οδηγεί στη δημιουργία του ενδιαμέσου πληθυσμού, είναι μια μαθηματική απομίμηση της θεωρίας του Δαρβίνου περί επικράτησης του καλύτερα προσαρμοσμένου στο περιβάλλον. Γίνεται με προκαθορισμένο «τυχαίο» τρόπο, και συμμετέχουν σε αυτήν όλα τα χρωμοσώματα, με ξεχωριστή πιθανότητα «επιβίωσης» το καθένα. Αυτή η πιθανότητα αντιστοιχεί στην καταλληλότητα (fitness) του χρωμοσώματος, που προέκυψε από την διαδικασία αξιολόγησης. Έτσι τα συγκριτικώς καλύτερα χρωμοσώματα έχουν περισσότερες πιθανότητες να περάσουν στην επόμενη γενεά του Γ.Α. Οι πιο κοινές διαδικασίες επιλογής είναι α) ο τροχός ρουλέτας με άνισα διαστήματα και β) ο διαγωνισμός (tournament). Επιπλέον πολλοί κώδικες, ακολουθώντας τη λεγόμενη επιλεκτική προσέγγιση (elitist approach), περιλαμβάνουν ειδική διαδικασία ενσωμάτωσης ενός τουλάχιστον αντιγράφου του καλύτερου χρωμοσώματος στον ενδιαμέσο πληθυσμό.

Αφού σχηματισθεί ο ενδιαμέσος πληθυσμός, επιλέγονται τυχαία κάποια από τα μέλη του για να υποστούν τις διαδικασίες της διασταύρωσης και της μετάλλαξης (πιθανώς και άλλων τελεστών), ενώ τα υπόλοιπα περνούν αυτούσια στην επόμενη γενιά. Κατά τη διασταύρωση γίνεται ανταλλαγή τμημάτων μεταξύ ζευγών χρωμοσωμάτων, που επιλέγονται τυχαία από τον ενδιαμέσο πληθυσμό. Η μετάλλαξη τέλος, αφορά στους χαρακτήρες, που απαρτίζουν τις συμβολοσειρές των χρωμοσωμάτων (το 0 μετατρέπεται σε 1 και αντιστρόφως).

Η διαδικασία που περιγράφηκε (αξιολόγηση-επιλογή-διασταύρωση-μετάλλαξη-άλλοι τελεστές) επαναλαμβάνεται για έναν προκαθορισμένο αριθμό γενεών. Αν η μέθοδος λειτουργήσει σωστά, στην τελευταία γενιά θα έχει επικρατήσει ένα χρωμοσώμα, το οποίο αντιστοιχεί στη ζητούμενη βέλτιστη (ή σε κάποια σχεδόν βέλτιστη) λύση του προβλήματος.

Στον κώδικα που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, η επιλογή γίνεται με τη μέθοδο του

διαγωνισμού, ενώ ακολουθείται και η επιλεκτική προσέγγιση. Η τήρηση των περιορισμών επιτυγχάνεται με διόρθωση των χρωμοσωμάτων. Τέλος, εκτός από τους κλασικούς τελεστές της διασταύρωσης και της μετάλλαξης, χρησιμοποιείται και η αντιμετάθεση [8]. Αυτή εφαρμόζεται εναλλάξ με τη μετάλλαξη (στις ζυγές και μονές γενιές αντιστοίχως).

3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται ένας γεωθερμικός υδροφορέας, με διαστάσεις 3 x 3 km, που αποτελείται από 2 ζώνες με διαφορετική μεταφορικότητα και 4 ζώνες διαφορετικής θερμοκρασίας. Οι μεταξύ τους διεπιφάνειες έχουν σχεδιασθεί με μαύρη και λευκή γραμμή αντιστοίχως, σε όλα τα σχήματα. Η συνολικώς απαιτούμενη παροχή Q_{Σ} εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αντλούμενου νερού και κυμαίνεται από 500 ως 600 l/s, για θερμοκρασίες 80°C και 60°C αντιστοίχως. Για την άντλησή της χρησιμοποιούνται 4 υπάρχουσες και 6 νέες γεωτρήσεις, η θέση των οποίων θα προκύψει από τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Επομένως, κάθε χρωμόσωμα (δηλαδή κάθε λύση του εξεταζόμενου προβλήματος) είναι ένας συνδυασμός 10 παροχών και 6 ζευγών συντεταγμένων.

Στη συνάρτηση αποτίμησης κάθε χρωμοσώματος συνεκτιμώνται το κόστος άντλησης και το κόστος απόσβεσης του δικτύου συλλογής του γεωθερμικού νερού, το οποίο ενώνει τις γεωτρήσεις με μια κεντρική δεξαμενή. Το κόστος άντλησης δίνεται από τη σχέση:

$$K_{\alpha} = A_{\alpha} \sum_{i=1}^N H_i \cdot Q_i \quad (1)$$

όπου $N=10$ είναι ο αριθμός των γεωτρήσεων, H_i η απόσταση της στάθμης του νερού στη γεώτρηση i από μια δεδομένη επιθυμητή στάθμη, Q_i η παροχή της i (σε l/s) και A_{α} ένας συντελεστής, που εξαρτάται από τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας και την απόδοση των αντλιών. Στις εφαρμογές που παρουσιάζονται στη συνέχεια, τέθηκε $A_{\alpha} = 2.7$ [9], [10]. Με δεδομένη την επιθυμητή στάθμη ανύψωσης του νερού, για την ελαχιστοποίηση του K_{α} αρκεί να ελαχιστοποιηθεί η ποσότητα $K1_{\alpha}$, που δίνεται από τη σχέση:

$$K1_{\alpha} = A_{\alpha} \sum_{i=1}^N s_i \cdot Q_i \quad (2)$$

όπου s_i η πτώση στάθμης του υδραυλικού φορτίου στην παρειά της γεώτρησης i , με επίπεδο αναφοράς την αρχική αδιατάρακτη στάθμη. Επομένως, για τον υπολογισμό του $K1_{\alpha}$, πρέπει να υπολογισθούν τα s_i . Η πτώση στάθμης σε ένα σημείο «άπειρου» υδροφορέα με δύο ζώνες διαφορετικής μεταφορικότητας, από τον οποίο αντλεί νερό μία γεώτρηση, εξαρτάται από τη ζώνη στην οποία βρίσκονται η γεώτρηση και το εξεταζόμενο σημείο. Αν και τα δύο είναι στη ζώνη 1 ισχύει η σχέση (3), ενώ αν η γεώτρηση βρίσκεται στην 1 και το σημείο στη 2, ισχύει η σχέση (4), όπως προκύπτει από τη μέθοδο των εικόνων [11].

$$s = \frac{Q_w}{4\pi T_1} \ln \frac{R^2}{(x - x_w)^2 + (y - y_w)^2} + \frac{C_1 Q_w}{4\pi T_1} \ln \frac{R^2}{(x + x_w)^2 + (y - y_w)^2} \quad (3)$$

$$s = \frac{C_2 Q_w}{4\pi T_1} \ln \frac{R^2}{(x - x_w)^2 + (y - y_w)^2} \quad (4)$$

Στις σχέσεις αυτές Q_w είναι η παροχή της γεώτρησης, x_w, y_w οι συντεταγμένες της, x, y οι συντεταγμένες του σημείου ελέγχου, T_1 η μεταφορικότητα της ζώνης 1 και R η ακτίνα

επιρροής της γεώτρησης, ενώ ο άξονας των y ταυτίζεται με τη διεπιφάνεια των 2 ζωνών. Οι σταθερές C_1 και C_2 δίνονται από τις σχέσεις:

$$C_1 = \frac{1-\gamma}{1+\gamma} \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{2\gamma}{1+\gamma} \quad (6)$$

όπου $\gamma = T_2/T_1$. Αντίστοιχες σχέσεις ισχύουν αν η γεώτρηση βρίσκεται στη ζώνη 2. Αν υπάρχουν πολλές γεωτρήσεις, όπως στην εξεταζόμενη περίπτωση, η τελική σχέση υπολογισμού προκύπτει από την αρχή της επαλληλίας.

Το κόστος απόσβεσης του δικτύου συλλογής του γεωθερμικού νερού δίνεται από τη σχέση:

$$K_\delta = \sum_{i=1}^N A_{\delta i} \cdot L_i \quad (7)$$

όπου L_i είναι το μήκος του σωλήνα που μεταφέρει το γεωθερμικό νερό από τη γεώτρηση i προς κάποια άλλη, πλησιέστερη προς τη δεξαμενή ή προς την ίδια τη δεξαμενή και $A_{\delta i}$ είναι συντελεστής που εκφράζει το κόστος απόσβεσης ανά μέτρο σωλήνα. Στην παρούσα εργασία ο $A_{\delta i}$ παίρνει την τιμή 6 ή 8, αν η μεταφερόμενη παροχή είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από 50 l/s αντιστοίχως [9], [10]. Τελικά η συνάρτηση αποτίμησης δίνεται από τη σχέση:

$$K_{ολ} = K_{1α} + K_\delta \quad (8)$$

Η πορεία των υπολογισμών για την αποτίμηση κάθε χρωμοσώματος είναι επιγραμματικά η ακόλουθη: α) Από τις συντεταγμένες των νέων γεωτρήσεων υπολογίζεται η ζώνη μεταφορικότητας και η ζώνη θερμοκρασίας, στην οποία ανήκουν, με τη βοήθεια αλγορίθμου, που εφαρμόζεται εύκολα για οποιονδήποτε αριθμό ζωνών [12]. β) Από τις αρχικές τιμές των παροχών, που προκύπτουν από το χρωμόσωμα, και τις αντίστοιχες θερμοκρασίες νερού, υπολογίζεται η θερμοκρασία του αντλούμενου νερού και από αυτήν η συνολικώς απαιτούμενη παροχή Q_Σ . γ) Διορθώνονται οι τιμές των παροχών, πολλαπλασιαζόμενες με κατάλληλο συντελεστή, ώστε το άθροισμά τους να ισούται με Q_Σ , χωρίς να αλλάξουν οι μεταξύ τους αναλογίες. δ) Υπολογίζονται οι τιμές της πτώσης στάθμης στις παρειές των γεωτρήσεων, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (3) ή (4) (και την αρχή της επαλληλίας), ώστε να υπολογισθεί ο όρος $K_{1α}$. ε) Υπολογίζονται τα μήκη των κλάδων του συντομότερου δικτύου σύνδεσης των γεωτρήσεων με τη δεξαμενή και οι αντίστοιχες παροχές [9], [10], ώστε να υπολογισθεί ο όρος K_δ . στ) Υπολογίζεται η τιμή της συνάρτησης αποτίμησης $K_{ολ}$ από τη σχέση (8).

3.1. Αποτελέσματα

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν διάφοροι συνδυασμοί τιμών για τις μεταφορικότητες και τις θερμοκρασίες των ζωνών του υδροφορέα. Ο κώδικας βελτιστοποίησης εκτελέστηκε 10 φορές για κάθε συνδυασμό. Τυπικά αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 1, ενώ οι αντίστοιχες διατάξεις των γεωτρήσεων παρουσιάζονται με μορφή διαγραμμάτων.

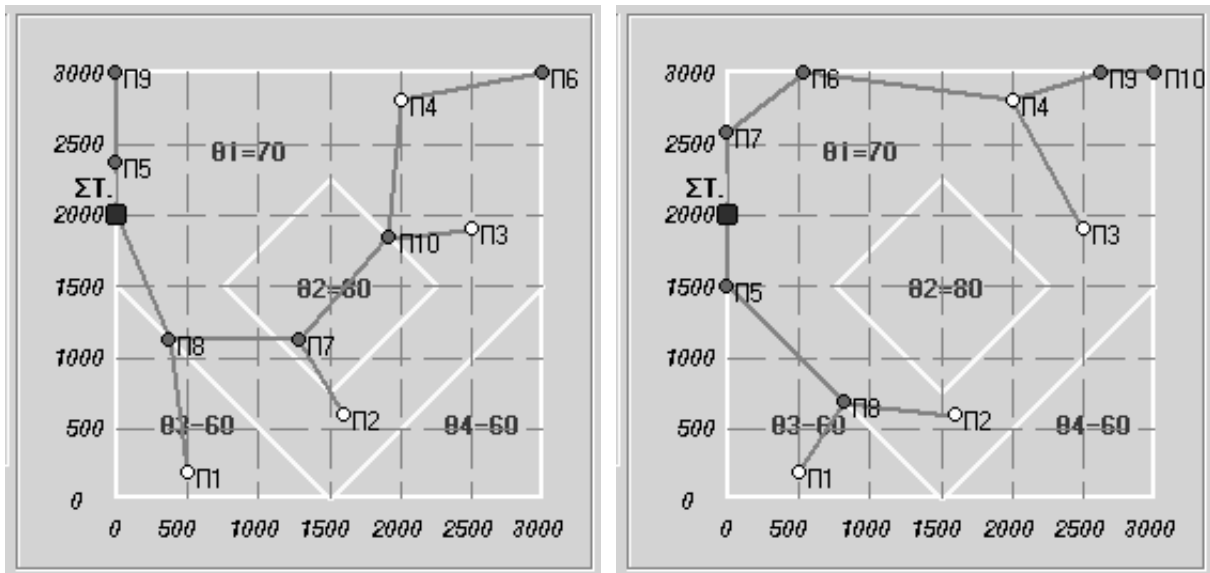
Στο πρώτο σχήμα παρουσιάζονται δύο τυπικές διατάξεις γεωτρήσεων με παρόμοιο «κόστος», για υδραυλικώς ομογενή υδροφορέα, με μεταφορικότητα $T = 0.001 \text{ m}^2/\text{s}$ και θερμοκρασίες ζωνών $\theta_1 = 70^\circ\text{C}$, $\theta_2 = 80^\circ\text{C}$, $\theta_3 = 60^\circ\text{C}$ και $\theta_4 = 60^\circ\text{C}$. Η περίπτωση αυτή, που εξετάστηκε και στις εργασίες [9] και [10], χρησιμεύει ως βάση σύγκρισης. Τα δεδομένα για τις υπόλοιπες εφαρμογές δίνονται επίσης στον πίνακα 1. Σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερη θερμοκρασία έχει η εσωτερική ζώνη. Επίσης σε όλες τις εφαρμογές οι συντεταγμένες της δεξαμενής συγκέντρωσης του νερού είναι (0, 2000).

Πίνακας 1. Δεδομένα και αποτελέσματα εφαρμογών

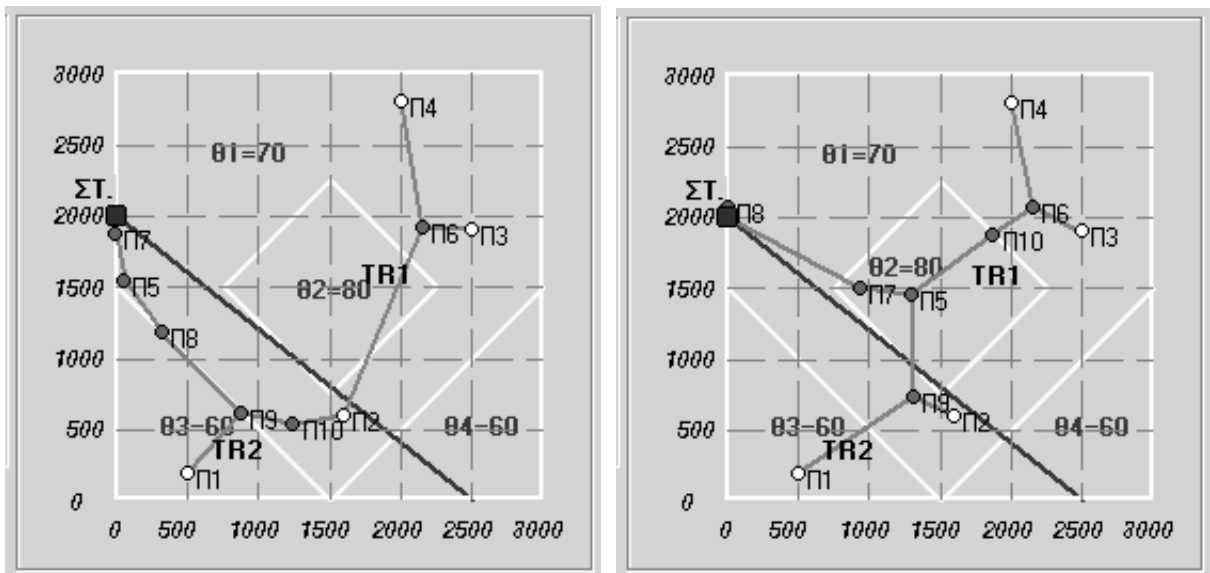
εφαρμογή	1α	1β	2α	2β	3α	3β
T ₁	0.001	0.001	0.001	0.01	0.001	0.01
T ₂	0.001	0.001	0.01	0.001	0.01	0.001
θ ₁	70	70	70	70	70	70
θ ₂	80	80	80	80	90	90
θ ₃	60	60	60	60	60	60
θ ₄	60	60	60	60	60	60
x ₁	500	500	500	500	500	500
y ₁	200	200	200	200	200	200
Q ₁	49.98	49.83	50	9.64	49.99	5.52
x ₂	1600	1600	1600	1600	1600	1600
y ₂	600	600	600	600	600	600
Q ₂	49.98	50	77.95	9.03	49.99	4.42
x ₃	2500	2500	2500	2500	2500	2500
y ₃	1900	1900	1900	1900	1900	1900
Q ₃	49.98	50	12.60	88.84	12.75	47.77
x ₄	2000	2000	2000	2000	2000	2000
y ₄	2800	2800	2800	2800	2800	2800
Q ₄	57.28	51.46	13	49.99	13.54	49.98
x ₅	0	0	59	1297	1493	1875
y ₅	2365	1500	1547	1453	757	1875
Q ₅	57.81	59.25	77.56	66.86	80.46	44.18
x ₆	3000	542	2152	2152	389	226
y ₆	3000	3000	1922	2075	1111	1822
Q ₆	49.98	62.33	9.05	77.10	63.53	141.09
x ₇	1287	0	0	937	998	2063
y ₇	1125	2585	1875	1500	708	2028
Q ₇	55.16	62.33	83.46	68.36	52.58	26.23
x ₈	375	815	322	4	94	750
y ₈	1125	685	1178	2063	1500	1500
Q ₈	55.16	57.14	76.38	76.79	76.48	44.45
x ₉	0	2626	879	1312	762	1687
y ₉	3000	3000	621	734	738	1731
Q ₉	66.29	62.33	79.13	7.53	61.34	70.68
x ₁₀	1909	3000	1243	1872	0	1336
y ₁₀	1841	3000	541	1878	1875	1440
Q ₁₀	53.03	49.83	75.39	76.80	79.07	70.68
K _{ολ}	241209.2	242211.7	78708.35	71533.56	80005.9	60499.65

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, το κοινό χαρακτηριστικό όλων των λύσεων είναι ότι δεν τοποθετείται καμιά νέα γεώτρηση στη θερμοκρασιακή ζώνη 4, που έχει σχετικά χαμηλή θερμοκρασία και βρίσκεται μακριά από τη δεξαμενή.

Στην καλύτερη από τις δύο λύσεις για τον υδραυλικώς ομογενή υδροφορέα τοποθετήθηκαν 2 νέες γεωτρήσεις στη ζώνη με τη μεγαλύτερη θερμοκρασία. Όμως η διαφορά στο κόστος σε σχέση με την άλλη λύση είναι μικρή, διότι απαιτεί μεγαλύτερο μήκος δικτύου, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1. Τυπικές καλύτερες λύσεις για υδραυλικώς ομογενή υδροφορέα ($T = 0.001 \text{ m}^2/\text{s}$).

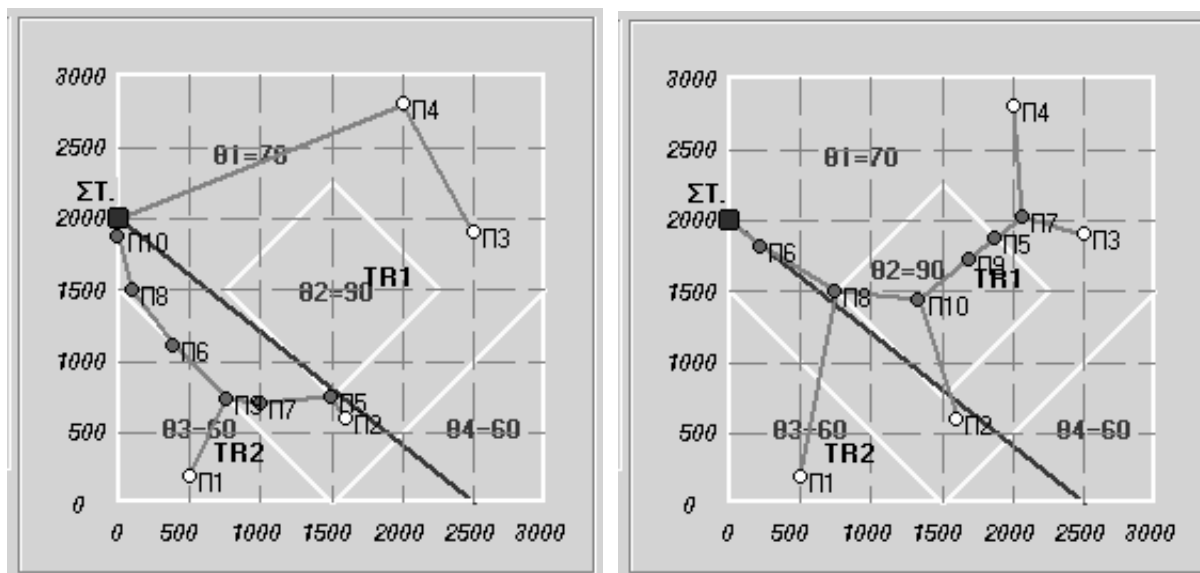


Σχήμα 2 α) $T_1 = 0.001 \text{ m}^2/\text{s}$, $T_2 = 0.01 \text{ m}^2/\text{s}$, $\theta_1 = 70^\circ\text{C}$, $\theta_2 = 80^\circ\text{C}$, $\theta_3 = 60^\circ\text{C}$, $\theta_4 = 60^\circ\text{C}$

β) $T_1 = 0.01 \text{ m}^2/\text{s}$, $T_2 = 0.001 \text{ m}^2/\text{s}$, $\theta_1 = 70^\circ\text{C}$, $\theta_2 = 80^\circ\text{C}$, $\theta_3 = 60^\circ\text{C}$, $\theta_4 = 60^\circ\text{C}$

Σε όλες τις δοκιμές που έγιναν για υδραυλικώς ανομογενείς υδροφορείς, οι περισσότερες νέες γεωτρήσεις κατασκευάστηκαν στη ζώνη με τη μεγαλύτερη μεταφορικότητα, από την οποία

αντλείται και η μεγαλύτερη παροχή. Παρατηρείται επίσης τάση συγκέντρωσής τους στη ζώνη με τη μεγαλύτερη θερμοκρασία, όταν περιλαμβάνεται στη ζώνη με τη μεγάλη μεταφορικότητα (σχήματα 2β και 3β). Αλλά και στη δοκιμή που απεικονίζεται στο σχήμα 3α, ο αλγόριθμος καταφέρνει να τοποθετήσει τη νέα γεώτρηση Π5 στην πολύ μικρή περιοχή, η οποία χαρακτηρίζεται από τη μεγαλύτερη μεταφορικότητα και τη μέγιστη θερμοκρασία.



Σχήμα 3 α) $T_1 = 0.001 \text{ m}^2/\text{s}$, $T_2 = 0.01 \text{ m}^2/\text{s}$, $\theta_1 = 70^\circ\text{C}$, $\theta_2 = 90^\circ\text{C}$, $\theta_3 = 60^\circ\text{C}$, $\theta_4 = 60^\circ\text{C}$

β) $T_1 = 0.01 \text{ m}^2/\text{s}$, $T_2 = 0.001 \text{ m}^2/\text{s}$, $\theta_1 = 70^\circ\text{C}$, $\theta_2 = 90^\circ\text{C}$, $\theta_3 = 60^\circ\text{C}$, $\theta_4 = 60^\circ\text{C}$

Οι διαφορές κόστους που προέκυψαν, είναι ευεξήγητες. Όπως φαίνεται στον πίνακα 1, το κόστος είναι μικρότερο όταν η ζώνη με τη μεγαλύτερη μεταφορικότητα περιλαμβάνει αυτήν με τη μέγιστη θερμοκρασία. Αυτό συμβαίνει στις εφαρμογές 2β και 3β, όπως φαίνεται στα αντίστοιχα σχήματα. Ακόμη το κόστος της εφαρμογής 3β είναι σημαντικά μικρότερο από αυτό της 2β, διότι η θερμοκρασία θ_2 , την οποία αξιοποιούν νέες γεωτρήσεις, είναι μεγαλύτερη.

Τέλος, πέρα από όσα περιλαμβάνονται στον πίνακα 1, πρέπει να τονιστεί ότι σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις και σε όλες τις δοκιμές που έγιναν, η μείωση της τιμής του $K_{\text{ολ}}$ σε σχέση με το καλύτερο χρωμόσωμα της πρώτης γενιάς είναι πάνω από 10%.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή διερευνήθηκε η δυνατότητα περιορισμού του κόστους ενός συλλογικού συστήματος θέρμανσης με γεωθερμική ενέργεια, το οποίο τροφοδοτείται από γεωθερμικό υδροφόρα με 2 ζώνες διαφορετικής μεταφορικότητας και 4 θερμοκρασιακές ζώνες. Οι παράμετροι που συνεξετάστηκαν ήταν το ετήσιο κόστος άντλησης του γεωθερμικού νερού και η απόσβεση του κόστους του δικτύου συλλογής του σε κατάλληλη δεξαμενή. Το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης δεν είναι απλό. Το κόστος άντλησης μειώνεται όταν οι γεωτρήσεις τοποθετούνται στη ζώνη με τη μεγαλύτερη μεταφορικότητα και σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ τους. Αντίθετα το κόστος δικτύου μειώνεται όταν οι γεωτρήσεις συγκεντρώνονται κοντά στη δεξαμενή. Η συνολικώς απαιτούμενη παροχή μειώνεται, όταν η άντληση γίνεται από τη ζώνη με τη μεγαλύτερη θερμοκρασία, αλλά το κόστος άντλησης μειώνεται όταν αυτή γίνεται από τη ζώνη με τη μεγαλύτερη

μεταφορικότητα. Η μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκε, έδειξε ότι μπορεί να οδηγήσει σε λύσεις με μειωμένο κόστος. Η μείωση αυτή μπορεί να είναι καθοριστική για την οικονομική βιωσιμότητα ενός συστήματος εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας χαμηλής ενθαλπίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Lund, J.W., Freeston, D.H., 'World-wide direct uses of geothermal energy', *Geothermics*, 30 (1), pp. 29-68, 2001.
2. Fyticas, M., Andritsos, N., Dalabakis, P., Kolios, N., 'Greek geothermal update 2000-2004', *Proceedings of World Geothermal Congress-2005*, Antalya, Turkey, 2005.
3. Φυτίκας, Μ., Ανδρίτσος, Ν., «Γεωθερμία», Εκδόσεις Τζιόλα, 2004.
4. Καρυδάκης, Γ.Ι., «Γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας Β. Ελλάδας. Τεχνική γεωτρήσεων, μηχανική ταμιευτήρων και διφασική ροή γεωθερμικών ρευστών», Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ., 2003.
5. Goldberg, D.E., 'Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning', Addison-Wesley publishing company, Reading, Massachusetts, 1989.
6. Michalewicz, Z., 'Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs', (3rd ed.), Springer-Verlag, 1996.
7. Reeves, C.R., Rowe, J.E., 'Genetic algorithms-Principles and perspectives', Kluwer Academic Publishers, 2003.
8. Katsifarakis, K.L., Karpouzou, D.K., Theodossiou, N., 'Combined use of BEM and genetic algorithms in groundwater flow and mass transport problems', *Eng Anal Bound Elem*, 23(7), pp. 555-565, 1999.
9. Katsifarakis, K.L., Tselepidou, K., Konstantakos, N., Stamati, D., Mpletsa, E., I. Tzanakis, I., 'Optimization of low enthalpy geothermal heating schemes by means of genetic algorithms', *International Journal of Sustainable Development and Planning*, Vol. 1(4), pp. 429-442, 2006.
10. Τσελεπίδου, Κ., «Βελτιστοποίηση διαχείρισης γεωθερμικών και υπόγειων υδατικών πόρων», Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., 2008.
11. Bear, J., 'Hydraulics of Groundwater', McGraw-Hill, 1979.
12. Katsifarakis, K., Latinopoulos, P., 'Two simple numerical codes for use in particle tracking models of zoned aquifers', *Hydrosoft*, Vol. 3(4), pp. 161- 163, 1990.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΓΕΩΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Μιχόπουλος Α., Κυριάκης Ν.

Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Α.Π.Θ.
Τηλ./Fax 2310 996087, Τ.Θ. 487, Τ.Κ. 541 24 Θεσσαλονίκη.
apmich@auth.gr, nkyr@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εγκατάσταση αντλιών θερμότητας που συνδυάζονται με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη για τη θέρμανση και τη ψύξη ιδιωτικών και δημόσιων κτιρίων παρουσιάζει αυξητική τάση τα τελευταία χρόνια και αποτελεί το πλέον διαδεδομένο σύστημα αβαθούς γεωθερμίας. Ο σχεδιασμός των συστημάτων αυτών γίνεται σύμφωνα με σχετική μεθοδολογία που έχει προταθεί από την ASHRAE, η οποία λαμβάνει υπόψη τα μέγιστα θερμικά και ψυκτικά φορτία του υπό μελέτη κτιρίου, τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους στην περιοχή εγκατάστασης καθώς και έναν ελάχιστο αποδεκτό βαθμό απόδοσης των αντλιών θερμότητας. Ο τρόπος αυτός διαστασιολόγησης οδηγεί συχνά στην κατασκευή γεωεναλλακτών μήκους μεγαλύτερου από το απαραίτητο, με προφανή αύξηση του κόστους κατασκευής.

Για τον ακριβέστερο προσδιορισμό του απαραίτητου μήκους γεωεναλλάκτη έχει αναπτυχθεί από το Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών (ΕΚΣΔ) αναλυτικό προσομοιωτικό εργαλείο, με δυνατότητα προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος για κύκλο μακράς διάρκειας π.χ. 20 έτη. Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιεί ως δεδομένα εισόδου το φορτίο του κτιρίου σε μικρό χρονικό βήμα, τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά της γεώτρησης και του εδάφους καθώς και τα χαρακτηριστικά των αντλιών θερμότητας και υπολογίζει τόσο τις διαμορφούμενες ροές ενέργειας από και προς το έδαφος όσο και την ηλεκτρική κατανάλωση των αντλιών θερμότητας, δηλαδή την κατανάλωση ενέργειας του συστήματος.

Στην εργασία περιγράφεται ο αλγόριθμος του εργαλείου προσομοίωσης, και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτού του υπολογισμού για ένα χαρακτηριστικό κτίριο. Αποδεικνύεται ότι το απαιτούμενο συνολικό μήκος γεωεναλλάκτη είναι μικρότερο από αυτό που επιλέχθηκε με βάση τη συμβατική υπολογιστική προσέγγιση και επομένως το κόστος εγκατάστασης θα μπορούσε να ήταν ανάλογα μικρότερο.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εγκατάσταση συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας (ground source/coupled heat pumps), παρότι ξεκινά στις αρχές του 1970, εντούτοις παρουσιάζει αρκετά μεγάλη δυναμική τα τελευταία χρόνια. Είναι χαρακτηριστικά τα αποτελέσματα του Παγκοσμίου Συνέδριου Γεωθερμίας το 2005 (WGC 2005) σύμφωνα με τα οποία, μεταξύ 2000 και 2005, υπήρξε συνολική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος κατά 198% (24% ετησίως) και αντίστοιχη αύξηση 272% στον αριθμό εγκαταστάσεων (30% ετησίως). Αναφέρεται ότι ο συνολικός αριθμός εγκατεστημένων μονάδων παγκοσμίως ξεπερνά τις 1,700,000, αν και αναγνωρίζεται ότι τα στοιχεία αυτά είναι ελλιπή [1].

Στη χώρα μας, αν και οι συνθήκες για την εγκατάσταση συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας είναι κατάλληλες, οι γνωστές εφαρμογές μέχρι πρότινος ήταν ελάχιστες, με πιο χαρακτηριστικές το κτίριο των Μεταλλειολόγων Μηχανικών στο ΕΜΠ και το Νέο Δημαρχείο Πυλαίας στην Θεσσαλονίκη [2]. Ενθαρρυντικό είναι πάντως το γεγονός ότι, με βάση πρόσφατη καταγραφή, ο συνολικός αριθμός συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας στη χώρα εκτιμάται σε περισσότερες από 200 ε-

γκαταστάσεις, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος άνω των 9MW, αναφέροντας ταυτόχρονα πως ο ακριβής αριθμός τους πρέπει να θεωρηθεί τουλάχιστον διπλάσιος [3, 4].

Τα συστήματα αβαθούς γεωθερμίας διακρίνονται σε ανοικτού και κλειστού βρόγχου. Τα συστήματα κλειστού βρόγχου διακρίνονται, ανάλογα με την τοποθέτηση του γεωεναλλάκτη, σε οριζόντια και κατακόρυφα, με τα δεύτερα να παρουσιάζουν ποσοστιαία τις περισσότερες εφαρμογές [5]. Για το σχεδιασμό και διαστασιολόγηση των συστημάτων αυτών έχουν αναπτυχθεί αρκετά προγράμματα [6, 7, 8, 9], τα οποία όμως ως επί το πλείστον βασίζονται σε αντίστοιχη μεθοδολογία της ASHRAE [10], με αντικείμενο υπολογισμού το μήκος του γεωεναλλάκτη που απαιτείται για την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών απαιτήσεων του υπό μελέτη κτιρίου.

Ο υπολογισμός όμως του απαραίτητου μήκους ενός κατακόρυφου γεωεναλλάκτη λαμβάνει υπόψη μόνο τα φορτία αιχμής και αγνοεί τόσο τη χρονική τους διάρκεια όσο και την αλληλουχία φορτίου που εμφανίζεται πριν και μετά από αυτά, [11]. Συνήθως όμως, τα φορτία αιχμής εμφανίζονται για μερικές μόνο ώρες μέσα στον ετήσιο κύκλο λειτουργίας ενός συστήματος. Επιπροσθέτως τα περισσότερα κτίρια δεν λειτουργούν σε 24ωρο ή/και 7ήμερο κύκλο. Υπάρχει επομένως ικανός χρόνος μη λειτουργίας, κατά τον οποίο είναι δυνατή η μερική ή και η ολική εξισορρόπηση του θερμοκρασιακού πεδίου που έχει διαμορφωθεί κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος, ακόμα και κάτω από συνθήκες αιχμής. Η επιλογή επομένως των φορτίων αιχμής ως βάση για τη διαστασιολόγηση των συστημάτων οδηγεί συχνά στην υπερεκτίμηση του μεγέθους αυτών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή γεωεναλλακτών μεγαλύτερου μήκους από το απαραίτητο, με προφανή επίπτωση τουλάχιστον στο κόστος κατασκευής.

Η μείωση του μήκους με ταυτόχρονη διατήρηση όλων των υπολοίπων παραμέτρων σχεδιασμού, οδηγεί σε διαφορετικά θερμοκρασιακά πεδία εδάφους τα οποία, με τη σειρά τους, μεταβάλλουν τη θερμοκρασία του ρευστού που κυκλοφορεί στο γεωεναλλάκτη. Αποτέλεσμα αυτών των μεταβολών είναι τελικά η διαφοροποίηση του βαθμού απόδοσης των αντλιών θερμότητας και κατ' επέκταση η αλλαγή των χαρακτηριστικών λειτουργίας του συστήματος με προφανή τη μεταβολή της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας των αντλιών θερμότητας, που αντιπροσωπεύει και το μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος ενός κατακόρυφου αβαθούς γεωθερμικού συστήματος.

Για τον καλύτερο σχεδιασμό και την αποδοτικότερη λειτουργία των συστημάτων αυτών, είναι απαραίτητο στη φάση σχεδιασμού να πραγματοποιείται μια ενεργειακή προσομοίωση του συστήματος και να εξετάζεται η επίδραση διαφορετικών μηκών γεωεναλλάκτη στη λειτουργία του για μακράς διάρκειας κύκλο λειτουργίας, π.χ. 20ετή. Η προσομοίωση αυτή, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες ενότητες, είναι απαραίτητο να γίνεται με μικρό χρονικό βήμα, π.χ. ώρας ή τετραώρου, ώστε τα αποτελέσματά της να είναι πλησιέστερα σ' αυτά της πραγματικής λειτουργίας. Αποτέλεσμα της ενεργειακής αυτής ανάλυσης, εκτός από τις ροές ενέργειας που διαμορφώνονται για κάθε εναλλακτικό σενάριο, είναι τελικά η συσχέτιση του μήκους του γεωεναλλάκτη με το κόστος κατασκευής και λειτουργίας του συστήματος. Συνγχερώνως, με τα εναλλακτικά αυτά σενάρια είναι δυνατή η διερεύνηση και του ελάχιστου ικανού μήκους του γεωεναλλάκτη το οποίο μπορεί πραγματικά να καλύψει χωρίς αστοχία τις ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου. Η συνολική αυτή προσομοίωση μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί με τη χρήση του αλγορίθμου ενεργειακής ανάλυσης που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης. Αντικείμενο της εργασίας είναι η παρουσίαση του αλγορίθμου αυτού και των αποτελεσμάτων εφαρμογής του για μια τυπική εγκατάσταση.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Βάση του εργαλείου προσομοίωσης αποτελεί υπολογιστικός αλγόριθμος, ο οποίος επιτρέπει τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας εξόδου του ρευστού από το γεωεναλλάκτη ως συνάρτη-

ση της θερμότητας που εναλλάσσεται με το έδαφος. Ο αλγόριθμος βασίζεται στην υπόθεση πως ο γεωεναλλάκτης αποτελεί μια συνεχή γραμμική πηγή (ή καταβόθρα) η οποία εκπέμπει (ή απορροφά) θερμότητα Q , σταθερή στο χρόνο. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση της γραμμικής πηγής έκλυσης/απορρόφησης θερμότητας, [3, 4]:

$$T(r, t) = T_{\infty} + \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot k \cdot L} \cdot Ei(x) \quad (1)$$

όπου r είναι η απόσταση από την πηγή/καταβόθρα, t ο χρόνος, T_{∞} η αρχική (αδιατάρακτη) θερμοκρασία του εδάφους, k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους, L το μήκος του γεωεναλλάκτη και $Ei(x)$ το εκθετικό ολοκλήρωμα [14], η παράμετρος x του οποίου εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από το χρόνιο t και την απόσταση από τη πηγή/καταβόθρα, r .

Αλλά κατά τη λειτουργία του αβαθούς γεωθερμικού συστήματος η ροή θερμότητας Q από/προς το έδαφος δεν παραμένει σταθερή στη διάρκεια του χρόνου αλλά μεταβάλλεται συνεχώς αφού εξαρτάται τόσο από τις θερμικές/ψυκτικές ανάγκες του κτιρίου όσο και από το βαθμό απόδοσης (COP) των αντλιών θερμότητας.

Με την υπόθεση πως οι θερμοφυσικές ιδιότητες του εδάφους δεν μεταβάλλονται σημαντικά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας, μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνική της αλληλουχίας [15, 16], αφού οι εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο είναι γραμμικές [15]. Με βάση λοιπόν την εξίσωση (1), η θερμοκρασία του εδάφους σε απόσταση r από το κέντρο της γεώτρησης τη χρονική στιγμή t , και στο τέλος της n -ιοστής περιόδου λειτουργίας μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$T(r, t) = T_{\infty} + \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i - Q_{i-1})}{4 \cdot \pi \cdot k \cdot L} \cdot Ei\left(\frac{r^2}{4 \cdot \alpha \cdot (t_n - t_{i-1})}\right) \quad (2)$$

Για $r = r_b$, όπου r_b η ακτίνα της γεώτρησης, η εξίσωση (2) επιτρέπει τον υπολογισμό της θερμοκρασίας, $T_{borehole}(t)$, του πεδίου των γεωτρήσεων στη διεπιφάνεια μεταξύ γεώτρησης και εδάφους τη χρονική στιγμή t . Με βάση τη θερμοκρασία αυτή και λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική θερμική αντίσταση (R_{tot}) της γεώτρησης, είναι δυνατός ο υπολογισμός της θερμοκρασίας του ρευστού $T_w(t)$ στην έξοδο του γεωεναλλάκτη για κάθε χρονική στιγμή t . Προφανώς στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής θερμικής αντίστασης k της εξίσωσης (2) αντιστοιχεί στη θερμική αντίσταση του ρευστοκονιάματος πλήρωσης της γεώτρησης (grout).

Η συνολική θερμική αντίσταση αποτελείται από την αντίσταση συναγωγής μεταξύ του ρευστού και του σωλήνα του γεωεναλλάκτη (R_{con}), και τις θερμικές αντιστάσεις αγωγιμότητας του σωλήνα (R_p), και του ρευστοκονιάματος πλήρωσης της γεώτρησης (R_g).

$$R_{tot} = R_{con} + R_p + R_g \quad (3)$$

Οπότε η θερμοκρασία του νερού στην έξοδο του γεωεναλλάκτη τη χρονική στιγμή t μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$T_w(t) = T_{borehole}(t) - Q(t) \cdot R_{tot} \quad (4)$$

Ο αλγόριθμος που παρουσιάστηκε παραπάνω καθώς και ο σχετικός κώδικας επαληθεύτηκαν ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων τους, με τη χρήση δεδομένων μετρήσεων που καλύπτουν χρονική περίοδο μεγαλύτερη των τριών ετών και προέρχονται από την καταγραφή χαρακτηριστικών μεγεθών σε υφιστάμενο σύστημα αβαθούς γεωθερμίας με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη που βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης στη Βόρειο Ελλάδα. Από τα αποτελέσματα των υπολογισμών προκύπτει πως ο αλγόριθμος είναι σε θέση να υπολογίζει με υψηλή ακρίβεια τα ζητούμενα μεγέθη [11].

Ο βασικός αυτός αλγόριθμος που παρουσιάστηκε παραπάνω αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη ενός ευρύτερου εργαλείου προσομοίωσης με το οποίο είναι δυνατή η προσομοίωση της συνολικής λειτουργίας ενός αβαθούς γεωθερμικού συστήματος με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη.

Η προσομοίωση του αβαθούς γεωθερμικού συστήματος γίνεται με τη θεώρηση πως αυτό αποτελείται από τρία κυρίως υποσυστήματα, το κτίριο, την αντλία θερμότητας και το γεωεναλλάκτη. Κατά τη λειτουργία του συστήματος σε θέρμανση, η αντλία θερμότητας απορροφά θερμότητα από το έδαφος Q_G (Ground), την οποία και αποδίδει στο κτίριο Q_B (Building) για να καλύψει τις θερμικές του ανάγκες, καταναλώνοντας και η ίδια κάποιο έργο Q_{HP} (Heat Pump). Αντίστοιχα κατά τη λειτουργία του συστήματος σε ψύξη, η αντλία θερμότητας απορροφά θερμότητα από το κτίριο την οποία και αποδίδει στο έδαφος προσαυξημένη κατά το έργο που καταναλώνεται για τη λειτουργία της. Τα ισοζύγια ενέργειας για τις περιπτώσεις θέρμανσης (h) και ψύξης (c) δίνονται αντίστοιχα από τις ακόλουθες σχέσεις:

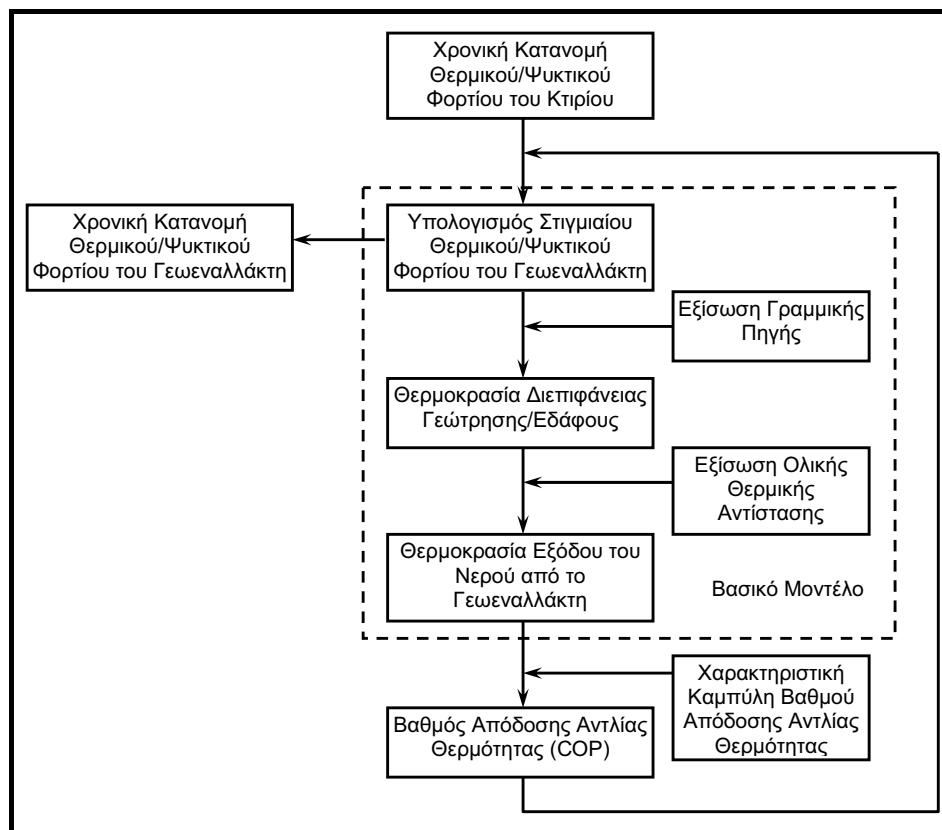
$$Q_{B_h} = Q_{G_h} + Q_{HP_h} \quad (5)$$

$$Q_{G_c} = Q_{B_c} + Q_{HP_c} \quad (6)$$

Η λειτουργία της αντλίας θερμότητας, όπως άλλωστε και κάθε θερμικής μηχανής, χαρακτηρίζεται από το βαθμό απόδοσης (Coefficient Of Performance – COP) που ορίζεται ως ο λόγος της παραγόμενης ισχύος προς την καταναλισκόμενη, δηλαδή:

$$COP = \frac{Q_B}{Q_{HP}} \quad (7)$$

Ο βαθμός απόδοσης όμως της αντλίας θερμότητας προσδιορίζεται και πειραματικά από τον κατασκευαστή της ως συνάρτηση της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού στο πρωτεύον κύκλωμά της. Για την περίπτωση εν προκειμένω ενός αβαθούς γεωθερμικού συστήματος, ο βαθμός απόδοσης της αντλίας θερμότητας μπορεί να προσδιοριστεί με τον τρόπο αυτό για κάθε χρονική στιγμή εφόσον είναι γνωστή η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από το γεωεναλλάκτη.



Διάγραμμα 1: Σχηματική περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού της χρονικής κατανομής του φορτίου του γεωεναλλάκτη ως συνάρτηση του φορτίου του κτιρίου

Εάν λοιπόν υποτεθεί πως η χρονική κατανομή του φορτίου στο κτίριο είναι γνωστή, όπως και ο βαθμός απόδοσης της αντλίας θερμότητας, τότε μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί, από τις σχέσεις (5) και (6) το φορτίο του γεωεναλλάκτη, τόσο για τη θέρμανση όσο και για τη ψύξη αντίστοιχα:

$$Q_{G_h} = \frac{Q_B \cdot (COP - 1)}{COP} \quad (8)$$

$$Q_{G_c} = \frac{Q_B \cdot (COP + 1)}{COP} \quad (9)$$

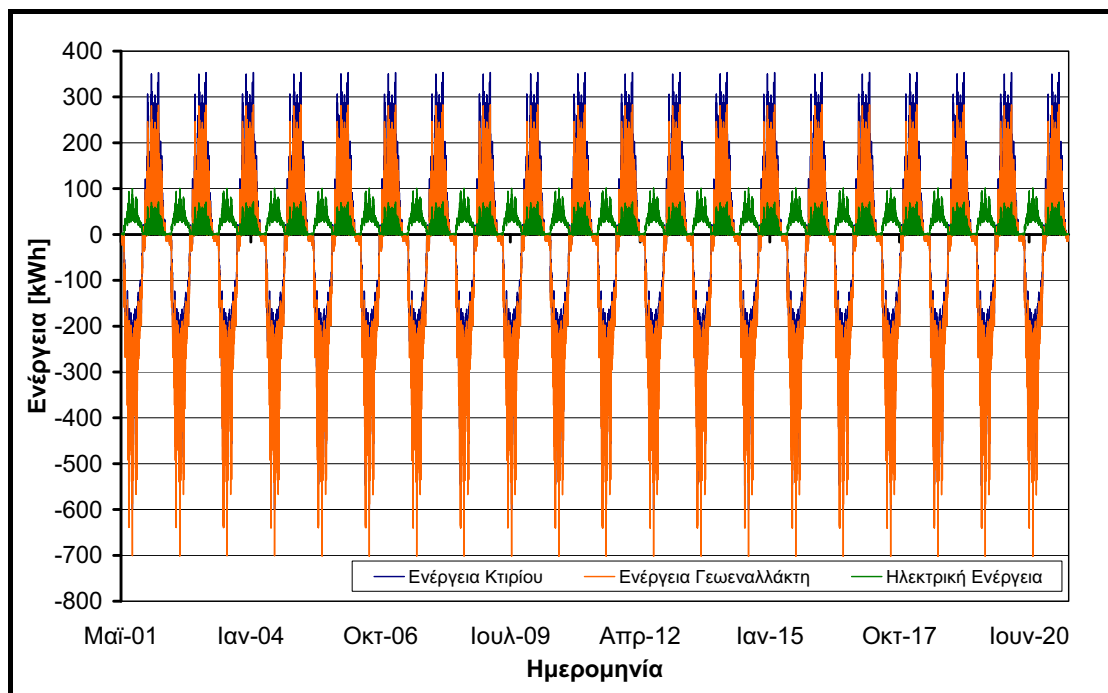
Με βάση τα παραπάνω είναι δυνατή η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου που να βασίζεται στις προηγούμενες εξισώσεις. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί ως δεδομένο εισόδου τις ανάγκες φορτίου του κτιρίου στο χρόνο και με τη χρήση του μοντέλου υπολογισμού της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το γεωεναλλάκτη υπολογίζει τη χρονική κατανομή του φορτίου το οποίο αντλείται/απορρίπτεται στο έδαφος. Στο Διάγραμμα 1 παρουσιάζονται σχηματικά τα βήματα υπολογισμού του αλγορίθμου αυτού.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή του αλγορίθμου ενεργειακής ανάλυσης για τη διερεύνηση της επίδρασης του μήκους γεωεναλλάκτη στη λειτουργία αβαθούς γεωθερμικού συστήματος έγινε για τα δεδομένα του Νέου Δημαρχείου της Πυλαίας [17, 18, 19], με χρονικό βήμα προσομοίωσης 4 και 8 ωρών και συνολική διάρκεια 20 ετών. Επειδή το εγκατεστημένο μήκος του γεωεναλλάκτη στην περίπτωση του Νέου Δημαρχείου της Πυλαίας είναι 1680 m (21 γεωτρήσεις x 80 m έκαστη), επιλέχθηκε η προσομοίωση να γίνει για μήκη γεωεναλλάκτη από 240 m (3 γεωτρήσεις x 80 m έκαστη) μέχρι 2400 m (30 γεωτρήσεις x 80 m έκαστη) με βήμα 240 m. Εξετάστηκαν επίσης δυο διαφορετικά σενάρια που αφορούν την εκκίνηση του συστήματος από διαφορετικές περιόδους - θέρμανσης ή ψύξης αντίστοιχα - για να διερευνηθεί πιθανή διαφοροποίηση της λειτουργίας.

Πίνακας 1: Η Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των αντλιών θερμότητας για έξι εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας και δύο χρονικά βήματα προσομοίωσης.				
Χρονικό Βήμα	4-ώρο		8-ώρο	
Περίοδος Έναρξης Λειτουργίας	Θερμαντική	Ψυκτική	Θερμαντική	Ψυκτική
Συνολικό Μήκος Γεωεναλλάκτη [m]	Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας [MWh]			
1200	421,98	421,94	413,83	413,79
1680	390,13	390,09	385,46	385,42
2400	371,03	371,00	368,12	368,09

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται ενδεικτικά κατανάλωσης ενέργειας για τρεις εναλλακτικούς συνδυασμούς μήκους γεωεναλλάκτη για το 4ώρο και το 8ώρο χρονικό βήμα της προσομοίωσης για εκκίνηση του συστήματος από θερμαντική και ψυκτική περίοδο αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποδεικνύουν, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο, ότι δεν υπάρχει εξάρτηση της κατανάλωσης ενέργειας από την περίοδο εκκίνησης του συστήματος. Για το λόγο αυτό στην συνέχεια παρατίθενται μόνο τα διαγράμματα που αφορούν την εκκίνηση του συστήματος με λειτουργία σε ψύξη. Ενδεικτικά οι ροές ενέργειας για χρονικό βήμα προσομοίωσης 8 h παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 2.



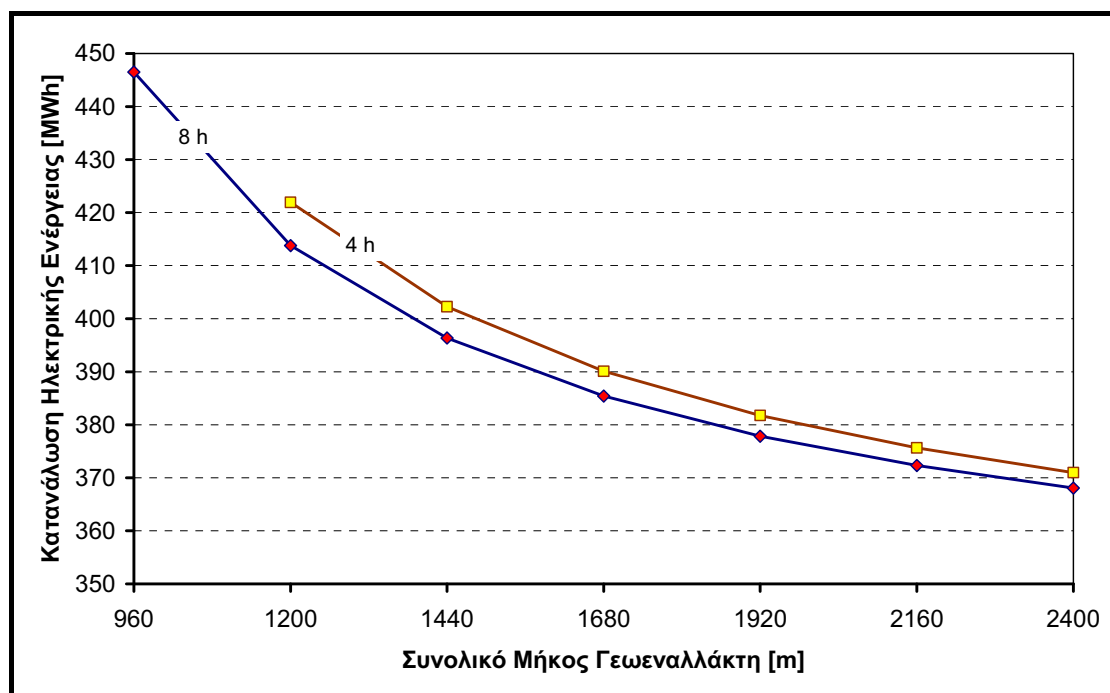
Διάγραμμα 2: Κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας συστήματος αβαθούς γεωθερμίας με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη για χρονικό βήμα προσομοίωσης 8 h και χρονική διάρκεια 20 ετών

Η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση των αντλιών θερμότητας στη διάρκεια των 20 ετών για τα αντίστοιχα χρονικά βήματα προσομοίωσης και τα εναλλακτικά μήκη γεωεναλλάκτη που εξετάστηκαν παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 3. Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό για τη δεδομένη τυπική χρονική κατανομή φορτίου κτιρίου το ελάχιστο μήκος γεωεναλλάκτη για την προσομοίωση με 8ωρο χρονικό βήμα προέκυψε 960 m ενώ αντίστοιχα για το 4ωρο 1200 m. Πρέπει να τονιστεί πως λόγω της αύξησης του χρονικού βήματος υπάρχει μια εξομάλυνση των φορτίων αιχμής με αποτέλεσμα οι φορτίσεις του εδάφους να προκύπτουν περισσότερο ομαλές και το διαμορφούμενο θερμοκρασιακό πεδίο λιγότερο έντονο. Έτσι στην περίπτωση του 4ωρου χρονικού βήματος και για μήκος γεωεναλλάκτη 960 m, η θερμοκρασία του ρευστού λόγω των εντονότερων παλμών θερμικού φορτίου ξεπέρασε το όριο των 50°C που τέθηκε ως άνω όριο λειτουργίας της αντλίας θερμότητας σύμφωνα με τις υποδείξεις του κατασκευαστή της. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η κατασκευή γεωεναλλάκτη του αντιστοίχου μήκους να κριθεί αδύνατη. Αντίστοιχος περιορισμός τέθηκε και για την περίπτωση που η θερμοκρασία του ρευστού κατά τη διάρκεια της θέρμανσης μειωθεί κάτω από τους 5°C.

Εκτός όμως από τη διαφοροποίηση του ελάχιστου μήκους του γεωεναλλάκτη, η χρονική εξομάλυνση του φορτίου οδηγεί και σε μια μείωση της εκτιμωμένης ηλεκτρικής κατανάλωσης των αντλιών θερμότητας της τάξης του 2%, που προφανώς δεν μπορεί να θεωρηθεί σημαντική. Επίσης φαίνεται ότι η αύξηση του μήκους του γεωεναλλάκτη οδηγεί στη μείωση της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας των αντλιών θερμότητας. Μεγαλύτερα μήκη γεωεναλλάκτη οδηγούν σε μικρότερες φορτίσεις του εδάφους ανά μέτρο μήκους του, με αποτέλεσμα να διαμορφώνονται ομαλότερα θερμοκρασιακά πεδία που οδηγούν έμμεσα σε υψηλότερους βαθμούς απόδοσης των αντλιών θερμότητας και σε προφανή μείωση του κόστους λειτουργίας της εγκατάστασης.

Από το Διάγραμμα 3 όμως προκύπτει ότι η κλίση της καμπύλης της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται με την αύξηση του ολικού μήκους του γεωεναλλάκτη. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι το κόστος εγκατάστασης είναι πρακτικά γραμμική συνάρτηση του ολικού μήκους του γεωεναλλάκτη και τα δεδομένα του Διαγράμματος 3 προκύπτει ότι για την

τελική επιλογή του μήκους θα πρέπει να ληφθούν υπόψη, πέραν των ενεργειακών, και οικονομικά κριτήρια, που θα συνδυάζουν το κόστος λειτουργίας και το κόστος εγκατάστασης.



Διάγραμμα 3: Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των αντλιών θερμότητας συστήματος αβαθούς γεωθερμίας με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη ως συνάρτηση του μήκους του γεωεναλλάκτη. Χρονικό βήμα προσομοίωσης 4 h και 8 h. Χρονική διάρκεια 20 ετών.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε ένα αναλυτικό εργαλείο, που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Κατασκευής Διεργασιών του Α.Π.Θ., με το οποίο είναι δυνατή η διερεύνηση της εξάρτησης της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των αντλιών θερμότητας από το μήκος κατακόρυφου γεωεναλλάκτη με τον οποίο αυτές συνδυάζονται. Από την εφαρμογή του για τα δεδομένα του Νέου Δημαρχείου της Πυλαίας προέκυψε ότι υπάρχει ισχυρή μη-γραμμική συσχέτιση μεταξύ της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των αντλιών θερμότητας ενός αβαθούς γεωθερμικού συστήματος και του συνολικού μήκους του γεωεναλλάκτη, με την κλίση της σχετικής καμπύλης να μειώνεται με την αύξηση του συνολικού μήκους. Το εύρημα αυτό καθιστά απαραίτητη στη φάση σχεδιασμού την προσομοίωση λειτουργίας του συστήματος σε ευρύ χρονικό ορίζοντα, τάξης 20ετίας, προκειμένου να καθοριστεί το βέλτιστο ολικό μήκος λαμβάνοντας υπόψη τόσο το κόστος λειτουργίας όσο και το κόστος κατασκευής – δεδομένου ότι το τελευταίο είναι ευθέως ανάλογο του συνολικού μήκους του γεωεναλλάκτη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Lund, W. J., (2006). Present utilization and future prospects of geothermal energy worldwide, Proceedings of the Renewable Energy 2006 Conference, Makuhari Messe, Chiba, Japan, pp.47-52.
- [2] Φυτίκας, Μ., Ανδρίτσος, Ν., «Γεωθερμία», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2004.
- [3] Andritsos, N., Dalampakis, P., Karydakis, G., Kolios, N. and Fytikas, M., (2007). Update and characteristics of low-enthalpy geothermal applications in Greece. Proceedings, European Geothermal Congress EGC 2007, May 30 - June 1, 2007, Unterhaching, Germany.
- [4] Ανδρίτσος, Ν., (2008). Προσωπική Επικοινωνία.

- [5] Lund, J., Sanner, B., Rybach, L., Curtis, R., Hellström, G., (2004). Geothermal (ground-source) heat pumps. A world overview, Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology, Klamath Falls, OR, <http://www.geoheat.oit.edu>.
- [6] Hellström, G., Sanner, B., (2008). EED Earth Energy Designer User Manual Version 2.0, (<http://www.buildingphysics.com/earth1.htm>).
- [7] Energy Information Service, (2008). Instructions for Gchpcalc 4, (http://www.geokiss.com/software/Ver40_Instructions.PDF).
- [8] Gaia Geothermal (2008). Ground Loop Design Version 2.6 User's Guide, (<http://www.geoclip.com/downloads/manual.pdf>).
- [9] Oklahoma State University, (2008). CLGS Ground Heat Exchanger Design Program GLHEPRO 4.2, (<http://www.igshpa.okstate.edu/publication/software.htm>).
- [10] Kavanaugh P. S., Rafferty K., (1997). Ground-Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings. American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA. ISBN 1-883413-52-4.
- [11] Michopoulos A., (2008). Theoretical and Experimental Approach of Ground Heat Exchanger. PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Greece.
- [12] Carslaw S. H., Jaeger C. J., (1959). Conduction of heat in solids, Second Ed., Oxford University Press Great Britain.
- [13] Ingersoll L. R., Zobel O. J., and Ingersoll A. C., (1954). Heat Conduction with Engineering, Geological, and Other Applications. University of Wisconsin Press, Madison.
- [14] Abramowitz M., Stegun A. I., (1972). Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, Dower Publications Inc., New York, U.S.A., ISBN 486-61272-4.
- [15] Hellström G., (1991). Ground Heat Storage Thermal Analyses of Duct Storage Systems, I. Theory. PhD Thesis, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
- [16] Yavuzturk C., (1999). Modeling of Vertical Ground Loop Heat Exchangers for Ground Source Heat Pump Systems. PhD Thesis, Oklahoma State University, Stillwater, USA, (http://www.hvac.okstate.edu/research/Documents/Yavuzturk_thesis.pdf)
- [17] Michopoulos A., Bozis D., Kikidis P., Papakostas K., Kyriakis N. A., (2007). Three-years operation experience of a ground source heat pump system in Northern Greece. Energy and Buildings 39(3): 328-334.
- [18] Michopoulos A., Bozis D., Kikidis P., Papakostas K., Kyriakis N. A., (2005). Ground Source Heat Pump System in a Public Building of Northern Greece. Operation Experience and Results, 36th International Congress on Heating, Refrigeration and Air-Conditioning (HVAC & R), Belgrade.
- [19] Μιχόπουλος Α., Μπόζης Δ., Κυριάκης Ν., (2006). Συμπεράσματα από τη Λειτουργία του Συστήματος Αβαθούς Γεωθερμίας του Νέου Δημαρχείου Πυλαίας Κατά τα Έτη 2003 – 2005, 8ο Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, σελ. 511-518, Θεσσαλονίκη, ISSN 1108-3603.

ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΙΘΑΝΟΛΗΣ ΑΠΟ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ

Περικλής Ζόλκου¹, Θεοχάρης Τσούτσος², Βασίλης Γκέκας²

1: Μηχανικός Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, Μετ. Φοιτητής
Τηλ. +306937029243, Σμύρνης 1, 15772 Ζωγράφου
pzolkou@yahoo.com

2: Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
Τηλ. +302821037825, Fax: +302821037858
Πολυτεχνειούπολη, 73100 Κουνουπιδιανά Χανιά
theocharis.tsoutsos@enveng.tuc.gr, vgekas@enveng.tuc.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η βιοαιθανόλη αποτελεί σήμερα βιοκαύσιμο με ευρεία εφαρμογή σε κάποιες περιοχές του πλανήτη. Στη χώρα μας απέκτησε ενδιαφέρον πρόσφατα με την εφαρμογή της Κοινοτικής Οδηγίας 2003/30 για καύσιμα μεταφορών. Προκειμένου να καλυφθούν οι στόχοι της Οδηγίας αυτής εξετάζεται η εισαγωγή της βιοαιθανόλης στο ελληνικό σύστημα αξιοποιώντας εναλλακτικές ενεργειακές καλλιέργειες όπως το σόργο.

Το άρθρο αυτό περιλαμβάνει τη διαδικασία παραγωγής βιοαιθανόλης από σόργο ελληνικής παραγωγής. Παρουσιάζονται επίσης τα πρώτα πειραματικά αποτελέσματα από τη διαδικασία της αλκοολικής ζύμωσης που υλοποιήθηκε με σκοπό το βέλτιστο τρόπο παραγωγής καύσιμης αιθανόλης. Εν κατακλείδι, παρατίθενται τα αρχικά συμπεράσματα με σκοπό τη βέλτιστη παραγωγή βιοκαυσίμων με τρόπο βιώσιμο οικονομικά, περιβαλλοντικά και ενεργειακά.

Εν συνεχεία αναπτύσσονται κάποιοι προβληματισμοί που εξήχθησαν από την έρευνα. Η αξιοποίηση σόργου από αγροτικές περιοχές εμπεριέχει τον κίνδυνο να εγκαταλειφθούν για την παραγωγή τροφίμων, ύστερα από ελλιπή ενημέρωση και σχεδιασμό της παραγωγής. Ένας ακόμα κίνδυνος που πρέπει να προσεχθεί είναι ο κίνδυνος για μονοκαλλιέργειες καταστρεπτικές για το περιβάλλον, καθώς θα υπάρξει μονομερής απορρόφηση των θρεπτικών του εδάφους.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχώς αυξανόμενη σήμερα ενεργειακή ζήτηση, η μείωση των αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων σε συνδυασμό με τις σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση τους, παράλληλα με την οικονομική κρίση, έχουν κάνει ξεκάθαρο ότι εναλλακτικές ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, όπως τα βιοκαύσιμα, πρέπει να χρησιμοποιηθούν σε ευρεία κλίμακα. Για την παραγωγή βιοκαυσίμων απαιτείται η καλλιέργεια ενεργειακών καλλιεργειών, φυτών δηλαδή πλούσια σε σακχαρούχα συστατικά για την παραγωγή βιοαιθανόλης και έλαια για την παραγωγή βιοντίζελ [1].

Η βιοαιθανόλη αποτελεί βιοκαύσιμο με διαρκώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για ευρεία εφαρμογή. Στη χώρα μας, όπως και στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες, εισήχθη στην αγορά με την εφαρμογή της Κοινοτικής Οδηγίας 2003/30, ενώ πρόσφατα το ενδιαφέρον αυτό ανανεώθηκε με τη νέα πρόταση για Κοινοτική Οδηγία στις 23 Ιανουαρίου 2008 για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Όσον αφορά τα βιοκαύσιμα, η εκτίμηση της Επιτροπής κατέληγε στο συμπέρασμα ότι δεν φαίνεται πιθανό να επιτευχθεί στην ΕΕ ο στόχος της οδηγίας για τα βιοκαύσιμα έως το 2010. Η Ελλάδα είχε μερίδιο βιοκαυσίμων 0,01 % το 2005, ενώ ο ενδεικτικός της στόχος ήταν 0,7 %. Ήδη, πολλές χώρες πανευρωπαϊκά, αλλά και παγκοσμίως έχουν κάνει

πολλά βήματα μπροστά στον σχεδιασμό, αλλά και στην παραγωγή βιοκαυσίμων. Χαρακτηριστικά να αναφέρεται ότι το 2007 η κατανάλωση των χωρών της Ευρώπης ήταν 7.694.067 t, ενώ το 2003 όταν εφαρμόστηκε η πρώτη κοινοτική οδηγία ήταν 446.610 t (17πλασιάστηκε η παραγωγή - κατανάλωση). Στη χώρα μας, η παραγωγή και η κατανάλωση βασίζεται ακόμα σε πολύ μικρό στάδιο (1,3%), σε σχέση με τις άλλες χώρες της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, αλλά υπάρχουν σημαντικές δυνατότητες για περαιτέρω ανάπτυξη. Ήδη η χρήση της βιοαιθανόλης, ως εναλλακτικό καύσιμο έναντι της βενζίνης ή συμπλήρωμα αυτής, βρίσκει εφαρμογή σε πολλές χώρες παγκοσμίως [2].

Κρίσιμος παράγοντας, που καθορίζει τον τρόπο παραγωγής, είναι η επιλογή των πρώτων υλών, σε συνδυασμό με την αποδοτικότητα στην παραγωγή διαλυμάτων μεγάλης συγκέντρωσης βιοαιθανόλης (πίνακας 1). Οι πρώτες ύλες από τις οποίες μπορεί να παραχθεί βιοαιθανόλη, με έναν από τους παραπάνω τρόπους είναι το α) το καλαμπόκι (corn), β) το σιτάρι (wheat), γ) το κριθάρι (barley), δ) το ζαχαροκάλαμο (sugar – cane), ε) η σίκαλη (rye) και στ) το γλυκό σόργο (sweet sorghum) [3, 4].

Πίνακας 1: Παραγόμενη βιοαιθανόλη από φυτικές πρώτες ύλες και οι αποδόσεις τους ανά στρέμμα σε σπόρο και καύσιμο [2]

ΠΡΩΤΗ ΎΛΗ	ΑΠΟΔΟΣΗ (KG / ΣΤΡΕΜΜΑ)	ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΕ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΟ (L/ΣΤΡΕΜΜΑ)
Βαμβάκι	120 - 160	18 - 25
Σόγια	160 - 240	29 - 44
Σιτάρι	150 - 500	45 - 150
Αραβόσιτος	900	270
Τεύτλα	6000	600
Σόργο	7.000 - 10.000	675 - 900

Στα πλαίσια της έρευνας του εργαστηρίου Βιώσιμων και Ανανεώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων χρησιμοποιήθηκε ποικιλία γλυκού σόργου (sweet sorghum) που μπορεί να ευδοκιμήσει στη Θεσσαλία, σόργο που διατέθηκε από το Εργαστήριο Γεωργίας του Τμήματος Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Είναι ποικιλία που εμφανίζει πολύ καλή προσαρμογή στα μεσογειακά οικοσυστήματα της Ν. Ευρώπης. Το γλυκό σόργο είναι ετήσιο αγροστόδες φυτό, με καταγωγή από τις ασιατικές χώρες, που διαθέτει μεγάλη φωτοσυνθετική ικανότητα, και συνεπώς υψηλές αποδόσεις σε βιομάζα. Η μεγάλη περιοχή ευδοκιμίας του φυτού αυτού το καθιστά πολύ πρόσφορο στην καλλιέργειά του, έναντι των άλλων ενεργειακών φυτών [5]. Η σπορά του γίνεται τον μήνα Μάιο και ο θερισμός του πέντε μήνες μετά τον μήνα Οκτώβριο. Αξιοσημείωτο είναι οι πολύ χαμηλές απαιτήσεις για την καλλιέργειά του σε άρδευση (250 mm) και λίπανση (N=0,9 P=0,9 K=1,3 – μονάδες στοιχείου ανά στρέμμα). Η αιτία που κάνει τη συγκεκριμένη φυτική ουσία τόσο «περιζήτητη» στον τομέα των βιοκαυσίμων είναι η εκτιμώμενη μεγάλη αποδοτικότητά της σε βιοαιθανόλη (700 – 900 L/στρέμμα καλλιέργειας), καθώς επίσης και πολύ καλή αναλογία σε σάκχαρα (9,6 – 20,3 % επί του χλωρού βάρους των στελεχών) και κυτταρίνες [3].

EU (27)

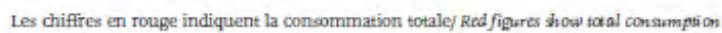
76 940 671

EU citizens by country (2008)

Country	EU Citizens (2008)
EU (27)	76 940 671
IE	83 741
UK	3 486 901
DK	60 025
SE	281 251
FI	n.a.
EE	n.a.
LV	17 401
LT	62 600
DE	4 002 748
PL	1 005 801
CZ	328 840
SK	13 262
HU	91 801
RO	n.a.
BG	112 495
GR	808 840
CY	n.a.
MT	n.a.
SI	797 871
AT	1 889 023
IT	1 393 350
FR	1 434 215
ES	3 732 220
PT	1 588 653
NL	867 011
BE	912 601
LU	34 963

Source: Eurostat 2008

Consommation de biocarburants destinés au transport dans l'Union européenne en 2007 (en tep)¹, avec les parts respectives de chaque filière/Biofuels consumption for transport in European Union in 2007 (in toe)¹ with respective shares of each sector.



n.a. Non disponible/Not available.

* Estimation/Estimation.

*** Huile végétale consommée pure pour l'Allemagne, l'Irlande et les Pays-Bas et biogaz pour la Suède/Vegetable oil consumed as such in Germany, Ireland and The Netherlands, and biogas for Sweden.*

^{***} La consommation de biodiesel existe mais n'était pas disponible à la date de l'enquête/ Biodiesel consumption exists but was not available during the survey

2.1. ΠΡΟΕΡΓΑΣΙΑ ΑΛΚΟΟΛΙΚΗΣ ΖΥΜΩΣΗΣ

$$\begin{array}{ccccccc}
 C_6H_{12}O_6 & + & yeast & \rightarrow & 2CO_2 & + & 2C_2H_5OH \\
 \Gamma\lambda\nu\kappa\acute{o}\zeta\eta & & & & & & αιθανολη \\
 100\text{ kg} & & & & 48.89\text{ kg} & & 51.11\text{ kg}
 \end{array}$$

Εν συνεχεία, προχωρήσαμε στην δεύτερη φάση των διεργασιών. Μεταξύ των άλλων, αρχικά, τεμαχίστηκαν τα στελέχη του φυσικού σόργου, έτσι ώστε να διευκολυνθεί η διαδικασία συμπίεσής του για την εξαγωγή του εκχυλίσματός του. Το βέλτιστο μήκος κομματιών θεωρήθηκε τα 2–4 cm, έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη στράγγισή του. Κατόπιν, ακολούθησε η διαδικασία της αποκομιδής του εκχυλίσματος, μέσω της διαδικασίας της συμπίεσης, από ειδική πρέσα υψηλής φόρτισης.

Τελευταίο στάδιο της προεργασίας, ήταν η διήθηση του εκχυλίσματος, με σκοπό την απομάκρυνση τυχόν σκουπιδιών και άλλων στερεών που θα λειτουργούσαν ως ανασταλτικοί παράγοντες στη διαδικασία [2].

2.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΛΚΟΟΛΙΚΗΣ ΖΥΜΩΣΗΣ

Η διεργασία της αλκοολικής ζύμωσης πραγματοποιήθηκε σε επωαστικό θάλαμο, υπό σταθερές συνθήκες ζύμωσης. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε δύο φορές, διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Και οι δύο κύκλοι της διαδικασίας διήρκησαν 48 h, σε θερμοκρασία 25,5 °C και συνεχή ανάδευση στους 150 rpm. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν συμπεριλάμβαναν 2 διαφοροποιήσεις στη συγκέντρωση σακχάρων και του ζυμομύκητα *Saccharomyces Cerevisiae*. Σκοπός ήταν να μελετηθεί η παραγωγή βιοαιθανόλης σε διαφορετικές συνθήκες ζύμωσης [2].

Πίνακας 2: Συνστατικά διαλυμάτων αλκοολικής ζύμωσης β κύκλου

Περιπτώσεις	Ολικά Σάκχα- ρα (g/L)	Γλυκόζη (g/L)	Εκχύλισμα Σόργου (mL)	Απιονισμένο Νερό H ₂ O	Saccharomyce Cerevisiae
1η	57	10,4	200	0	0,13
2η	114	10,4	400/2	0	0,25
3η	57	20,8	200	0	0,13
4η	114	20,8	400/2	0	0,25
5η	57	10,4	200	0	0,13
6η	0	0	0	200	0,13

Πίνακας 3: Συνστατικά διαλυμάτων αλκοολικής ζύμωσης γ κύκλου

ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΟΛΙΚΩΝ ΣΑΚΧΑΡΩΝ (G/L)	ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΖΥΜΗΣ (G)
1η	13,4	0,063
2η	13,4	0,125
3η	26,8	0,064
4η	26,8	0,126
5η	13,4	0,064
6η	Τυφλό	0,066

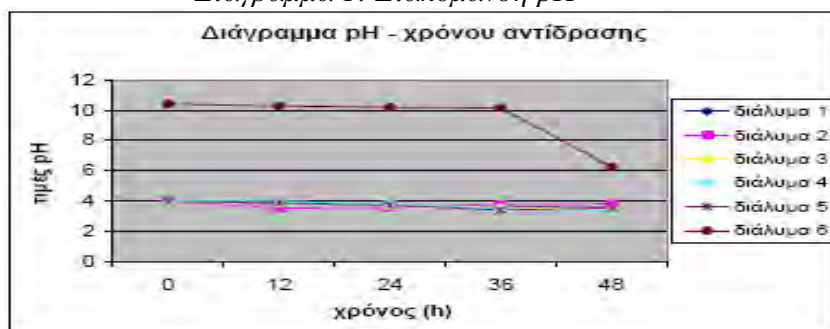
Αξίζει να σημειωθεί ότι και οι δύο κύκλοι πειραματικών ζυμώσεων, πραγματοποιήθηκαν με φυτική ουσία της ίδιας καλλιέργειας. Βέβαια ένα στοιχείο που διαφοροποιεί την περιεκτικότητα σε ολικά σάκχαρα τα στελέχη του σόργου, είναι το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε από την στιγμή που κόπηκε το γλυκό σόργο μέχρι τη στιγμή που οδηγήθηκε για συμπίεση και εξαγωγή του σακχαρούχου διαλείμματος. Κάτι το οποίο μας βοηθάει στην εξαγωγή συμπερασμάτων για την διάρκεια λειτουργικότητας των σακχάρων στη φυτική ουσία [2].

2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΛΚΟΟΛΙΚΗΣ ΖΥΜΩΣΗΣ

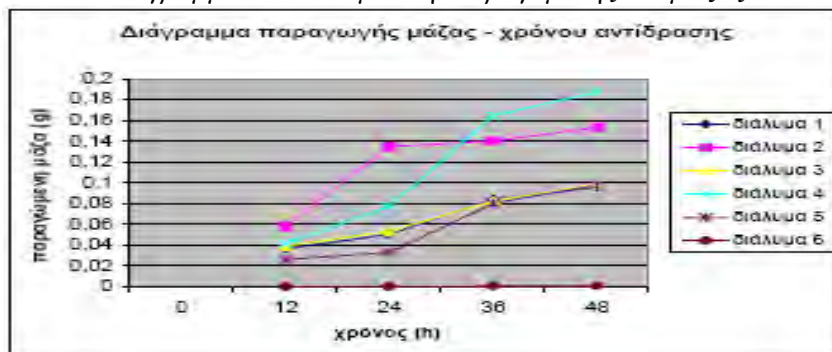
Κατά τη διαδικασία εξαγωγής των αποτελεσμάτων, λήφθηκε υπ' όψη μια σειρά από προσδιοριστικές παραμέτρους που επηρέασαν την διαδικασία. Για το λόγο αυτό, διερευνήθηκε επιπλέον η διακύμανση του pH, της παραγόμενης βιομάζας, της κατανάλωσης των σακχάρων – γλυκόζης. Τα διαγράμματα 1,2,3 και 4 που παρατίθενται παρακάτω, παρουσιάζουν τις διακυμάνσεις αυτών των παραμέτρων καθ' όλο τον β κύκλο ζωής της διαδικασίας.

Παράχθηκε βιοαιθανόλη σε συγκέντρωσης περίπου 6%, την στιγμή που η βέλτιστη παραγωγή είναι 7%. Δεχόμενοι και τα πειραματικά σφάλματα που τυχόν παρουσιάστηκαν στην διαδικασία, βρισκόμαστε σε ένα πολύ καλό στάδιο πραγματοποίησης παραγωγής βιοαιθανόλης από σόργο. Οι πειραματικές δοκιμές βρίσκονται σε πλήρη εξέλιξη στο Πολυτεχνείο Κρήτης προκειμένου να μοντελοποιηθεί η όλη διαδικασία [2][6].

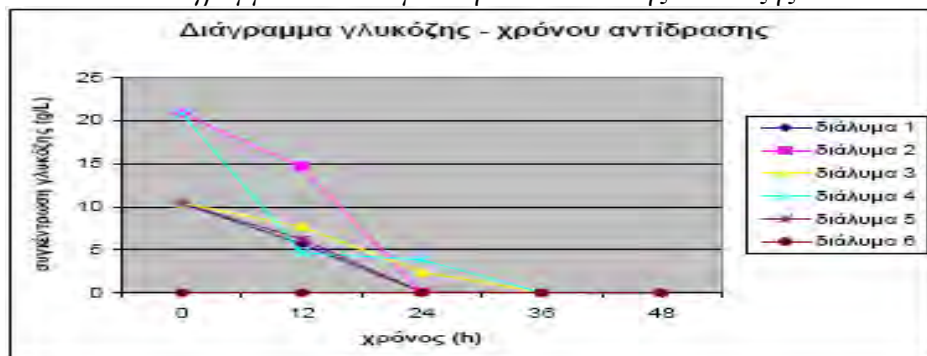
Διάγραμμα 1: Διακύμανση pH



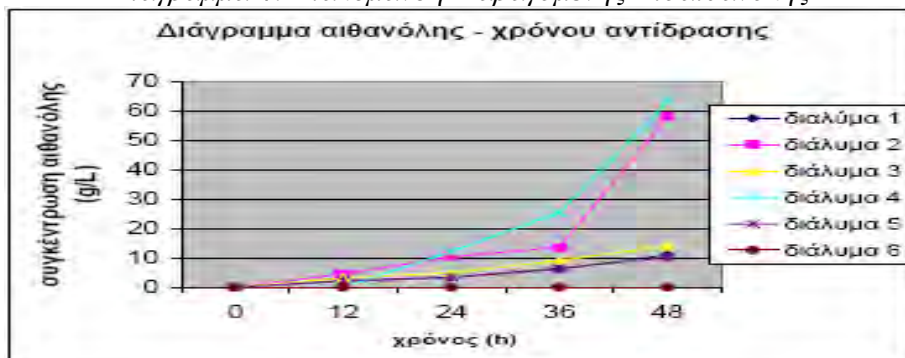
Διάγραμμα 2: Διακύμανση Παραγόμενης Βιομάζας



Διάγραμμα 3: Διακύμανση Κατανάλωσης Γλυκόζης



Διάγραμμα 4: Διακύμανση Παραγόμενης Βιοαιθανόλης

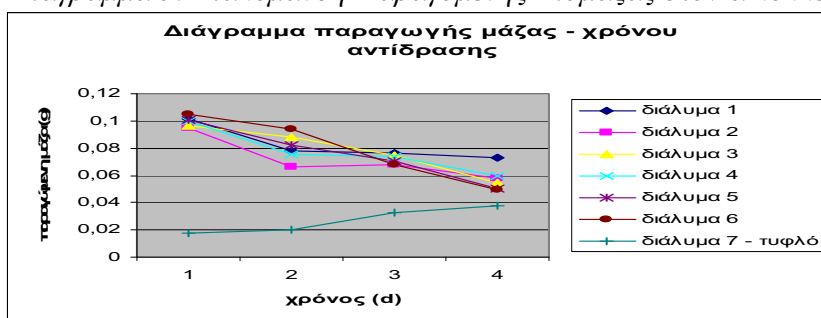


Πίνακας 4: Αποτελέσματα β κύκλου πειραμάτων

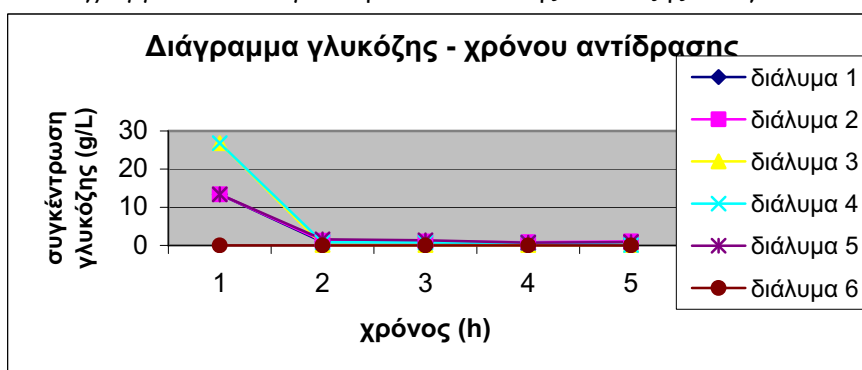
Περιπτώσεις	Ολικά Σάκχαρα (g/L)	Γλυκόζη (g/L)	Λοιπά Σάκχαρα (g/L)	Ζύμη (g)	Αιθανόλη (g/L)
1η	57	10,40	46,60	0,13	11,00
2η	114	10,40	93,20	0,25	58,00
3η	57	20,80	37,91	0,13	14,20
4η	114	20,80	75,81	0,25	63,00
5η	57	10,40	37,91	0,13	10,00

Αξίζει να παρασταθούν δύο ακόμα διαγράμματα, της παραγόμενης βιομάζας στον α κύκλο, καθώς επίσης και της κατανάλωσης γλυκόζης – σακχάρων στον γ κύκλο, για την καλύτερη εξαγωγή συμπερασμάτων [2].

Διάγραμμα 5: Διακύμανση Παραγόμενης Βιομάζας στον α κύκλο



Διάγραμμα 6: Διακύμανση Κατανάλωσης Γλυκόζης στο γ κύκλο



3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΣΜΟΙ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

3.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με αφορμή την εν λόγω έρευνα φτάσαμε σε ορισμένα κρίσιμα συμπεράσματα, αλλά και προβληματισμούς για την ευρεία αξιοποίηση του σόργου ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοαιθανόλης, αλλά και για την λειτουργία των βιοκαυσίμων στο συνθήκες της Θεσσαλίας.

Αρχικά, αναφορικά με το γλυκό σόργο παρατηρήσαμε ότι είναι ένα φυτό το οποίο αποτελεί εξαιρετική πηγή σακχάρων για την παραγωγή καύσιμης βιοαιθανόλης, βέβαια όμως χρειάζονται περαιτέρω προσπάθειες για την αριστοποίηση του συστήματος (εκχύλιση σακχάρων, μεγιστοποίηση παραγωγικότητας σε βιοαιθανόλη κλπ). Επίσης, σχετικά με το βοηθητικό μύκητα (*Saccharomyces Cerevisiae*) που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της αντίδρασης, αξίζει να σημειωθεί ότι διαθέτει πολύ καλή δυνατότητα μετατροπής των σακχάρων σε αιθανόλη. Επιπλέον, η παρακολούθηση της ζωτικότητάς του, όπως επίσης και η προσπάθεια βαθμονόμησης της ζωτικότητάς στο μέλλον, θα μας οδηγήσει σε πληρέστερα αποτελέσματα και συμπεράσματα. Η καλλιέργεια του εργαστηριακά για την καλύτερη και πιο αποτελεσματική παρακολούθησή του, είναι προτάσεις που θα βοηθήσουν στην καλύτερη διεξαγωγή έρευνας στο μέλλον.

Αξίζει να σημειωθεί, κάτι το οποίο παρατηρήθηκε στον γ κύκλο πειραμάτων, ότι είναι αρκετά ευαίσθητο στην παραμονή του εκτός συνθηκών συντήρησης, με αποτέλεσμα την πτώση της περιεκτικότητας σε σάκχαρα. Πράγμα που μας οδηγεί στο συμπέρασμα για διάσπαση των σακχάρων, βάσει και του ταχύτερου ρυθμού μετατροπής του σε αιθανόλη. Επίσης ένα ακόμα συμπέρασμα το οποίο εξήχθη, κατά την πειραματική διαδικασία είναι η ευαισθησία των συνθηκών ζύμωσης του σόργου. Παρατηρώντας το διάγραμμα 5, βλέπουμε ότι ενώ θα έπρεπε η ποσότητα της παραγόμενης μάζας να αυξάνεται, καθώς πιο πολλοί μικροοργανισμοί πεθαίνουν με την πρόοδο της αντίδρασης, αυτή μειώνεται, πράγμα μη – συμβατό. Αυτή η διαγραμματική απεικόνιση προφανώς οφείλεται σε πειραματικό σφάλμα, που σχετίζεται με την ταχύτητα ανάδευσης των διαλυμάτων [2,6].

3.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Η υπέρμετρη αξιοποίηση σόργου από αγροτικές περιοχές εμπεριέχει τον κίνδυνο να εγκαταλειφθούν για την παραγωγή τροφίμων, ύστερα από ελλιπή ενημέρωση και σχεδιασμό της παραγωγής. Ένας ακόμα κίνδυνος που πρέπει να προσεχθεί είναι ο κίνδυνος να οδηγηθούμε σε μονοκαλλιέργειες καταστρεπτικές για το περιβάλλον, καθώς θα υπάρξει μονομερής απορρόφηση των θρεπτικών του εδάφους και ενδεχομένως σε διάβρωση του εδάφους.

Τα επόμενα βήματα που πρέπει να γίνουν είναι αφ' ενός να δοθεί προτεραιότητα στην αξιοποίηση υπολειμμάτων από το σύστημα παραγωγής-επεξεργασίας τροφίμων, καθώς επίσης και να πραγματοποιηθεί έλεγχος του Κύκλου Ζωής του συστήματος σόργο/καύσιμη βιοαιθανόλη (λιπάσματα, ανάγκες άρδευσης, κλπ), ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος παραγωγής βιοαιθανόλης. Τέλος, ο ορθολογικός σχεδιασμός συστήματος εφοδιαστικής (logistics), χρειάζεται περαιτέρω ανάπτυξη για να φτάσουμε στα επιθυμητά αποτελέσματα.

Επιπροσθέτως, η αξιοποίηση της πλέον σύγχρονης τεχνολογίας – εξοπλισμού για την παραγωγή βιοκαυσίμων, θα είναι ένα βήμα μπροστά στον σκοπό της μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την δημιουργία των αερίων του θερμοκηπίου. Σε συνδυασμό της επιβίωσης των θετικών αποτελεσμάτων των πειραματικών καλλιεργειών σόργου θα οδηγήσουν σε πιο θαρρετά βήματα μπροστά στην ανάπτυξη των βιοκαυσίμων στην Ελλάδα, μαζί με την ενημέρωση των αγροτικών φορέων και συμμετοχή αυτών στην παραγωγή και διάθεση βιοκαυσίμων [2,6].

3.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η εισαγωγή των ενεργειακών καλλιεργειών στην Ελλάδα έχει διχάσει την κοινή γνώμη, καθώς επίσης και τον επιστημονικό κόσμο, βάσει και των προβληματισμών που αναπτύχθηκαν και πρωτίτερα. Το ζήτημα της διατροφικής κρίσης, σκεπάζει την εισαγωγή των ενεργειακών καλλιεργειών και κατά συνέπεια της προώθησης των βιοκαυσίμων. Για το λόγο αυτό, η προώθηση ενός κεντρικού σχεδιασμού των καλλιεργήσιμων εδαφών στην Ελλάδα και καταμερισμός αυτών για πλήρη διατροφική επάρκεια του πληθυσμού και εκτάσεων ενεργειακών καλλιεργειών, με το παράλληλο έλεγχο της παραγωγής και από αγροτικού φορείς είναι η ορθότερη λύση. Σε συνδυασμό με την απόδοση οικονομικών κινήτρων στον αγροτικό πληθυσμό και βελτίωση της υφιστάμενης νομοθεσίας, θα δοθεί ένα έναυσμα για την διάδοση των ενεργειακών καλλιεργειών [2].

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν:

- Τον καθηγητή κ. **Νικόλαο Δαναλάτο**, εργαστήριο Γεωργίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας για την προμήθεια του σόργου
- Τον καθηγητή κ. **Βασίλειο Γκέκα**, εργαστήριο Φαινόμενων Μεταφοράς και Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης για την παραχώρηση εργαστηριακής υποδομής για την πραγματοποίηση των πειραμάτων
- τον καθηγητή κ. **Νικόλαο Καλογεράκη** και την κ. **Αριάδνη Παντίδου**, εργαστήριο Βιοχημικών Διεργασιών και Περιβαλλοντικής Βιοτεχνολογίας, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης για την υποστήριξη κατά την πειραματική διαδικασία
- Τον καθηγητή κ. **Ζαχαρία Αγιουτάντη** και τον κ. **Στέλιο Μαυριγιαννάκη**, εργαστήριο Μηχανικής Τεμαχιδίων, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης για την υποστήριξη κατά τη διαδικασία συμπίεσης των στελεχών του σόργου

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] **Π. Ζόλκου Π. (2008)**, «Μελέτη παραγωγής καύσιμης βιοαιθανόλης από ελληνικές πρώτες ύλες», Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [2] **Eurobserv'ER (2008)**, «Biofuels barometer», June 2008
- [3] **Κ. Κίττας (2007)**, «Βιοκαύσιμα και Ενεργειακές Καλλιέργειες», Κίττας Κωνσταντίνος, 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Εναλλακτικών Καυσίμων και Βιοκαυσίμων, 26-27 Απριλίου 2007, Λίμνη Πλαστήρα Νεοχώρι Καρδίτσας.
- [4] **Β. Μακρής, Δ. Κέκος, Π. Χριστακόπουλος Π. (2007)**, «Καινοτομίες στην παραγωγή Βιοαιθανόλης ως βιοκαυσίμου»
- [5] **G. Grassi Giuliano (2004)**, “Low cost production of Bioethanol from Sweet Sorghum”, 14th biomass Conference, Paris, 17-21 Oct 2005
- [6] **Θ. Τσούτσος, Π. Ζόλκου Π. (2008)**, «Πειραματική μελέτη παραγωγής βιοαιθανόλης από πρώτες ύλες του Νομού Καρδίτσας», 1ο Αναπτυξιακό Συνέδριο Νομού Καρδίτσας, 8 – 10 Φεβρουαρίου 2008

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ – ΝΤΙΖΕΛ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Γ. Φονταράς, Μ. Κουσουλίδου, Ζ. Σαμαράς

Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τ.Θ. 458, ΤΚ 54124, Θεσσαλονίκη, Τηλ. +30 2310 996014, Fax +30 2310 996019, e-mail: zisis@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ισχύουσες νομοθετικές ρυθμίσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης απαιτούν την αντικατάσταση ενός ελάχιστου ποσοστού των καυσίμων που χρησιμοποιούνται στις μεταφορές από ανανεώσιμα καύσιμα βιολογικής προέλευσης. Επιπροσθέτως, η μελλοντική κοινοτική νομοθεσία για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επιβάλλει κριτήρια αειφορίας για την αναγνώρισή τους ως βιοκαύσιμα. Για την επίτευξη των στόχων που τίθενται και δεδομένων των χαρακτηριστικών της Ελληνικής οικονομίας, η Ελλάδα πρέπει να αξιοποιήσει κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο όλους τους διατιθέμενους πόρους. Ιδιαίτερη έμφαση θα πρέπει να δοθεί σε βιοκαύσιμα που υποκαθιστούν το πετρέλαιο κίνησης διότι σύμφωνα με τα υφιστάμενα στοιχεία, αυτά παρουσιάζουν μεγαλύτερο εμπορικό ενδιαφέρον. Στην εργασία αυτή διερευνάται η δυνατότητα εφαρμογής μιγμάτων φυτικών ελαίων και των μεθυλεστέρων τους με συμβατικό ντίζελ σε αυξημένες συγκεντρώσεις (10% κ.ο.), σε κινητήρες ντίζελ με στόχο τη μεγιστοποίησή της συμμετοχής τους στο εθνικό σύστημα καυσίμων. Παρουσιάζονται αποτελέσματα εκτενών μετρήσεων σε πραγματικό όχημα οι οποίες δείχνουν ότι οι εκπομπές ρύπων του οχήματος και η λειτουργία του κινητήρα δεν επηρεάζονται από τα καύσιμα αυτά. Παράλληλα πραγματοποιείται μια σύντομη ανάλυση του πραγματικού δυναμικού μείωσης εκπομπών CO₂ των εγχώρια παραγόμενων βιοκαυσίμων. Ως κύριο συμπέρασμα μπορεί να διατυπωθεί ότι τα μίγματα βιοκαυσίμων - ντίζελ παρουσιάζουν ενδιαφέρον ως καύσιμα ενώ η χρήση τους σε περιεκτικότητες μεγαλύτερες του 5.75% είναι δυνατή, ιδιαίτερα σε ελεγχόμενους στόλους, και μπορεί να βοηθήσει στην επίτευξη των στόχων που τίθενται.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα βιοκαύσιμα αποτελούν σήμερα ίσως την πιο διαδεδομένη τεχνολογία περιορισμού των εκπομπών CO₂ από τις μεταφορές. Ειδικότερα κατά την τελευταία δεκαετία, η χρήση των βιοκαυσίμων παγκοσμίως αυξήθηκε με έντονους ρυθμούς για λόγους που δεν σχετίζονται αποκλειστικά με περιβαλλοντικά θέματα. Στην παρούσα φάση το Ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο προώθησης των βιοκαυσίμων είναι το δεύτερο σημαντικότερο πολιτικό μέτρο στην κατεύθυνση της ενίσχυσης του αειφορικού χαρακτήρα των μεταφορών στην Ευρώπη μετά την εθελοντική δέσμευση των κατασκευαστών οχημάτων για τον περιορισμό των εκπομπών CO₂. Παράλληλα, η σύνδεση των βιοκαυσίμων με άλλους ευαίσθητους τομείς της οικονομίας όπως η αγροτική παραγωγή ενισχύει περαιτέρω τη σημασία τους, αποτελώντας όμως και πηγή προβληματισμού ως προς τα περιβαλλοντικά οφέλη και την ηθική της χρήσης καλλιεργήσιμων γαιών και βρώσιμων πρώτων υλών για την παραγωγή καυσίμων.

Σύμφωνα με τα όσα προβλέπονται από το υφιστάμενο νομικό πλαίσιο ως βιοκαύσιμα αναγνωρίζονται τα υγρά ή αέρια καύσιμα για τις μεταφορές τα οποία παράγονται από βιομάζα

[1]. Άμεση απόρροια της βιολογικής τους προέλευσης είναι η μεγάλη διαφοροποίηση την οποία παρουσιάζουν τα διάφορα βιοκαύσιμα ως προς τις φυσικές ιδιότητες, τη σύνθεση αλλά και το δυναμικό εξοικονόμησης CO₂. Οι πρώτες ύλες τους ποικίλλουν και μπορούν να παραχθούν σχεδόν σε οποιοδήποτε μέρος του κόσμου, προσφέροντας ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των ορυκτών καυσίμων, τα κοιτάσματα των οποίων απαντώνται σε περιορισμένες περιοχές της Γης. Η διαφοροποίηση των ιδιοτήτων και της σύνθεσής τους από την άλλη, δυσκολεύει την τυποποίηση τους και δρα ανασταλτικά ως προς την ενσωμάτωσή τους στις μεταφορές για τις οποίες η ποιότητα των καυσίμων θεωρείται σταθερή και δεδομένη [2]. Τέλος, η μεταβλητότητα του δυναμικού μείωσης CO₂ των υφιστάμενων βιοκαυσίμων [3] έχει οδηγήσει στην αμφισβήτηση του ουσιαστικού περιβαλλοντικού οφέλους τους. Στην κατεύθυνση αυτή αναμένεται σύντομα η υιοθέτηση θεσμικού πλαισίου από την ΕΕ το οποίο θα διασφαλίζει τον αειφορικό χαρακτήρα των βιοκαυσίμων [4]. Για την επίτευξη των στόχων που τίθενται καθώς και αυτών που επίκειται να υιοθετηθούν και δεδομένων των χαρακτηριστικών της Ελληνικής οικονομίας, η Ελλάδα πρέπει να αξιοποιήσει κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο όλους τους διατιθέμενους πόρους παραγωγής βιοκαυσίμων. Ιδιαίτερη έμφαση θα πρέπει να δοθεί σε βιοκαύσιμα που υποκαθιστούν το πετρέλαιο κίνησης διότι σύμφωνα με τα υφιστάμενα στοιχεία, αυτά παρουσιάζουν μεγαλύτερο εμπορικό ενδιαφέρον.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα παραπάνω, στα πλαίσια της μελέτης αυτής διερευνάται η δυνατότητα εφαρμογής μιγμάτων φυτικών ελαίων και των μεθυλεστέρων τους με συμβατικό ντίζελ σε συγκεντρώσεις υψηλότερες των προδιαγεγραμμένων (10% κ.ο.) σε κινητήρες επιβατηγών οχημάτων. Τα φυτικά έλαια που επιλέχθηκαν απαντώνται στην Ελλάδα και παρουσιάζουν ενδιαφέρον για την εγχώρια αγροτική παραγωγή. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα εκτενών μετρήσεων σε πραγματικό επιβατηγό όχημα ντίζελ τα οποία φανερώνουν τις δυνατότητες των καυσίμων αυτών. Παράλληλα πραγματοποιείται μια σύντομη ανάλυση του δυναμικού μείωσης εκπομπών CO₂ των εγχώρια παραγόμενων βιοκαυσίμων.

2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Πειραματικό όχημα

Το όχημα που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη ήταν ένα Renault Laguna κατασκευής 2001 που φέρει κινητήρα Diesel 1900cc, απευθείας έγχυσης με υπερπληρωτή, κλάσης εκπομπών Euro 3, και τεχνολογίας common rail (υψηλής πίεσης έγχυσης). Η τεχνολογία common rail αποτελεί την επικρατούσα τάση στους κινητήρες Diesel και είναι αντιπροσωπευτική των κινητήρων οι οποίοι κυκλοφορούν σήμερα στην Ευρώπη.

2.2 Πειραματικά καύσιμα

Το όχημα τροφοδοτήθηκε με μίγματα Diesel – βιοκαυσίμων περιεκτικότητας 10% σε βιοκαύσιμο. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκαν μίγματα τριών μη εστεροποιημένων φυτικών ελαίων (βαμβακέλαιο ραφινέ, ηλιέλαιο μη ραφιναρισμένο, κραμβέλαιο μη ραφιναρισμένο). και τριών βιοντίζελ τα οποία παράχθηκαν από σογιέλαιο, ηλιέλαιο και κραμβέλαιο. Τα μίγματα φυτικών ελαίων αξιολογήθηκαν ως προς το πρότυπο EN590 για το συμβατικό ντίζελ ελλείπει εξειδικευμένου προτύπου για τα φυτικά έλαια. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι τιμές των βασικών φυσικών ιδιοτήτων ήταν εντός προδιαγραφών. Όλα τα βιοντίζελ που εξετάστηκαν ήταν σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN14214 για το βιοντίζελ.

Το πετρέλαιο αναφοράς το οποίο χρησιμοποιήθηκε και ως καύσιμο βάσης στα μίγματα των βιοκαυσίμων ήταν συμβατικό πετρέλαιο κίνησης 50ppm S. Το πετρέλαιο αυτό όπως και το σύνολο του ντίζελ κίνησης που κυκλοφορεί στην Ελλάδα περιέχει ένα ποσοστό βιοκαυσίμου (βιοντίζελ) το οποίο κατά τη διάρκεια των μετρήσεων κυμάνθηκε από 0.5-2.5%. Ο ακριβής προσδιορισμός του περιεχόμενου βιοκαυσίμου είναι πολύ δύσκολος διότι απαιτεί εξειδικευ-

μένες χημικές αναλύσεις. Επίσης ήταν αδύνατη η προμήθεια καθαρού ντίζελ καθότι το τελευταίο δεν κυκλοφορεί στην Ελληνική αγορά και δεν πωλείται από τα διυλιστήρια. Παρόλ' αυτά το μικρό αυτό ποσοστό θεωρήθηκε ότι δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων εφόσον μάλιστα με εξαίρεση την αρχική μέτρηση αναφοράς συμπεριλαμβανόταν και στο καύσιμο αναφοράς.

2.3 Πρωτόκολλο μετρήσεων

Στις μετρήσεις εφαρμόστηκε η νομοθετημένη μεθοδολογία δειγματοληψίας υπό σταθερό όγκο ενώ η ανάλυση των ρύπων πραγματοποιήθηκε με πιστοποιημένο εξοπλισμό βάσει της προδιαγεγραμμένης διαδικασίας (Οδηγία 70/220/EK). Βασικός στόχος των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν ήταν η ποσοτικοποίηση των εκπομπών αερίων ρύπων του οχήματος, όχι μόνο στις συνθήκες οδήγησης που εφαρμόζονται κατά τη δοκιμή έγκρισης τύπου (Κύκλος οδήγησης NEDC), αλλά και σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Γι αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι κύκλοι οδήγησης Artemis. Οι κύκλοι προσομοιώνουν διαφορετικές συνθήκες κίνησης του αυτοκινήτου σε αστική οδήγηση (URBAN), σε περιαστική οδήγηση (ROAD) που αντιστοιχεί σε κίνηση σε περιφερικό δρόμο μέσης ταχύτητας, και σε υπεραστική οδήγηση (MOTORWAY) που αντιστοιχεί σε κίνηση σε δρόμο ταχείας κυκλοφορίας [5].

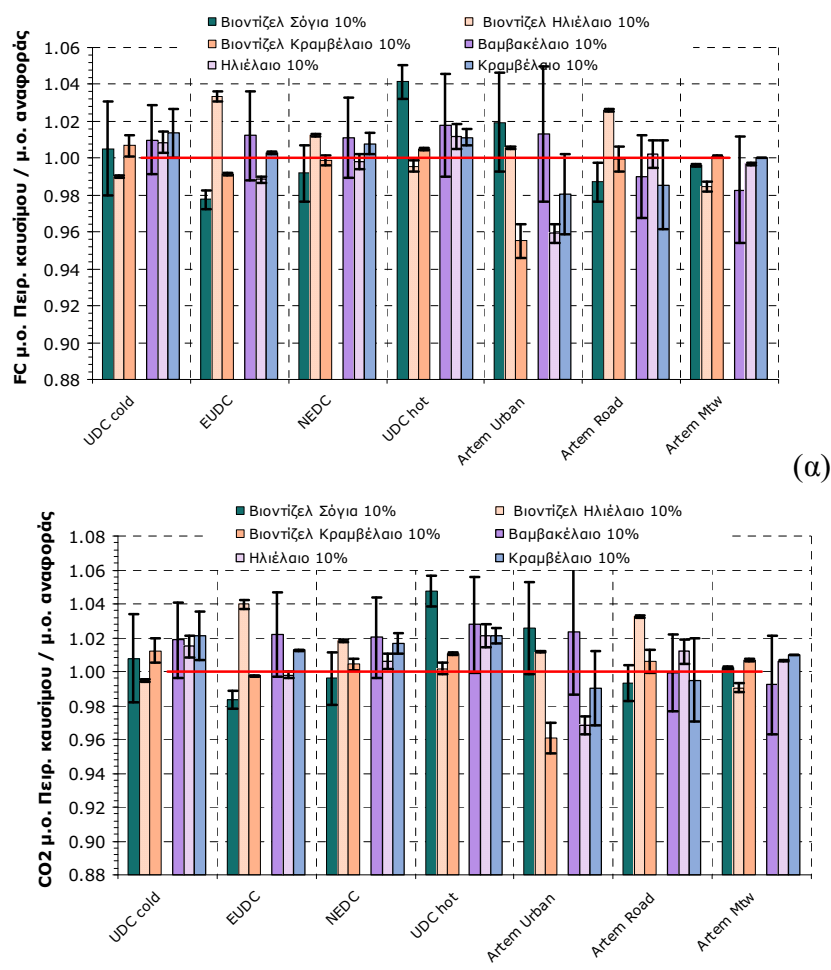
Πριν από κάθε μέτρηση πραγματοποιήθηκαν με κάθε καύσιμο τουλάχιστον 1000χλμ κίνησης στο δρόμο ώστε να γίνει η αφομοίωση του καυσίμου από τον κινητήρα και να εντοπιστούν τυχόν προβλήματα που μπορεί να συνοδεύουν την χρήση του. Κάθε μέτρηση περιελάμβανε δύο επαναλήψεις του πρωτοκόλλου αναφοράς ενώ συνολικά πραγματοποιήθηκαν 3 σετ μετρήσεων αναφοράς με συμβατικό ντίζελ ώστε να πιστοποιηθεί η αρχική, η τελική και η ενδιάμεση κατάσταση του οχήματος. Παράλληλα δημιουργήθηκε μια βάση αναφοράς για την αξιολόγηση των μιγμάτων. Κατά τη διάρκεια της μελέτης το όχημα παρακολουθούνταν συστηματικά για πιθανές βλάβες ή προβλήματα.

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στις εικόνες 1 και 2 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων εκπομπών ρύπων και κατανάλωσης καυσίμου. Σε κάθε εικόνα παρουσιάζεται ο λόγος της μέσης τιμής των μετρήσεων με βιοκαύσιμο προς τη μέση τιμή των μετρήσεων αναφοράς για τους διάφορους κύκλους οδήγησης. Η κόκκινη γραμμή που ισούται με 1 εκφράζει τη μέση τιμή των μετρήσεων αναφοράς ενώ οι γραμμές σφάλματος συμβολίζουν το λόγο της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής που μετρήθηκε με τα πειραματικά καύσιμα προς τη μέση τιμή των μετρήσεων αναφοράς.

3.1 Εκπομπές CO₂ και κατανάλωση καυσίμου

Σύμφωνα με την Εικόνα 1, η χρήση φυτικών ελαίων ή βιοντίζελ σε ποσοστό 10% δεν επηρεάζει την κατανάλωση καυσίμου (Εικόνα 1α) και τις εκπομπές CO₂ (Εικόνα 1β) Σε όλους τους κύκλους οδήγησης η διασπορά των μετρήσεων βρίσκεται εντός των ορίων ακρίβειας της μέτρησης ($\pm 2.5\%$). Η αύξηση της τάξεως του 4% που παρατηρείται για το βιοντίζελ από σογιέλαιο στον UDC Hot κύκλο όπως και η μείωση που παρατηρείται στον Artemis Urban στην περίπτωση του μίγματος βιοντίζελ από κραμβέλαιο αποτελούν μεμονομένα φαινόμενα. Οι μεταβολές αυτές δεν μπορούν να θεωρηθούν ως χαρακτηριστικές της χρήσης των συγκεκριμένων βιοκαυσίμων εφόσον μάλιστα τέτοιες τάσεις δεν επιβεβαιώνονται από τις μετρήσεις των άλλων κύκλων.

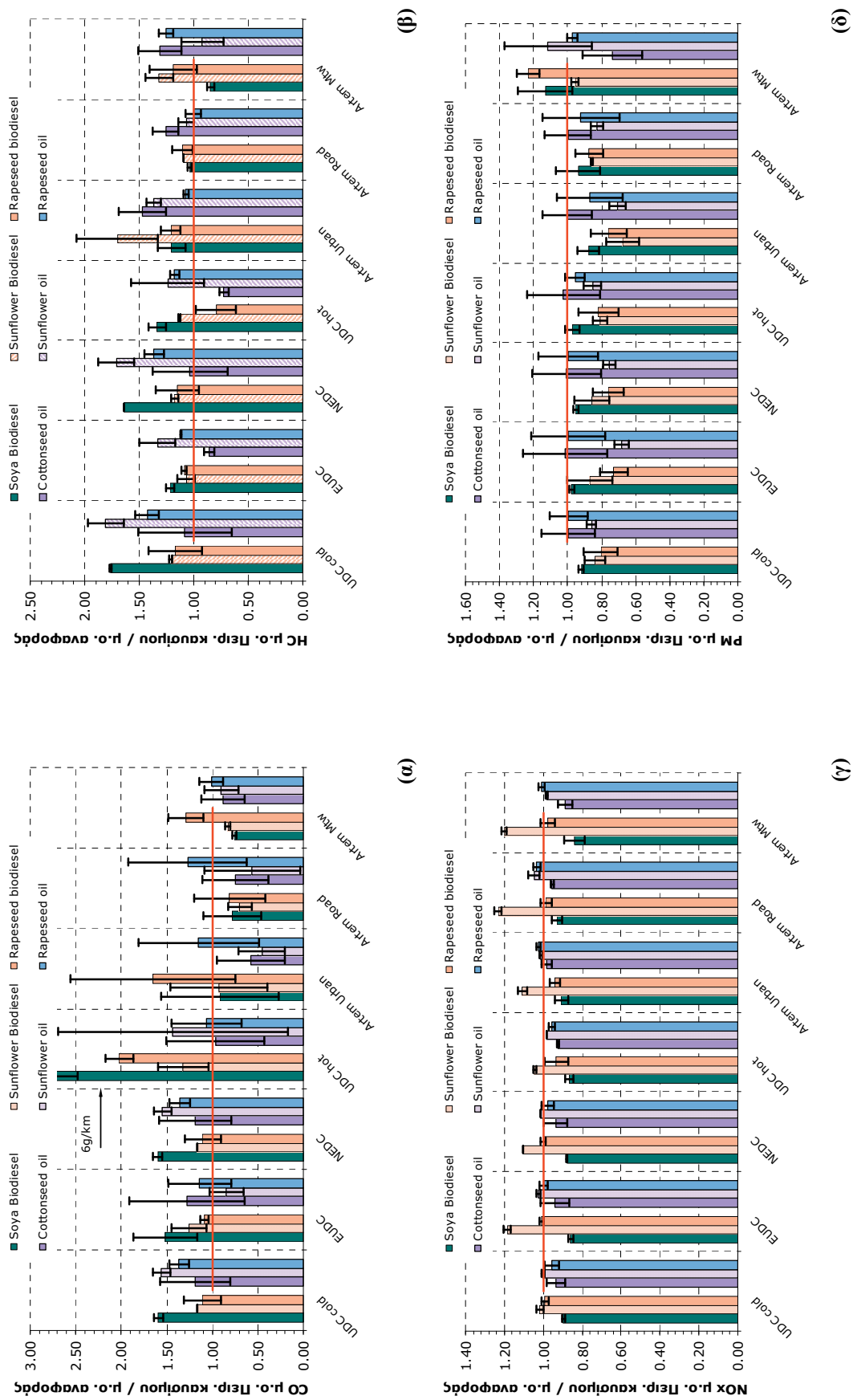


Εικόνα 1 Μετρήσεις βιοκαυσίμων/μετρήσεις αναφοράς για κατανάλωση καυσίμου (α) και CO₂ (β)

3.2 Εκπομπές CO, HC, NO_x και PM

Αναφορικά με τις εκπομπές CO (Εικόνα 2α) και HC (Εικόνα 2β), αυτές παρουσιάζουν αυξημένες τιμές τόσο για τα μίγματα φυτικών ελαίων όσο και για τα μίγματα μεθυλεστέρων στους νομοθετημένους κύκλους οδήγησης. Είναι χαρακτηριστικό ότι στους κύκλους αυτούς οι εκπομπές HC και CO βρίσκονται πάντα πάνω από το μέσο όρο των μετρήσεων αναφοράς. Οι αυξήσεις της τάξεως του 25-50% που παρατηρούνται στον ψυχρό UDC έχουν ιδιαίτερη σημασία καθότι αντικατοπτρίζουν πολύ μεγάλες αυξήσεις των εκπομπών σε απόλυτα μεγέθη ειδικά σε σύγκριση με τους λοιπούς κύκλους οδήγησης. Παρόλ' αυτά οι εκπομπές του οχήματος παραμένουν εντός των προδιαγεγραμμένων νομοθετημένων τιμών ενώ για τους κύκλους Artemis η φαινομενικά μεγάλη διαφοροποίηση από τις τιμές των μετρήσεων αναφοράς οφείλεται στα πολύ χαμηλά επίπεδα εκπομπών που παρουσιάζει το όχημα για τους ρύπους αυτούς. Στους κύκλους οδήγησης Artemis η εικόνα των μετρήσεων δεν επιτρέπει την διεξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων γύρω από τη συστηματικότητα των μεταβολών. Σε ότι αφορά τις εκπομπές υδρογονανθράκων και μονοξειδίου είναι πολύ σημαντική η παρατήρηση πως τα επίπεδα εκπομπών δεν διαφοροποιούνται χρονικά κατά την εξέλιξη της μελέτης. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει πως η χρήση των μιγμάτων δεν επηρεάζει τη λειτουργία του οξειδωτικού καταλύτη.

Εικόνα 2: Μετρήσεις βιοκαυσίμων/μετρήσεις αναφοράς για α)CO, β)HC, γ)NOx και δ)PM



Οι εκπομπές NO_x, (Εικόνα 2γ), γενικά κυμαίνονται στα επίπεδα αναφοράς με διαφοροποιήσεις που βρίσκονται τις περισσότερες φορές στα όρια ακρίβειας της μέτρησης οπότε δεν μπορούν να θεωρηθούν συστηματικές. Ξεχωρίζουν τα μίγματα βιοντίζελ από σόγια και βιοντίζελ από ηλιάνθο τα οποία παρουσιάζουν εντελώς διαφορετικά αποτελέσματα μεταξύ τους. Το βιοντίζελ από σόγια φαίνεται να μειώνει συστηματικά τα εκπεμπόμενα NO_x ενώ αντίθετα το βιοντίζελ από ηλιέλαιο να τα αυξάνει έως και 20%. Η παρουσία μη εστεροποιημένου ηλιελαίου στο ντίζελ δε έχει αντίστοιχη επίδραση στις εκπομπές NO_x ενώ από τα λάδια μόνο το βαμβακέλαιο προκαλεί μια ελαφρά μείωση στο ρύπο αυτό.

Οι εκπομπές σωματιδιακής μάζας (Εικόνα 2δ) παρουσιάζουν διαφορετική εικόνα στην περίπτωση των φυτικών ελαίων και στην περίπτωση των μεθυλεστέρων τους. Για όλα τα μίγματα βιοντίζελ οι μετρήσεις PM βρίσκονται κάτω από το μέσο όρο των μετρήσεων αναφοράς με εξαίρεση στον υπεραστικό κύκλο Artemis. Για το μίγμα ντίζελ με βιοντίζελ από ηλιέλαιο το οποίο παρουσιάζει τα βέλτιστα επίπεδα εκπομπών για το ρύπο αυτό οι εκπομπές είναι χαμηλότερες έως και 25%. Η συστηματική αυτή μείωση των PM είναι ιδιαίτερα σημαντική δεδομένων των επιπτώσεων που έχουν τα σωματίδια στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Σε ότι αφορά τα καθαρά φυτικά έλαια, η παρουσία τους σίγουρα διευρύνει τη διασπορά των μετρήσεων ενώ στις 2 από τις 3 περιπτώσεις (βαμβακέλαιο και κραμβέλαιο) οι εκπομπές βρίσκονται πολύ κοντά στις εκπομπές αναφοράς. Το ηλιέλαιο όπως και το εστεροποιημένο ηλιέλαιο μοιάζει να μειώνει τα επίπεδα εκπομπών PM.

4 ΑΕΙΦΟΡΙΑ

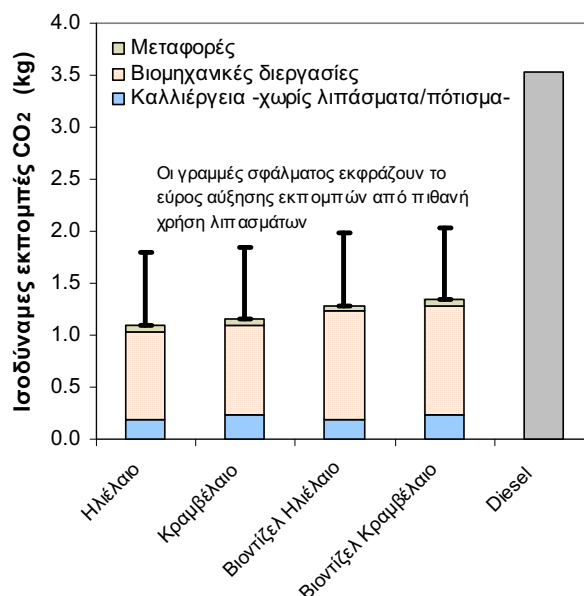
Η συμβολή των βιοκαυσίμων στην εξοικονόμηση αερίων του θερμοκηπίου πραγματοποιείται κατά την παραγωγή της βιομάζας μέσω της βιολογικής ανάκτησης του άνθρακα και όχι κατά τη χρήση του βιοκαυσίμου. Εντούτοις για να είναι πραγματικά βιώσιμο ένα βιοκαύσιμο πρέπει να λογίζεται το σύνολο των εκπομπών θερμοκηπίου που παράγονται σε όλες τις φάσεις της παραγωγής και χρήσης του. Το εκτιμώμενο κέρδος CO₂ από τη χρήση βιοντίζελ έναντι του πετρελαίου είναι περίπου 30-40% [3]. Στην κατεύθυνση αυτή η Ευρωπαϊκή Ένωση αναμένεται να θεσπίσει κριτήρια αειφορίας. Την αναγνώριση ενός βιοκαυσίμου θα πρέπει αυτό να οδηγεί σε υπολογίσιμες μειώσεις των εκπομπών CO₂.

Μια πρώτη σύντομη ανάλυση του δυναμικού μείωσης εκπομπών CO₂ των πειραματικών καυσίμων έδειξε ότι στην Ελλάδα η στόχοι αυτοί μπορούν να επιτευχθούν υπό ορισμένες προϋποθέσεις. Στα πλαίσια της ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από πειραματικές ενεργειακές καλλιέργειες και από δυο βιομηχανικές μονάδες, ένα σπορελαιουργείο και ένα εργοστάσιο παραγωγής βιοντίζελ. Τα βασικά σημεία της συγκεκριμένης ανάλυσης συνοψίζονται στα παρακάτω.

Σε ότι αφορά τις πρώτες ύλες, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από μη αρδευόμενες καλλιέργειες ελαιοκράμβης και ηλιάνθου [6]. Σε πολλές περιοχές της Ελλάδας όπου πραγματοποιούνται συστηματικές γεωργικές καλλιέργειες αντιμετωπίζονται σημαντικά προβλήματα έλλειψης νερού, υφαλμύρωσης των υπογείων υδάτων και ξηρασίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις το ενεργειακό κόστος για την άντληση των ποτιστικών υδάτων (ο υδροφόρος ορίζοντας φτάνει στα 60-90m ενώ στη Θεσσαλία έχουν αναφερθεί βάθη γεωτρήσεων έως 800m), καθιστά ασύμφορη οικονομικά και ζημιογόνο περιβαλλοντικά την παραγωγή του τελικού προϊόντος [7]. Οι συνθήκες αυτές αναμένεται να επιδεινωθούν τα επόμενα χρόνια. Θεωρείται συνεπώς πως οι μελλοντικές ενεργειακές καλλιέργειες θα πρέπει να έχουν τις ελάχιστες δυνατές απαιτήσεις σε άρδευση ώστε να είναι οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμες.

Ένας ακόμη παράγοντας ο οποίος επηρεάζει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά την παραγωγή των βιοκαυσίμων είναι η χρήση λιπασμάτων. Η ποσοτικοποίηση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από τη χρήση λιπασμάτων είναι μια σύνθετη διαδικασία διότι

εξαρτάται από τον τύπο και την υγρασία του εδάφους, το είδος της καλλιέργειας, την ποσότητα του λιπάσματος που χρησιμοποιείται και άλλους παράγοντες[8]. Για τους υπολογισμούς ελήφθησαν ενδεικτικά εύρη τιμών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τη χρήση λιπασμάτων. Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπ' όψιν και αναλύοντας τις ενεργειακές ροές στα διάφορα στάδια παραγωγής και μεταφοράς των προϊόντων προέκυψαν τα στοιχεία της Εικόνας 3.



Εικόνα 3 Υπολογισμός ισοδύναμων εκπομπών CO₂ ανα kg καταναλισκόμενου καυσίμου

Το δυναμικό εξοικονόμησης εκπομπών CO₂ εκτιμάται περίπου στο 68% για τα φυτικά έλαια και στο 62% για το βιοντίζελ. Οι τιμές αυτές βέβαια αποτελούν βέλτιστη περίπτωση καθότι δεν λαμβάνουν υπ' όψιν πιθανές ενεργειακές δαπάνες ποτίσματος και λίπανσης. Η χρήση λιπασμάτων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αυξήσεις των εκπομπών CO₂ μειώνοντας δραστικά το δυναμικό ενώ παράλληλα το πότισμα, ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες άρδευσης, είναι δυνατό να οδηγήσει σε προϊόντα τα οποία έχουν αρνητικό ισοζύγιο εκπομπών CO₂. Οι παράγοντες αυτοί καθώς και τα ισοζύγια άλλων εκπομπών αερίων (πχ N₂O) πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπ' όψιν κατά τη μελέτη και το σχεδιασμό της μελλοντικής ενεργειακής πολιτικής καθώς και από τους βιοκαυσίμων.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η ευρωπαϊκή νομοθεσία επιτρέπει τη χρήση βιοκαυσίμων όπως τα φυτικά έλαια εφόσον όμως αυτά είναι συμβατά με τον κινητήρα του οχήματος και εφόσον πληρούνται οι προδιαγραφές εκπομπών αερίων ρύπων.
- Εξετάστηκαν οι σημαντικότερες φυσικές ιδιότητες των μιγμάτων και επαληθεύτηκε ότι τα μίγματα φυτικών ελαίων (έως 10% κο) πληρούν τις προδιαγραφές (EN590) ενώ τα βιοντίζελ που παρήχθησαν από τα έλαια ανταποκρινόταν στο πρότυπο EN14214. Ο εξευγενισμός των φυτικών ελαίων έχει θετική επίδραση στα χαρακτηριστικά τους καθώς και στα χαρακτηριστικά του παραγόμενου βιοντίζελ.
- Η χρήση φυτικών ελαίων ή βιοντίζελ δεν επηρεάζει την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές CO₂ οι οποίες αυξομειώνονται γύρω από την τιμή αναφοράς κατά $\pm 2.5\%$.

- Οι εκπομπές NOx γενικά κυμαίνονται στα επίπεδα των εκπομπών αναφοράς. Το βιοντίζελ από σόγια φαίνεται να μειώνει συστηματικά τα εκπεμπόμενα NOx ενώ αντίθετα το βιοντίζελ από ηλιέλαιο να τα αυξάνει έως και 20%. Η παρουσία μη εστεροποιημένου ηλιελαίου στο ντίζελ δε έχει αντίστοιχη επίδραση στις εκπομπές NOx ενώ από τα λάδια μόνο το βαμβακέλαιο προκαλεί μια ελαφρά μείωση στο ρύπο αυτό.
- Οι εκπομπές σωματιδιακής μάζας παρουσιάζουν διαφορετική εικόνα στην περίπτωση των φυτικών ελαίων και στην περίπτωση των μεθυλεστέρων τους. Για όλα τα μίγματα βιοντίζελ οι μετρήσεις PM βρίσκονται κάτω από το μέσο όρο των μετρήσεων αναφοράς με εξαίρεση στον υπεραστικό κύκλο Artemis. Σε ότι αφορά τα καθαρά φυτικά έλαια, η παρουσία τους σίγουρα διευρύνει τη διασπορά των μετρήσεων ενώ στις 2 από τις 3 περιπτώσεις (βαμβακέλαιο και κραμβέλαιο) οι εκπομπές βρίσκονται πολύ κοντά στις εκπομπές αναφοράς. Το ηλιέλαιο όπως και το εστεροποιημένο ηλιέλαιο μοιάζει να μειώνει τα επίπεδα εκπομπών PM.
- Οι μετρήσεις που διεξήχθησαν στο όχημα σε κύκλο οδήγησης NEDC, έδειξαν ότι τα υπό δοκιμή καύσιμα έχουν περιορισμένη επίδραση στις εκπομπές. Σε όλες τις περιπτώσεις οι εκπομπές του οχήματος διατηρήθηκαν εντός των νομοθετημένων ορίων.
- Η λειτουργία του οξειδωτικού καταλύτη δεν επηρεάστηκε από την εφαρμογή των βιοκαυσίμων.
- Η χρήση μιγμάτων φυτικών ελαίων συμπληρωματικά προς τη χρήση βιοντίζελ μπορεί να εξεταστεί ως πρόσθετο μέτρο για την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί.
- Τα βιοκαύσιμα που μελετήθηκαν παρουσιάζουν σημαντικό δυναμικό μείωσης εκπομπών CO₂ εφόσον παράγονται από ξερικές καλλιέργειες με περιορισμένη χρήση λιπασμάτων. Τα στοιχεία αυτά πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπ' όψιν εν όψει της επικείμενης θέσπισης κριτηρίων αειφορίας από την Ευρωπαϊκή Ένωση

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Επιτροπή, Ε., Οδηγία 2003/30/EC του Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 8 Μαΐου 2003 σχετικά με την προώθηση της χρήσης βιοκαυσίμων και άλλων ανανεώσιμων καυσίμων για τις μεταφορές, Ε.τ.Ε. Κοινοτήτων, Editor. 2003: Βρυξέλλες.
2. Agarwal, A.K., Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines Progress in Energy and Combustion Science 33 (2007) 233–271, 2007. 33(2007): p. 233-271.
3. CONCAWE, Well-To-Wheel analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. 2007, CONCAWE/EUCAR/JRC.
4. EBTP, Strategic Research Agenda & Strategy Deployment Document. 2008, European biofuels technology platform (EBTP).
5. André, M., The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions Science of the Total Environment, 2004. 334-335 p. 73-84.
6. Zanakis, G., Mariolis, N., Zabaniotou, A., Skoulou, V., Samaras, Z., and Fontaras, G., Integrated management study of energy crops and their residues for biofuels and energy production, in Proceedings of 2nd National Biofuels and Alternative Fuels Conference. 2007: Neochori Karditsa.
7. Daskalaki, P. and Voudouris, K., Groundwater quality of porous aquifers in Greece: a synoptic review. Environmental Geology, 2008. DOI 10.1007/s00254-007-0843-2.
8. Delucchi, M., Lifecycle Analyses of Biofuels. 2006, Institute of Transportation Studies University of California, Davis: One Shields Avenue Davis, CA 95616.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ ΣΤΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Β.Α. Κουλουμπής, Θ.Α. Τσούτσος, Θ. Ζαφείρης, Σ. Φωτεινής

Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, 73100, Χανιά
e-mail: victor.kouloumpis@gmail.com, theocharis.tsoutsos@enveng.tuc.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της εργασίας είναι η κατανόηση και καταγραφή του κύκλου ζωής του βιοντίζελ όπως παράγεται από διαφορετικές ελληνικές πρώτες ύλες στις ελληνικές συνθήκες. Επικεντρώνεται στην εκτίμηση και σύγκριση των κύκλων ζωής διαφορετικών τύπων βιοντίζελ με αυτόν των ορυκτών καυσίμων. Μελετήθηκαν τρεις διαφορετικές ενεργειακές καλλιέργειες (ελαιοκράμβης, ηλίανθου και σόγιας) αναφορικά με τα επίπεδα παραγωγικότητας βιοντίζελ λαμβάνοντας πάντα υπόψη τις τρέχουσες συνθήκες κλίματος και παραγωγής των φυτών αυτών.

Έχοντας ως κριτήριο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά έκταση καλλιέργειας, η παραγωγή βιοντίζελ από σόγια είναι η πιο αποτελεσματική λύση. Όμως, με κριτήριο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά παραγόμενη ποσότητα βιοντίζελ, η καλλιέργεια με τις ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι του ηλίανθου. Από την εργασία προκύπτει ότι τα περιβαλλοντικά οφέλη, σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα, εμφανίζονται όχι μόνο στις εκπομπές κατά τη διάρκεια της χρήσης, αλλά και κατά τη φάση της παραγωγής του βιοντίζελ. Καταλήγοντας, διαπιστώνεται ότι με σχετικά μικρές μετατροπές είναι εφικτή η δραστική ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με αφορμή την Κοινοτική Οδηγία για τα βιοκαύσιμα (μέχρι το 2010 το μερίδιό τους στον τομέα των μεταφορών θα έπρεπε να έχει αυξηθεί στο 5,75%) εξετάστηκε η εντατική καλλιέργεια ενεργειακών φυτών [1]. Το κυριότερο πλεονέκτημα είναι ότι η σταθερή παραγωγή μπορεί να εξασφαλίσει ευρύ φάσμα και προμήθεια πρώτης ύλης σε μεγάλη κλίμακα, με ομοιόμορφα κατανομημένα χαρακτηριστικά στα υγρά βιοκαύσιμα και τις μονάδες παραγωγής ενέργειας [2,3].

Στην παρούσα μελέτη, εξετάστηκε ο κύκλος ζωής των ενεργειακών καλλιεργειών της ελαιοκράμβης, του ηλίανθου και της σόγιας, που είναι οι πιο διαδεδομένες για την παραγωγή βιοντίζελ στην Ευρώπη [4], αλλά προσαρμοσμένες στις ελληνικές συνθήκες [5,6].

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) είναι τεχνική για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με ένα προϊόν, διαδικασία ή ενέργεια μέσω του καθορισμού και της ποσοτικοποίησης της ενέργειας και των υλικών που χρησιμοποιούνται, ταυτόχρονα με τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον, αποτιμώντας τις επιπτώσεις από τη χρήση ενέργειας, υλικών και την απόθεση των αποβλήτων [7]. Ο όρος «κύκλος ζωής» περιγράφει τις πιο σημαντικές διαδικασίες της ζωής ενός προϊόντος, από την παραγωγή, χρήση, διατήρηση και τελική απόρριψη του, συμπεριλαμβάνοντας την απόκτηση της πρώτης ύλης που είναι απαραίτητη για την παραγωγή [8,9].

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην εργασία αυτή ήταν ο σχεδιασμός του κύκλου ζωής βασισμένος στις διεθνείς συνθήκες, με παράλληλη συλλογή δεδομένων και μελέτη των μονάδων παραγωγής και των καλλιεργειών. Ελέγχοντας τα δεδομένα αυτά με τις ελληνικές πηγές και τις τοπικές συνθήκες καθορίστηκαν οι παράμετροι σχεδιασμού του κύκλου ζωής. Μελετήθηκαν διάφορα σενάρια για τη μείωση των αρνητικών περιβαλλοντικών συνεπειών

μετά από προσομοίωση για τους διάφορους τύπους βιοντίζελ ανάλογα με την καλλιέργεια αλλά και με αναφορά στο συμβατικό ντίζελ.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Κάθε καλλιέργεια χωρίστηκε σε πέντε επιμέρους στάδια που καλύπτουν ολόκληρη τη διαδικασία παραγωγής [10,11] από τη προετοιμασία του εδάφους έως τη παραγωγή βιοντίζελ: (α) προετοιμασία εδάφους και καλλιέργεια, (β) μεταφορά πρώτης ύλης, (γ) σπορελαιουργείο – θραυστήρας, (δ) ραφιναρία σπορέλαιων, (ε) παραγωγή βιοντίζελ

Πίνακας 1. Παράγοντες και απαιτήσεις ενέργειας και υλικών για τα τρία είδη καλλιεργειών

Αρδευση	Ελαιοκράμβη (m ³)	Ηλίανθος (m ³)	Σόγια (m ³)
Νερό από ποταμό	54	108	216
Λιπάσματα	Ελαιοκράμβη (kg)	Ηλίανθος (kg)	Σόγια (kg)
Λίπασμα N	23	7	4
Λίπασμα K ₂ O	20	-	-
Λίπασμα P ₂ O ₅	9	-	-
Οξείδιο μαγνησίου	2,5	-	-
Ζιζανιοκτόνα- Παρασιτοκτόνα	Ελαιοκράμβη (kg)	Ηλίανθος (kg)	Σόγια (kg)
Biocide trifluralin	0,1	0,1	0,1
Pesticide pirimicarb	0,1	-	0,1
Pesticides dicofol	-	-	0,05
Μεταφορά πρώτης ύλης	Ελαιοκράμβη (tkm)	Ηλίανθος (tkm)	Σόγια (tkm)
Φορτηγό 16t B250	13	10,5	12
Ενεργειακές απαιτήσεις για τη θραύση της πρώτης ύλης	Ελαιοκράμβη	Ηλίανθος	Σόγια
Μαζούτ	10,028 kg	8,4 kg	7,68 kg
Ενέργεια από το δίκτυο (Ηλεκτρική MV Ελλάδας)	18,802 kWh	15,75 kWh	12 kWh
Απαιτήσεις ενέργειας στη ραφιναρία	Ελαιοκράμβη	Ηλίανθος	Σόγια
Μαζούτ	5,866 kg	5,04 kg	2,592 kg
Ενέργεια από το δίκτυο (Ηλεκτρική MV Ελλάδας)	6,548 kWh	5,628 kWh	2,851 kWh
Απαιτούμενη ενέργεια για τις αντιδράσεις	Λάδι Ελαιοκράμβης	Λάδι Ηλίανθου	Λάδι Σόγιας
Seed-oil (kg)	98	84	43,2
MeOH (Methanol) (kg)	21	18,174	9,346
NaOH (NaOH) (kg)	0,783	0,673	0,346
H ₂ O (Water) (kg)	99	84,967	43,697
H ₃ PO ₄ (Phosphoric acid) (kg)	0,607	0,521	0,264
Ενέργεια από το δίκτυο (Ηλεκτρική MV Ελλάδας) (kWh)	6,37	5	3
Παραγωγή βιοντίζελ ανά στρέμμα καλλιέργειας	Ελαιοκράμβη	Ηλίανθος	Σόγια
Παραγόμενη ποσότητα (kg)	97,12	83,439	42,911
Συντελεστής παραγωγής	1	1,16396	2,26329

Το λογισμικό που υιοθετήθηκε είναι το SimaPro7, ευρέως γνωστό εργαλείο για την AKZ, το οποίο χρησιμοποιείται τόσο από επαγγελματίες όσο και από ερευνητές. Το μεγάλο πλεονέκτημά του είναι ο μεγάλος αριθμός βάσεων δεδομένων και η δυνατότητα να εκτιμά τα αποτελέσματα εκφρασμένα στο φορτίο επιβάρυνσης στο περιβάλλον. Το SimaPro7 χρησιμοποιεί πολλές μεθόδους για την εκτίμηση των επιδράσεων, αλλά όλες έχουν την

ακόλουθη βασική δομή: (α) χαρακτηρισμός, (β) εκτίμηση ζημιών, (γ) κανονικοποίηση, (δ) τοποθέτηση βαρών.

Η μέθοδος για τη σύγκριση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων περιλαμβάνει τη δυνατότητα ανάλυσης μέσω της εκτίμησης των ζημιών. Οι κατηγορίες που έχουν επιλεγεί για την κατανομή των περιβαλλοντικών φορτίων είναι: α) Η απώλειες της ανθρώπινης υγείας, β) οι απώλειες της ποιότητας των οικοσυστημάτων και γ) οι απώλειες των πόρων.

Σε ό,τι αφορά στη διαδικασία της καλλιέργειας και οι τρεις καλλιέργειες χρειάζονται όργωμα, σκάλισμα και θερισμό, ενώ για τη σπορά της ελαιοκράμβης απαιτείται επιπλέον ένα σβάρνισμα. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται δεδομένα που αφορούν στην άρδευση, στη λίπανση, στα φυτοφάρμακα και ζιζανιοκτόνα, στη μεταφορά της ύλης και στις απαιτήσεις της ενέργειας καθώς και της παραγωγικότητας σε βιομάζα.

Έπειτα, προκειμένου να μειωθούν οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις τροποποιήθηκαν κάποιες παράμετροι [12,13] και δημιουργήθηκε ένα εναλλακτικό, έτσι ώστε να είναι διακριτά τα οφέλη ή οι επιβαρύνσεις που προκύπτουν ξεχωριστά. Για τη διαφοροποίηση στη λίπανση, ελέγχθηκαν εναλλακτικά λιπάσματα NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, KNO_3 . Έπειτα εξετάστηκε η υποκατάσταση των συνθετικών λιπασμάτων με οργανικά. Για τις διαφοροποιήσεις στην άρδευση αρχικά μειώνεται κατά 20%, ενώ στο δεύτερο σενάριο αυξάνεται κατά 20%. Σε ό,τι αφορά στις διαφοροποιήσεις των καυσίμων, αντικαταστάθηκαν οι ποσότητες του πετρελαίου από μαζούτ, ενώ για την ενέργεια που παρέχεται από το δίκτυο θεωρούμε το σενάριο όπου η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (υδροηλεκτρική, ηλιακή και αιολική) αυξάνεται κατά 20%.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ

Στην εργασία αυτή μελετώνται οι επιβαρύνσεις από κάθε καλλιέργεια (α) ανά στρέμμα καλλιέργειας, (β) ανά παραγόμενη ποσότητα βιοντίζελ.

Για τη παρουσίαση των αποτελεσμάτων ανά παραγόμενη ποσότητα βιοντίζελ θεωρούμε ως σημείο αναφοράς την παραγόμενη ποσότητα, ανά στρέμμα καλλιέργειας, χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη την ελαιοκράμβη (πίνακας 1).

Επομένως για τη παραγωγή 97,120 kg βιοντίζελ με πρώτη ύλη τον ηλίανθο απαιτούνται 1,1639 στρέμματα καλλιέργειας, και 2,2633 στρέμματα σόγιας αντίστοιχα. Οι πίνακες και τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων στις περιπτώσεις του ηλίανθου και της σόγιας θα παρουσιαστούν αρχικά ανά στρέμμα καλλιέργειας και στη συνέχεια ανά 97,120 kg παραγωγής βιοντίζελ, ενώ στη περίπτωση της ελαιοκράμβης οι πίνακες και τα διαγράμματα παρουσιάζονται μία φορά καθώς εξυπηρετούν και τις δύο περιπτώσεις.

3.1.1. ΕΛΑΙΟΚΡΑΜΒΗ

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του κύκλου ζωής της ελαιοκράμβης η μέγιστη επιβάρυνση προκαλείται από τη χρήση λιπασμάτων αζωτούχας σύνθεσης (32,1%), ενώ συνολικά η επιβάρυνση από τη λίπανση του εδάφους ξεπερνά το 40% (40,32%). Σημαντικά περιβαλλοντικά φορτία προστίθενται λόγω της χρήσης μεθανόλης (12,9%), ενώ σημαντικότερος παράγοντας μετά την λίπανση των εδαφών είναι οι απαιτήσεις σε ενέργεια, είτε με τη μορφή υγρών καυσίμων είτε με τη μορφή ενέργειας από το τοπικό δίκτυο, το άθροισμα του συγκεκριμένου φορτίου αποτελεί το 21,27% της συνολικής επιβάρυνσης.

Η κατανομή των επιβαρύνσεων αυτών επηρεάζει κυρίως τις κατηγορίες των ορυκτών καυσίμων και ανόργανων ουσιών που βλάπτουν το αναπνευστικό σύστημα. Η επίδραση στην πρώτη περίπτωση οφείλεται στην κατανάλωση απαιτούμενων υλικών για την παραγωγή

ενέργειας, ενώ στη δεύτερη στις εκπεμπόμενες ποσότητες ανόργανων ουσιών και σωματιδίων.

3.1.2. ΗΛΙΑΝΘΟΣ

Για τον ηλίανθο παρατηρούμε πως το μεγαλύτερο κομμάτι του περιβαλλοντικού φορτίου προέρχεται από τις ενεργειακές απαιτήσεις στον θραυστήρα και στη ραφιναρία του ελαίου (39,3%). Ακολουθούν οι επιβαρύνσεις από τη λίπανση των εδαφών (21,4%) και από τη χρήση μεθανόλης στη μονάδα παραγωγής βιοντίζελ (24,2%).

3.1.3. ΣΟΓΙΑ

Τα ποσοστά επιβάρυνσης και εδώ οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στην απαιτούμενη ενέργεια (41,4%). Ακολουθεί το περιβαλλοντικό φορτίο από τη μεθανόλη (17,8%), ενώ η λίπανση συνεισφέρει κατά 17,5 %. Εξετάζοντας τη καλλιέργεια της σόγιας ως προς τη παραγόμενη ποσότητα η διαφοροποιήσεις αφορούν μόνο το τελικό αποτέλεσμα καθώς η δομή και τα όρια του κύκλου ζωής παραμένουν αμετάβλητα. Στη συγκεκριμένη καλλιέργεια, λόγω της περιορισμένης δυνατότητας παραγωγής βιοντίζελ ανά στρέμμα καλλιέργειας, παρατηρούμε πως με την αναγωγή των αποτελεσμάτων ως προς τη παραγόμενη ποσότητα έχουμε μεγάλη αύξηση του τελικού αποτελέσματος όπως αναμενόταν.

3.2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

3.2.1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΑ ΣΤΡΕΜΜΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ

Αρχικά, συγκρίνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά στρέμμα καλλιέργειας παρατηρούμε πως η ελαιοκράμβη προκαλεί τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Δυστυχώς προτιμάται από τους παράγωγους τόσο στη χώρα μας όσο και παγκόσμια λόγω της αποδοτικότερης παραγωγής. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα ως ωφελιμότερη πρώτη ύλη παρουσιάζεται η σόγια.

Παρατηρούμε πως και στις τρεις καλλιέργειες το μεγαλύτερο μέρος των περιβαλλοντικών φορτίων οφείλεται σε τρεις παράγοντες.

1. Χρήση λιπασμάτων (κυρίως αζωτούχας σύνθεσης)
2. Χρήση μεθανόλης στο στάδιο της μετατροπής των σπορέλαιων σε βιοντίζελ
3. Ενεργειακές απαιτήσεις στο στάδιο της ραφιναρίας των σπορέλαιων και στον θραυστήρα για τη παραγωγή των σπορέλαιων.

Για την καλλιέργεια της ελαιοκράμβης η εκτεταμένη χρήση λιπασμάτων - κυρίως, οι, συγκριτικά, μεγάλες ποσότητες αζωτούχων- προκαλεί ραγδαία αύξηση των περιβαλλοντικών φορτίων και την καθιστά περισσότερο επιβλαβή. Ανάμεσα στις καλλιέργειες του ηλίανθου και της σόγιας οι σημαντικότερες διαφορές προκύπτουν από τις μικρότερες απαιτήσεις της καλλιέργειας της σόγιας και στους τρεις παράγοντες με το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό φορτίο

Η κατανομή των περιβαλλοντικών φορτίων μεταξύ των τριών κατηγοριών (Damage Categories) παρουσιάζει παρόμοια αποτελέσματα. Παρατηρούμε πως οι επιβαρύνσεις στα διάφορα οικοσυστήματα είναι ιδιαίτερα περιορισμένες και ακολουθούν αυτές στην ανθρώπινη υγεία. Ο τομέας που επιβαρύνεται περισσότερο είναι οι πόροι καθώς η παραγωγή και λιπασμάτων και μεθανόλης είναι έντασης ενέργειας.

3.2.2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΜΟΝΑΔΑ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ

Ανάγοντας τα αποτελέσματα ανά παραγόμενη ποσότητα προκύπτουν διαφορετικά αποτελέσματα. Σύμφωνα με τις δυνατότητες παραγωγής κάθε καλλιέργειας ανά καλλιεργούμενη έκταση η σόγια υστερεί σημαντικά. Λόγω της χαμηλής παραγωγικότητας

της σόγιας για παραγωγή ίσης ποσότητας βιοντίζελ με τις άλλες δύο καλλιέργειες απαιτείται σχεδόν διπλάσια έκταση. Υπολογίζοντας τις επιβαρύνσεις ανά παραγόμενη ποσότητα, η παραγωγή με τη χρήση ελαιοκράμβης ως πρώτη ύλη παραμένει η επιβλαβέστερη για τους ίδιους λόγους που αναφέραμε και στη προηγούμενη σύγκριση. Εντούτοις σε αυτή τη σύγκριση λόγω του συνδυασμού απόδοσης και απαιτήσεων (λίπανση, μεθανόλη και ενέργεια), η καλλιέργεια που επιβαρύνει λιγότερο το περιβάλλον είναι του ηλίανθου.

Ομοίως με τη προηγούμενη σύγκριση η κατανομή των περιβαλλοντικών φορτίων μεταξύ των τριών κατηγοριών (Damage Categories) δεν έχει σημαντικές διαφορές, και σε αυτή τη σύγκριση ο τομέας που επιβαρύνεται περισσότερο είναι των πόρων, από την παραγωγή λιπασμάτων και μεθανόλης (σημαντικές καταναλώσεις σε ενέργεια, βλ. και προηγούμενα).

3.2.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ ΝΤΙΖΕΛ

Στη συνέχεια συγκρίναμε τις επιβαρύνσεις μεταξύ παραγωγής ίσων ποσοτήτων βιοντίζελ από τις τρεις διαφορετικές καλλιέργειες (θεωρούμε πως η σύσταση του βιοντίζελ και στις τρεις περιπτώσεις είναι πανομοιότυπη), με τις αντίστοιχες επιβαρύνσεις με χρήση ποσοτήτων συμβατικού ντίζελ. Δυστυχώς το ενεργειακό περιεχόμενο του βιοντίζελ υστερεί συγκριτικά με το ενεργειακό περιεχόμενο συμβατικού ντίζελ. Η αναλογία της παραγόμενης ενέργειας από βιοντίζελ προς την αντίστοιχη συμβατικού ντίζελ για ίσες ποσότητες καυσίμων ποικίλει ανάλογα με τη σύσταση και τις ιδιότητες των καυσίμων. Στα πλαίσια της μελέτης θεωρήσαμε την αναλογία αυτή ίση με 0,873. Σύμφωνα με την αναλογία αυτή έγινε σύγκριση της διαδικασίας για τη παραγωγή 97,120 kg βιοντίζελ (παραγόμενη ποσότητα ανά στρέμμα καλλιέργειας ελαιοκράμβης) από κάθε καλλιέργεια, καθώς και 84,78 kg συμβατικού ντίζελ ώστε το ολικό ενεργειακό περιεχόμενο να είναι ίσο και στις τέσσερις περιπτώσεις. Το συνολικό αποτέλεσμα δίνει πως και στο κομμάτι του κύκλου ζωής μέχρι την καύση των καυσίμων, η περίπτωση των βιοκαυσίμων αποτελεί την περιβαλλοντικά φιλικότερη.

Πλην της παραγωγής βιοντίζελ από ελαιοκράμβη, οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις από τη παραγωγή ποσοτήτων βιοντίζελ με συγκεκριμένο ενεργειακό περιεχόμενο είναι λιγότερες από τις αντίστοιχες που προκαλούνται από την εξαγωγή, μεταφορά και επεξεργασία του συμβατικού ντίζελ.

3.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

Οι υπολογισμοί και σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε σύμφωνα με τη παραγόμενη ποσότητα βιοντίζελ κάθε φορά. Εντούτοις οι μετατροπές στα αρχικά σενάρια κάθε φορά έγιναν και παρουσιάζονται ανά στρέμμα καλλιέργειας. Στα στάδια σύγκρισης του λογισμικού πολλαπλασιάζεται το κάθε σενάριο με τον αντίστοιχο συντελεστή. Μετά τον πολλαπλασιασμό όλα τα σενάρια παρουσιάζουν το τελικό αποτέλεσμα από τη παραγωγή 97,120 kg βιοντίζελ. Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί στην ποσότητα βιοκαυσίμου που παράγεται ανά στρέμμα καλλιέργειας ελαιοκράμβης (πίνακας 1).

3.3.1. ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΣΤΑ ΛΙΠΑΣΜΑΤΑ

(α) ελαιοκράμβη

Στα σενάρια που ακολουθούν ορίστηκε συγκεκριμένη σύσταση λιπάσματος για τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις καθώς και λιπάσματα οργανικής σύστασης. Επομένως σε κάθε εναλλακτικό σενάριο έχουμε την ίδια ποσότητα αζώτου με σκοπό η λίπανση σε κάθε περίπτωση να έχει τα ίδια αποτελέσματα (πίνακα 2).

Οι ποσότητες λιπασμάτων στα τέσσερα πρώτα σενάρια παραμένουν οι ίδιες καθώς είναι υπολογισμένα σύμφωνα με τη συνολική τους περιεκτικότητα σε N. Στη περίπτωση της οργανικής λίπανσης γνωρίζουμε πως η σύσταση τους αποτελείται από 4% N, 6% P και 4% K

(το υπόλοιπο 86% αποτελείται από οργανικό υλικό που βοηθά στη επιπλέον βελτίωση των εδαφών). Οπότε για τη κάλυψη των αναγκών σε θρεπτικό υλικό απαιτείται η προσθήκη 575 kg ανά στρέμμα καλλιέργειας.

Πίνακας 2. Σενάρια λίπανσης

Όνομα σεναρίου	Λίπασμα που χρησιμοποιήθηκε
LCA Ελαιοκράμβη No1	Νιτρικό Αμμώνιο [NH_4NO_3]
LCA Ελαιοκράμβη No2	Θεικό Αμμώνιο [$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$]
LCA Ελαιοκράμβη No3	Νιτρικό Ασβέστιο [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$]
LCA Ελαιοκράμβη No4	Νιτρικό Κάλιο [KNO_3]
LCA Ελαιοκράμβη No5	Οργανικό λίπασμα

(β) ηλίανθος

Για την καλλιέργεια ηλίανθου απαιτούνταν 7 kg αζωτούχας λίπανσης. Για την κάλυψη των αναγκών με οργανική λίπανση απαιτείται ποσότητα 100 kg. Τα υπόλοιπα στοιχεία παραμένουν αμετάβλητα σε σχέση τη καλλιέργεια της ελαιοκράμβης.

Εδώ, όπως και προηγουμένως, τα εναλλακτικά σενάρια με το αποδοτικότερο τελικό αποτέλεσμα είναι της λίπανσης με κύριο συστατικό το θεικό αμμώνιο, σενάριο LCA Ηλίανθος (ανά παραγόμενη ποσότητα βιοντίζελ) No2 (μείωση του τελικού αποτελέσματος κατά 6,8%) είτε χρησιμοποιώντας οργανική λίπανση, σενάριο LCA Ηλίανθος (ανά παραγόμενη ποσότητα βιοντίζελ) No5 (μείωση του τελικού αποτελέσματος κατά 4,8%). Τότε το ποσοστό μείωσης δεν είναι εξίσου ικανοποιητικό με την ελαιοκράμβη, λόγω της περιορισμένης λίπανσης σύμφωνα με το αρχικό σενάριο, η οποία αποτελούσε την αιτία για το μεγαλύτερο μέρος των επιβαρύνσεων. Επίσης για τον ηλίανθο παρατηρείται πως η οργανική λίπανση δεν αποτελεί βέλτιστη λύση. Για την ελαιοκράμβη το θεικό αμμώνιο αντικαθιστά τις ποσότητες αζωτούχας λίπανση μόνο, ενώ για την κάλυψη των απαιτήσεων σε λίπανση χρησιμοποιούνται και λιπάσματα καλιούχας και φωσφορικής σύνθεσης. Αντιθέτα με τη χρήση οργανικής λίπανσης καλύπτονται οι ανάγκες αυτές μειώνοντας ακόμα περισσότερο το περιβαλλοντικό φορτίο. Για τον ηλίανθο (όπως και για τη σόγια) δεν έχουμε λιπάσματα καλιούχας και φωσφορικής σύνθεσης, επομένως η μείωση των επιπτώσεων από την αλλαγή ανόργανης σε οργανική λίπανση είναι περιορισμένες.

(γ) σόγια

Για την καλλιέργεια της σόγιας οι απαιτήσεις ήταν 4 kg αζωτούχας λίπανσης. Για τη κάλυψη των αναγκών με οργανική λίπανση απαιτείται ποσότητα 100 kg. Τα υπόλοιπα στοιχεία παραμένουν αμετάβλητα από τη καλλιέργεια της ελαιοκράμβης. Οι μειώσεις εδώ είναι παρόμοιες με του ηλίανθου καθώς τα βασικά χαρακτηριστικά παραμένουν όμοια. Στη περίπτωση αυτή όπως και προηγουμένως τα εναλλακτικά σενάρια με το αποδοτικότερο τελικό αποτέλεσμα είναι της λίπανσης με κύριο συστατικό το θεικό αμμώνιο, σενάριο LCA Σόγια (ανά παραγόμενη ποσότητα βιοντίζελ) No2 (μείωση του τελικού αποτελέσματος κατά 6%) είτε χρησιμοποιώντας οργανική λίπανση, σενάριο LCA Σόγια (ανά παραγόμενη ποσότητα βιοντίζελ) No5 (μείωση του τελικού αποτελέσματος κατά 4,5%).

3.3.2. ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ

Για τον έλεγχο της σημαντικότητας της άρδευσης στις προκαλούμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σχεδιάστηκαν δύο εναλλακτικά σενάρια μεταβάλλοντας την κατανάλωση νερού κατά 20% (αύξηση και μείωση αντίστοιχα). Οι μεταβολές στο τελικό αποτέλεσμα και στις τρεις καλλιέργειες ήταν ελάχιστες. Συμπεραίνουμε πως το περιβαλλοντικό φορτίο από την κατανάλωση νερού είναι τάξεις μικρότερο από το αντίστοιχο άλλων παραμέτρων.

3.3.3. ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΣΤΑ ΥΓΡΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Στο κύκλο ζωής των τριών καλλιεργειών τα υγρά καύσιμα χρησιμοποιούνται στα στάδια θραύσης των σπόρων και εξευγενισμού των σπορέλαιων. Με χρήση μαζούτ στα στάδια αυτά απαιτούνται 10,028 kg μαζούτ για τη θραύση 250,7kg πρώτης ύλης, ενώ στο στάδιο της ραφιναρίας καταναλώνονται 5,866kg μαζούτ για τον εξευγενισμό 97,773kg σπορέλαιων. Οι αντίστοιχες απαιτούμενες ποσότητες αν χρησιμοποιήσουμε μαζούτ, βενζίνη ή ντίζελ παρουσιάζονται στο πίνακα 3 και τα σενάρια στα οποία εισήχθησαν οι μετατροπές αυτές είναι τα σενάρια Νο 9 και Νο 10 αντίστοιχα.

Η σύγκριση των τελικών αποτελεσμάτων δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφοροποιήσεις καθώς η προέλευση του καυσίμου και η φύση του παραμένει ίδια και στις τρεις περιπτώσεις.

Πίνακας 3. Σενάρια καυσίμων ανάλυσης κύκλου ζωής για τις τρεις ενεργειακές καλλιέργειες

Σενάρια καυσίμων (kg)	Ελαιοκράμβη			Ηλίανθος			Σόγια		
	Τύπος καυσίμου	Βιομηχανία σπορελαίου	Ραφιναρία	Τύπος καυσίμου	Βιομηχανία σπορελαίου	Ραφιναρία	Τύπος καυσίμου	Βιομηχανία σπορελαίου	Ραφιναρία
LCA Νο 6	Μαζούτ	10,02	5,86	Μαζούτ	8,4	5,04	Μαζούτ	7,68	2,59
LCA Νο 7	Βενζίνη	9,57	5,62	Βενζίνη	8,06	4,83	Βενζίνη	7,37	2,49
LCA Νο 8	Ντίζελ	9,91	5,82	Ντίζελ	8,34	5	Ντίζελ	7,62	2,66

(α) ελαιοκράμβη

Με πολύ μικρή διαφορά στο τελικό αποτέλεσμα ως η βέλτιστη λύση θεωρείται το πρώτο σενάριο, στο οποίο χρησιμοποιούμε μαζούτ ως υγρό καύσιμο. Η διαφορά στο τελικό αποτέλεσμα με τα υπόλοιπα σενάρια είναι σχεδόν μηδενική και υπολογίζεται στο 0,01% συγκριτικά με το σενάριο Νο8 και στο 0,5% με το σενάριο Νο9

(β) ηλίανθος

Για τον ηλίανθο χρησιμοποιήθηκε καύσιμο τύπου μαζούτ, όπως και προηγουμένως, στο σπορελαιουργείο και στη ραφιναρία των ελαίων. Για τη θραύση 210 kg σπόρων απαιτούνται 8,40 kg μαζούτ, ενώ για τον εξευγενισμό 84 kg σπορέλαιων απαιτούνται 5,04 kg μαζούτ (πίνακας 3). Όπως και πριν οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα τελικά αποτελέσματα είναι μικρές (0,1% με το σενάριο Νο8 και 0,7% με το σενάριο Νο9) και η βέλτιστη λύση είναι η χρήση υγρού καυσίμου τύπου μαζούτ. Συγκριτικά με την καλλιέργεια της ελαιοκράμβης η αύξηση του τελικού αποτελέσματος είναι λίγο μεγαλύτερη, η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στην περιορισμένη χρήση λιπασμάτων.

(γ) σόγια

Για τη σόγια οι απαιτήσεις για τη θραύση 240 kg σπόρων είναι 7,68 kg μαζούτ, ενώ για τον εξευγενισμό 43,2 kg σπορέλαιων απαιτούνται 2,542 kg μαζούτ (πίνακας 3). Όπως και πριν οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα τελικά αποτελέσματα είναι σχετικά μικρές (0,1% με το σενάριο Νο8 και 0,9% με το σενάριο Νο9) και η βέλτιστη λύση είναι η χρήση υγρού καυσίμου τύπου μαζούτ.

3.3.4. ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

(α) ελαιοκράμβη

Τα στάδια ζωής όπου καταναλώνεται ενέργεια από το δίκτυο είναι της θραύσης του σπόρου, του εξευγενισμού των ελαίων και της μετατροπής των ελαίων σε βιοντίζελ (πίνακας 4). Όπως αναμένεται η αύξηση της συνεισφοράς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας βελτιώνει το τελικό αποτέλεσμα σε κάθε περίπτωση. Η μείωση των επιβαρύνσεων σύμφωνα με το τελικό

αποτέλεσμα κυμαίνεται από 2,2% έως 2,8%. Μικρότερη μείωση των επιβαρύνσεων προκαλεί η χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων (2,2%), ενώ βέλτιστη παρουσιάζεται η λύση της υδροηλεκτρικής ενέργειας (2,8%) με ελάχιστες διαφορές από την αιολική (2,75%).

Πίνακας 4. Σενάρια ενέργειας δικτύου

Αριθμός σεναρίου	Είδος Ενέργειας (kWh)	Σπορελαιουργείο	Ραφιναρία	Μονάδα παραγωγής
LCA Ελαιοκράμβη No9	Ενέργεια από ορυκτούς πόρους	18,80	6,55	6,37
LCA Ελαιοκράμβη No10	Ενέργεια από ορυκτούς πόρους	15,04	5,24	5,10
	Υδροηλεκτρική ενέργεια	3,76	1,31	1,27
LCA Ελαιοκράμβη No11	Ενέργεια από ορυκτούς πόρους	15,04	5,24	5,10
	Ηλιακή ενέργεια	3,76	1,31	1,27
LCA Ελαιοκράμβη No12	Ενέργεια από ορυκτούς πόρους	15,04	5,24	5,10
	Αιολική ενέργεια	3,76	1,31	1,27

(α) ηλίανθος

Για τον ηλίανθο οι διαφοροποιήσεις στα δεδομένα του κύκλου ζωής που σχετίζονται με την ενέργεια του δικτύου παρουσιάζονται στο πίνακα 5. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης είναι παρόμοια με τα προηγούμενα, και στην παραγωγή βιοντίζελ από ηλίανθο έχουμε μείωση του τελικού αποτελέσματος και στις τρεις εναλλακτικές περιπτώσεις. Βέλτιστη λύση φαίνεται πως είναι η αύξηση της χρήσης υδροηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο (4,5%) με ελάχιστες διαφορές συγκριτικά με την αιολική αυξημένη κατά 20% (4,3%), ενώ η αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας είναι μεν συμφέρουσα συγκριτικά με το αρχικό σενάριο, εντούτοις η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι η μικρότερη (4,1%).

Πίνακας 5. Σενάρια δικτύου ενέργειας

Αριθμός σεναρίου	Είδος Ενέργειας (kWh)	Σπορελαιουργείο	Ραφιναρία	Μονάδα παραγωγής
LCA Ηλίανθος No9	Ενέργεια από ορυκτούς πόρους	15,75	5,6,	5,47
LCA Ηλίανθος (ανά παραγόμενη ποσότητα βιοντίζελ) No10	Ενέργεια από ορυκτούς πόρους	12,60	4,50	4,38
	Υδροηλεκτρική ενέργεια	3,15	1,13	1,09
LCA Ηλίανθος (ανά παραγόμενη ποσότητα βιοντίζελ) No11	Ενέργεια από ορυκτούς πόρους	12,60	4,50	4,38
	Ηλιακή ενέργεια	3,15	1,13	1,09
LCA Ηλίανθος (ανά παραγόμενη ποσότητα βιοντίζελ) No12	Ενέργεια από ορυκτούς πόρους	12,60	4,50	4,38
	Αιολική ενέργεια	3,15	1,13	1,09

(β) σόγια

Για τη σόγια οι μετατροπές και οι ονομασίες των διαφόρων εναλλακτικών σεναρίων παρουσιάζονται στο πίνακα 6. Ομοίως με τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις μειώνονται τα περιβαλλοντικά φορτία σύμφωνα με τα τελικά αποτελέσματα με μεγαλύτερη μείωση από την

αυξημένη χρήση υδροηλεκτρικών (4,5%). Ακολουθεί η αιολική (4%), ενώ τα μικρότερα περιβαλλοντικά οφέλη προκύπτουν από την αυξημένη χρήση φωτοβολταϊκών (3,8%).

Πίνακας 6. Σενάρια δικτύου ενέργειας

Αριθμός σεναρίου	Είδος Ενέργειας (kWh)	Σπορελαιουργείο	Ραφιναρία	Μονάδα παραγωγής
LCA Σόγια	Ενέργεια από ορυκτούς πόρους	12	2,85	2,82
LCA Σόγια (ανά παραγόμενη ποσότητα βιοντίζελ) Νο10	Ενέργεια από ορυκτούς πόρους	9,6	2,28	2,25
	Υδροηλεκτρική ενέργεια	2,4	0,57	0,56
LCA Σόγια (ανά παραγόμενη ποσότητα βιοντίζελ) Νο11	Ενέργεια από ορυκτούς πόρους	9,6	2,28	2,25
	Ηλιακή ενέργεια	2,4	0,57	0,56
LCA Σόγια (ανά παραγόμενη ποσότητα βιοντίζελ) Νο12	Ενέργεια από ορυκτούς πόρους	9,6	2,28	2,25
	Αιολική ενέργεια	2,4	0,57	0,56

3.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ

Στη συνέχεια διαμορφώθηκε ένα σενάριο ανά καλλιέργεια χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους με τις μεγαλύτερες μειώσεις στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (πίνακας 7). Μετά, τα τελικά αποτελέσματα και στις τρεις καλλιέργειες ήταν σημαντικά μειωμένα, ενώ και για την ελαιοκράμβη στο βέλτιστο σενάριο το τελικό αποτέλεσμα είναι μικρότερο από το αντίστοιχο που προκαλείται στη περίπτωση των συμβατικών καυσίμων. Για τη ελαιοκράμβη στο νέο σενάριο μειώνεται το τελικό αποτέλεσμα κατά 19,5%. Για τη σόγια η αντίστοιχη μείωση είναι 8,2%, ενώ αντίστοιχα για τον ηλίανθο κατά 9,1%. Όσο μεγαλύτερες είναι οι απαιτήσεις της καλλιέργειας σε λίπανση τόσο ωφελούμαστε από την αντικατάσταση με οργανική λίπανση.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα βέλτιστων παραμέτρων

Όνομα σεναρίου	Τελικό αποτέλεσμα
LCA Ελαιοκράμβη	18,27
LCA Ελαιοκράμβη τελικό	14,7
LCA Σόγια (ανά παραγόμενη ποσότητα βιοντίζελ)	13,19
LCA Σόγια (ανά παραγόμενη ποσότητα βιοντίζελ) τελικό	12,11
LCA Ηλίανθος (ανά παραγόμενη ποσότητα βιοντίζελ)	9,72
LCA Ηλίανθος (ανά παραγόμενη ποσότητα βιοντίζελ) τελικό	8,83
Ντίζελ	15,81

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συγκρίνοντας τις τρεις ενεργειακές καλλιέργειες, η ελαιοκράμβη φαίνεται αποδοτικότερη σε βιοντίζελ αλλά και πιο προβληματική λόγω των μεγάλων απαιτήσεων σε λιπάσματα. Συγκρίνοντας τις επόμενες δύο καλλιέργειες για την έκτασή τους, η σόγια είναι η προτιμότερη λόγω των μειωμένων απαιτήσεων σε μεθανόλη. Ως προς την ποσότητα του βιοντίζελ τα αποτελέσματα διαφέρουν λόγω των απαιτήσεων σε λιπάσματα, μεθανόλη και ενέργεια ανά όγκο παραγόμενου βιοντίζελ. Αυτό είναι αναμενόμενο, γιατί οι μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις προκαλούνται από την κατανάλωση ορυκτών υλών και

φυτοφαρμάκων. Καταλήγουμε λοιπόν ότι η παραγωγή βιοντίζελ από ηλίανθο είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον.

Για τα αποτελέσματα με βάση τις επιπτώσεις πρώτος έρχεται ο τομέας των ορυκτών πρώτων υλών για τις ενεργειακές απαιτήσεις σε όλη τη διαδικασία. Επιπλέον, σημαντικές επιδράσεις υπάρχουν και από τις εκπομπές σωματιδίων και ουσιών, οι οποίες είναι βλαβερές στην υγεία και κυρίως στο αναπνευστικό σύστημα. Συγκρινόμενο με το συμβατικό ντίζελ, μόνο η παραγωγή βιοντίζελ από ελαιοκράμβη επιβαρύνει περισσότερο το περιβάλλον. Γενικά, η συνολική εικόνα είναι θετική γιατί η καλλιέργεια σόγιας και ειδικότερα του ηλίανθου έχει τη μικρότερη επιβάρυνση σε ότι αφορά στις εκπομπές από καύση ορυκτών καυσίμων.

Συγκρίνοντας τα εναλλακτικά σενάρια με το αρχικό, παρατηρείται ότι με τη χρήση οργανικών λιπασμάτων στην ελαιοκράμβη ή του θεικού αμμωνίου στις άλλες καλλιέργειες, οι επιβαρύνσεις μειώνονται σημαντικά ενώ σημαντική μείωση επιτυγχάνεται και με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Εν κατακλείδι, η καλλιέργεια ηλίανθου για την παραγωγή βιοντίζελ είναι η βέλτιστη λύση, διότι συνδυάζει με τον καλύτερο τρόπο τον όγκο παραγωγής με τις αντίστοιχες επιπτώσεις.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. European Biodiesel Board, “Biodiesel and Oilseeds”, <http://www.ebb-eu.org/EBBpress.php>, pages 1-2, 2007.
2. G. Knothe, J. V. Gerpen, J. Krahl, “The Biodiesel Handbook”, ACS, 2005.
3. G. Knothe, S. A. Sharp, T. W. Ryan, “Energy & Fuels”, ACS publications, 2006.
4. FAO Regional office for Europe, “Renewable Energy, Potential energy crops for Europe and the Mediterranean region”, FAO/FAL, 2006.
5. Μ. Χρήστου, Ε. Αλεξοπούλου, Β. Λυχναράς, Ε. Νάματοβ, “Ενεργειακές καλλιέργειες στον ευρωπαϊκό και ελληνικό χώρο”, Εκδόσεις ΚΑΠΕ, 2004.
6. Κ. Κίττας, “Βιοκαύσιμα και Ενεργειακές Καλλιέργειες”, 2^ο Πανελλήνιο συνέδριο βιοκαυσίμων, 2007.
7. SETAC –Society for Environmental Toxicology and Chemistry, A Technical Framework for LCA, Washington D.C., 1991.
8. M.A. Curran, 1996, “Environmental Life Cycle Assessment”, McGraw-Hill Professional Publishing, 1 July 1996.
9. J. B. Guinée, “Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards”, Kluwer Academic Publishers, 2004.
10. Β. Καλοϊδης, Ν. Μπαράκος, Σ. Πασιάς, Ν. Παπαγιαννάκος, “Αναπτυξη Πιλοτικής Μονάδας Παραγωγής Βιοντίζελ”, 2^ο Πανελλήνιο συνέδριο βιοκαυσίμων, 2007.
11. J. Tickell, 2003, “From the Fryer to the Fuel Tank”, Tickell Energy Consultants
12. T. Tsoutsos, V. Kouloumpis, T. Zafeiris “Life Cycle Assessment for Biodiesel under the Greek climate conditions”, Environmental Science and Technology, submitted
13. T. Tsoutsos, V. Kouloumpis, T. Zafeiris, P. Zolkou, “Life Cycle Assessment for Biodiesel under the Greek climate conditions”, 16th European Biomass Conference & Exhibition, Valencia, 02-06 June 2008.

ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΑ ΑΓΡΟ-ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

Κανταρέλης Ε., Σκουλού Β., Ζαμπανιώτου Α.

Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,
541 24 Θεσσαλονίκη, e-mail: sonia@cheng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αεριοποίηση αγρο-βιομηχανικής βιομάζας και υπολειμμάτων ενεργειακών καλλιεργειών στην πηγή παραγωγής της, σε μικρές κινητές μονάδες δίνει τη δυνατότητα παραγωγής αερίου καυσίμου το οποίο εν συνεχεία μπορεί να αξιοποιηθεί ενεργειακά για να καλύψει τις εποχικές ανάγκες αύξησης της κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος. Η περαιτέρω ενεργειακή αξιοποίηση του αερίου αεριοποίησης επιτυγχάνεται με την τροφοδοσία του σε καυστήρες, μηχανές εσωτερικής καύσης και, τελευταία, σε κελία καυσίμου για την παραγωγή θερμότητας ή/ και ηλεκτρισμού. Η βιωσιμότητα όμως της διεργασίας, που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό με την αυξημένη απόδοση, εξαρτάται από την ποιότητα του παραγόμενου αερίου, ενώ η αξιοποίηση στην πηγή ενός μηδαμινού κόστους αγρο-βιομηχανικού υπολείμματος, καθώς και των υπολειμμάτων των ενεργειακών καλλιεργειών, μπορεί να συμβάλει στην οικονομικότητα της διεργασίας.

Για την αεριοποίηση υπολειμμάτων αγρο-βιομηχανικής βιομάζας με σκοπό την παραγωγή ενέργειας, πραγματοποιήθηκαν πειράματα τόσο σε εργαστηριακής κλίμακας, όσο και σε προ-πιλοτικής (bench scale) κλίμακας αντιδραστήρες αεριοποίησης. Συγκεκριμένα η αεριοποίησης των υπολειμμάτων ενεργειακών καλλιεργειών (σόγια, ελαιοκράμβη, ηλίανθος και βαμβάκι) πραγματοποιήθηκε σε εργαστηριακό αντιδραστήρα σταθερής κλίνης, ενώ επιπλέον κατασκευάστηκε συναρμολογούμενη μονάδα, ρευστοποιημένης κλίνης προ-πιλοτικής κλίμακας της τάξης των 5KW_{th} , με σκοπό την αεριοποίηση ελαιοπυρηνόξυλου.

1. ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ

1.1. Υπολείμματα ενεργειακών καλλιεργειών

Η επιλογή για την μελέτη των συγκεκριμένων ενεργειακών καλλιεργειών βασίστηκε στην προηγούμενη, σε πειραματικό στάδιο, εμπειρία από την καλλιέργεια των φυτών αυτών και τα θετικά αποτελέσματα που εξήχθησαν όσον αφορά την αξιοποίησή τους για ενεργειακούς σκοπούς, όπως επίσης και την αναμενόμενη καλή προσαρμογή τους στον Ελλαδικό χώρο [1]. Το βαμβάκι και ο ηλίανθος, ιδιαίτερα, αποτελούν ήδη βασικές καλλιέργειες στην Ελλάδα με πολύ καλή προσαρμογή στο βόρειο ανατολικό μέρος της χώρας και μέχρι σήμερα καλλιεργούνται σχεδόν αποκλειστικά με σκοπό την εξαγωγή βαμβακιού και φυτικού ελαίου διατροφής αντίστοιχα. Η ελαιοκράμβη, από την άλλη, αποτελεί ένα από τα πιο πλούσια σε έλαια φυτό, μετά την σόγια, και παρουσιάζει πολύ καλή προσαρμοστικότητα στο κλίμα της Ελλάδος και γενικότερα τις εδαφολογικές συνθήκες [1].

1.2. Ελαιοπυρηνόξυλο

Το ελαιοπυρηνόξυλο αποτελεί ένα από τα χαρακτηριστικότερα υπολείμματα της αγροβιομηχανικής δραστηριότητας στην Ελλάδα και τις υπόλοιπες μεσογειακές χώρες. Η υγρή ελαιο-

πυρήνα (με περιεχόμενη υγρασία της τάξης του 50%), οδηγείται από τα ελαιοτριβεία στα πυρηνελαιουργεία όπου εκεί διαχωρίζεται το ελαιοπυρηνόξυλο από την υπολειμματική -από το προηγούμενο στάδιο- σάρκα και υπόκεινται σε περαιτέρω επεξεργασία για την παραγωγή πυρηνελαίου [2].

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υπολειμμάτων ενεργειακών καλλιεργειών και ελαιοπυρηνόξυλου παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1**.

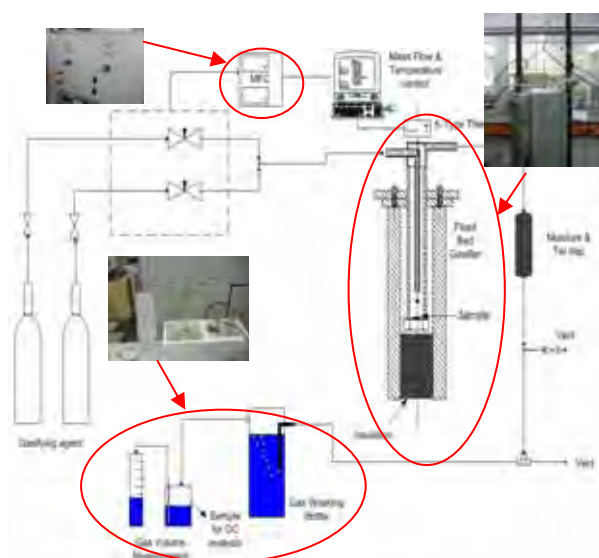
Πίνακας 1. Στοιχειακή ανάλυση υπολειμμάτων ενεργειακών καλλιεργειών και αγροβιομηχανίας					
Υπόλειμμα	Ελαιοκράμβη	Σόγια	Ηλίανθος	Βαμβάκι	Ελαιοπυρηνόξυλο
Στοιχειακή ανάλυση (%κ.β., επί ξηρού)					
C	44,52	43,59	42,60	44,29	48,59
H	5,53	5,6	5,47	5,57	5,73
O	49,37	50,46	51,74	49,4	44,11
N	0,58	0,35	0,19	0,74	1,57
HHV (Kcal/kg)	5.553,3	6.125,8	5.375,5	5.547,6	5.955,3
LHV (Kcal/kg)	5.269,5	5.982,8	5.094,7	5.261,8	5.661,5

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

2.1. Εργαστηριακής κλίμακας αντιδραστήρας σταθερής κλίνης

Τα πειράματα αεριοποίησης πραγματοποιήθηκαν, καταρχήν, σε εργαστηριακό αντιδραστήρα σταθερής κλίνης και με τροφοδοσία υπολείμματα ενεργειακών καλλιεργειών. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων της αεριοποίησης φαίνεται αναλυτικά στο **Σχήμα 1**.

Αναλυτικά η πειραματική διάταξη αεριοποίησης υπολειμμάτων αγροτικών καλλιεργειών αποτελείται από τα εξής μέρη: 1) Την φιάλη αέρα 2) Τον ρυθμιστή ροής αέρα 3) Το σύστημα ελέγχου ανάλυσης πειραματικών δεδομένων 4) Τον ηλεκτρικό φούρνο θέρμανσης 5) Τον αντιδραστήρα αεριοποίησης σταθερής κλίνης 6) Την παγίδα υγρασίας 7) Το δοχείο καθαρισμού αερίου 8) Το δοχείο εκτόπισης νερού – ογκομέτρησης [3]

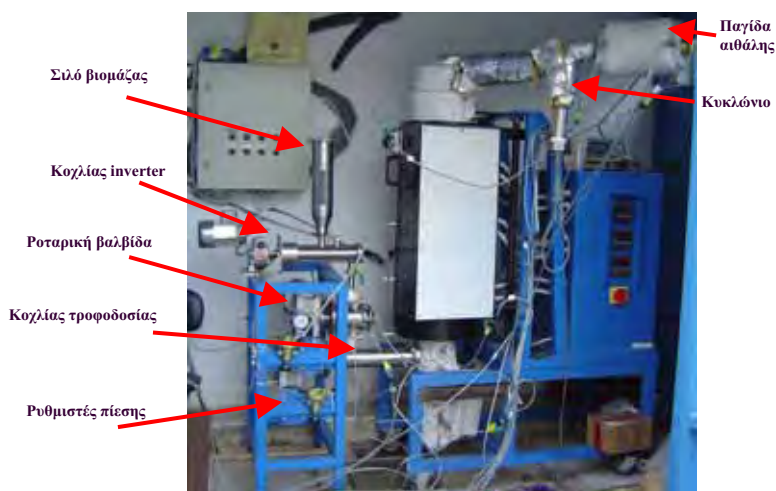


Σχήμα 1. Εργαστηριακή πειραματική διάταξη αεριοποίησης υπολειμμάτων ενεργειακών καλλιεργειών σε σταθερή κλίνη.

2.2. Προ-πilotικής κλίμακας αντιδραστήρας ρευστοστερεάς κλίνης

Για την πειραματική διερεύνηση της διεργασίας της αεριοποίησης της βιομάζας σε αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης και την παραγωγή καυσίμου αερίου για καθαρισμό και ενεργειακή αξιοποίηση σε MEK, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε πιλοτικής κλίμακας διάταξη αεριοποίησης βιομάζας θερμικής ισχύος 5kW_{th} . Η bench scale διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 2.

Αναλυτικά η bench scale διάταξη αεριοποίησης υπολειμμάτων αγροτικών καλλιεργειών αποτελείται από τα εξής μέρη: (1) το σιλό τροφοδοσίας, (2) κοχλίας ρύθμισης (μέσω inverter) τροφοδοσίας βιομάζας, (3) ροταρική βαλβίδα, (4) αερόψυκτος κοχλίας τροφοδοσίας αντιδραστήρα, (5) αεροφυλάκιο, (6) ρυθμιστές πίεσης αέρα 0-1 bar, (7) ροόμετρο παροχής αέρα, (8) βάνες απομόνωσης, (9) ηλεκτρική αντίσταση προθέρμανσης αέρα 1500W, (10) Αντιδραστήρας ρευστοστερεάς κλίνης (11) ηλεκτρικός φούρνος 9000W (12) φυγοκεντρικό κυκλώνιο (13) τμήμα καθαρισμού παραγόμενου αερίου[4].



Σχήμα 2. Προ-πilotική πειραματική διάταξη αεριοποίησης ελαιοπυρηνόξυλου σε ρευστοστερεά κλίνη.

3. ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΔΥΝΑΜΗ ΑΕΡΙΟΥ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ

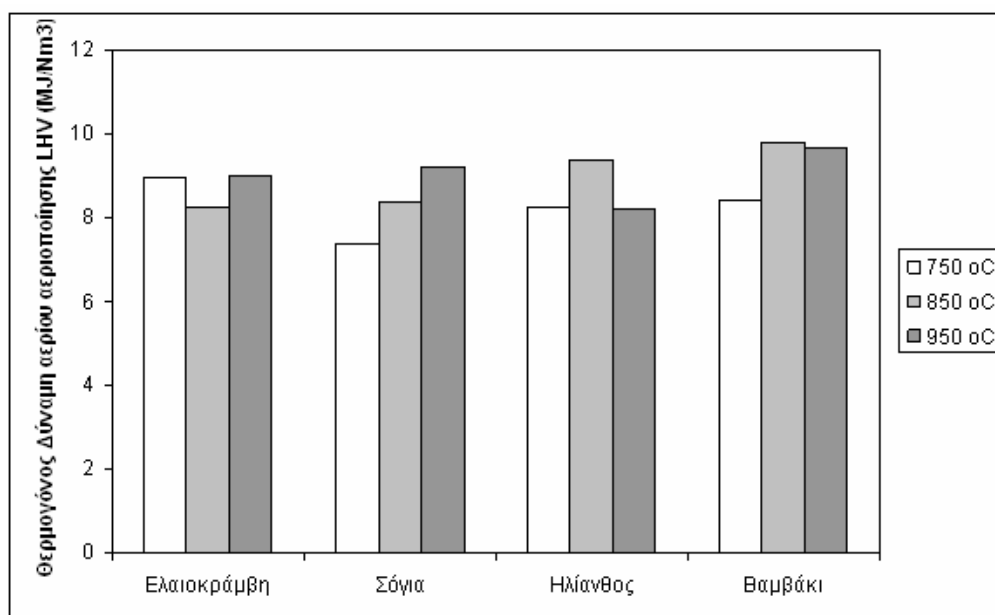
Στα προς μελέτη δείγματα ενεργειακών καλλιεργειών και ελαιοπυρηνόξυλου πραγματοποιήθηκαν πειράματα αεριοποίησης σε διαφορετικές θερμοκρασίες σε μια προσπάθεια αξιολόγησης της επίδρασης του παράγοντα της θερμοκρασίας στο παραγόμενο αέριο και συγκεκριμένα στην θερμογόνο δύναμη του. Η θερμοκρασία των αντιδραστήρων κυμάνθηκε μεταξύ 750 και $950\text{ }^{\circ}\text{C}$, και σε σταθερό περιβάλλον οξειδωτικών συνθηκών.

Από την σύσταση του αερίου αεριοποίησης και των τεσσάρων δειγμάτων υπολειμμάτων ενεργειακών καλλιεργειών και ελαιοπυρηνόξυλου υπολογίσθηκε η θερμιδική αξία του παραγόμενου αερίου (Σχήμα 3).

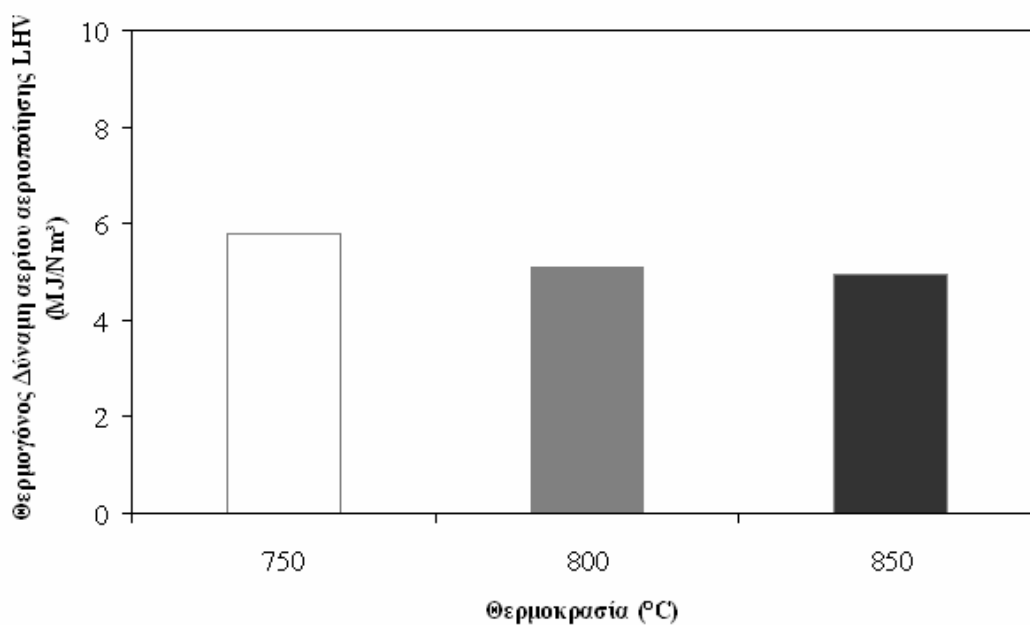
Η κατωτέρα θερμογόνο δύναμη των αερίων αεριοποίησης που προέκυψαν από τα υπολείμματα ενεργειακών καλλιεργειών μπορούν να χαρακτηριστούν ως αέρια μέσης θερμογόνου δύναμης ($8\text{--}10\text{ MJ/Nm}^3$), παρουσιάζοντας τα καλύτερα αποτελέσματα για την ελαιοκράμβη και σόγια στους 950°C , ενώ σε χαμηλότερη θερμοκρασία τα υπολείμματα από ηλιάνθο και βαμβάκι πλεονεκτούν σε θερμικό περιεχόμενο του παραγόμενου αερίου τους.

Η μεταβολή της θερμογόνου δύναμης του αερίου αεριοποίησης που προέκυψε από την αξιοποίηση του ελαιοπυρηνόξυλου, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4. Αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση της θερμογόνου δύναμης χωρίς παρόλα αυτά

να την επηρεάζει έντονα, μια και προάγει την θερμική διάσπαση υδρογονανθράκων που συνεισφέρουν στην θερμογόνο δύναμη αερίου αεριοποίησης.



Σχήμα 3. Θερμογόνος δύναμη αερίου από την αεριοποίηση υπολειμμάτων ενεργειακών καλλιεργειών.



Σχήμα 4. Θερμογόνος δύναμη αερίου από την αεριοποίηση ελαιοπυρηνόξυλου.

4. ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Οι προοπτικές αξιοποίησης της βιομάζας σε τοπικό επίπεδο αποτελεί μια εναλλακτική λύση στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών νησιωτικών και απομακρυσμένων περιοχών από τα κεντρικά δίκτυα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την τοπική παραγωγή υπολειμμάτων αγροτικών καλλιεργειών (π.χ. ελαιοπυρηνόξυλο για τα νησιά, υπολείμματα βαμβακιού στις πεδινές περιοχές, ελαιοκράμβης στην Β. Ελλάδα κτλ) δίνει το έναυσμα για την κατασκευή μικρών κινητών μονάδων θερμοχημικής αξιοποίησης της βιομάζας, με σκοπό την αξιοποίηση, επί τόπου, του θερμικού περιεχομένου των ουσιαστικά άνευ αξίας υπολειμμάτων ενεργειακών καλλιεργειών και άλλων γεωργικών ειδών, έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του κόστους που αφορά στην μεταφορά και αποθήκευση τους. Το κέρδος δε από την αξιοποίηση των υπολειμμάτων αυτών σε ΤΠΠ θα μπορούσε να ανέλθει στις ~ 900.000 ΤΠΠ, καλύπτοντας τμήμα των ενεργειακών αναγκών των περιοχών παραγωγής τους με φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο.

Πίνακας 2. Ενεργειακό δυναμικό υπολειμμάτων ενεργειακών καλλιεργειών και αγροβιομηχανίας (έτος 2007)			
Υπολείμματα καλλιεργειών	Υπολείμματα καλλιεργειών (τόνοι/ έτος)[1]	Θερμογόνος Δύναμη (kcal/kg)	ΤΠΠ
Ελαιοκράμβη	5.000	5.269,5	2.635
Σόγια	900	5.982,8	538
Ηλίανθος	120.000	5.094,7	61.136
Βαμβάκι	1.160.000	5.261,8	610.361
Υπόλειμμα αγρο-βιομηχανίας			
Ελαιοπυρηνόξυλο	400.000	5.661,5	226.460
Συνολική ποσότητα Τόνων Ισοδύναμου Πετρελαίου (ΤΠΠ)			901.131

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το διαθέσιμο ενεργειακό δυναμικό υπολειμμάτων ενεργειακών καλλιεργειών, αλλά και χαρακτηριστικών καλλιεργειών στην Ελλάδα (ελαιοπυρηνόξυλο, βαμβάκι), την σύσταση και τη θερμογόνο δύναμη τους.

Τα υπολείμματα αυτά παρουσιάζουν ελκυστικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά που επιτρέπουν την αξιοποίηση τους μέσω της θερμοχημικής οδού. Η αεριοποίηση δε των υπολειμμάτων αυτών οδηγεί στην παραγωγή αερίων αεριοποίησης μέσης θερμογόνου δύναμης που μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω σε μηχανές εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ενέργειας.

Η ενεργειακή δε αξιοποίηση των υπολειμμάτων αυτών στην Ελλάδα μπορεί επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα μεταξύ των οποίων:

- Την αξιοποίηση και ελαχιστοποίηση των υπολειμμάτων αγροτικών καλλιεργειών, που προκύπτουν από τις αγροτικές δραστηριότητες και συντελούν στην επιδείνωση των περιβαλλοντικών προβλημάτων που επιφέρει η συνήθης τακτική διαχείρισης τους από τους αγρότες (καύση στους αγρούς)

- Την ανάκτηση του ενεργειακού περιεχομένου τους και την αξιοποίηση με αυτόν τον τρόπο μιας ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, αποφεύγοντας τον ανταγωνισμό με την τροφική αλυσίδα
- Την άμεση αντικατάσταση ισοδύναμων ποσοτήτων ορυκτών καυσίμων(πετρελαίου) με ότι περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη συνεπάγεται αυτό
- Την τόνωση της αγροτικής δραστηριότητας, καθώς προκύπτει ένα άμεσο οικονομικό όφελος από την αξιοποίηση και όχι ενεργειακή υποβάθμιση των ποσοτήτων αυτών βιομάζας.

Από την άλλη η επί τόπου ενεργειακή αξιοποίηση των υπολειμμάτων αγροτικών καλλιεργειών, σε μικρές κινητές μονάδες θερμοχημικής μετατροπής της βιομάζας, συνεισφέρει στην αποκεντρωμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, αποφορτίζοντας το κεντρικό σύστημα / δίκτυο παραγωγής και χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας, επιφέρει ενεργειακή αυτοδυναμία, καθώς γίνεται δυνατή η χρήση βιομάζας σε τοπικό επίπεδο και μικρές κινητές μονάδες παραγωγής ενέργειας.

Ιδιαίτερα, για την περαιτέρω αξιοποίηση των υπολειμμάτων ενεργειακών καλλιεργειών, τα οποία αντιμετωπίζονται πλέον σαν στερεά βιοοκαύσιμα και όχι ανεπιθύμητα υπολείμματα, προτείνεται η συστηματικότερη χρήση των υπολειμμάτων ενεργειακών και συμβατικών καλλιεργειών σε ημι-βιομηχανικής και βιομηχανικής κλίμακας αντιδραστήρες τόσο αεριοποίησης, όσο και πυρόλυσης με σκοπό τη μελέτη της δυνατότητας αξιοποίησης του στερεού υπολείμματος της πυρόλυσης για την παραγωγή βιολυκών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Τμήμα του έργου χρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Κοινοτικό Ταμείο (ΕΚΤ), το Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΥΠΙΑΝ-ΓΓΕΤ), και την εταιρία ‘Ν. ΑΧ. ΦΙΛΙΠΠΟΠΟΥΛΟΣ (ΕΔΕ Η-Μ)’ στα πλαίσια του προγράμματος ΠΕ-ΝΕΔ2003 και το το ΥΠΙΑΝ - ΓΓΕΤ, και την εταιρία ‘Pioneer Hi-Bred Hellas A.E.’ στα πλαίσια του προγράμματος ΠΑΒΕΤ2005.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Pioneer Hi Bred Hellas A.E.
- [2] Vamvouka D, Zografos D. Predicting the behavior of ash from agricultural wastes during combustion, Fuel 2004; 83(14,15): 295-304
- [3] A.Zabaniotou, V.Skoulou, G.Stauroopoulos, G.Sakellaropoulos, Syngas production from olive tree cuttings and olive kernels in a downdraft fixed bed gasifier, International Journal of Hydrogen Energy 2008; 33(4) 1185-1194
- [4] A.Zabaniotou, **V.Skoulou**, G.Koufodimos, Z.Samaras. Conceptual design and preliminary hydrodynamic study of an Agro Biomass Bench scale gasification fluidized bed reactor. International Journal of Chemical Reactor Engineering 2008;6: 1-17, <http://www.bepress.com/ijcre/vol6/A14>

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΟΞΥΛΟΥ – ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗ- ΤΑ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

*Γ. Κουφοδήμος¹, Β. Σκουλού², Δ. Μερτζής¹, Ε. Κανταρέλης²,
Α. Ζαμπανιώτου², Ζ. Σαμαράς¹*

¹Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,

²Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 540 06

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνολογία της αεριοποίησης δίνει τη δυνατότητα παραγωγής αερίου καυσίμου από βιομάζα, το οποίο εν συνεχεία μπορεί είτε να αξιοποιηθεί ενεργειακά, είτε να χρησιμοποιηθεί ως μέσο για την παραγωγή προϊόντων προστιθέμενης αξίας. Η ενεργειακή αξιοποίηση επιτυγχάνεται μέσω διαφόρων εφαρμογών όπως η απευθείας διαχείριση σε θαλάμους καύσης, η χρήση σε μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) και η τροφοδοσία σε κελιά καυσίμου για την παραγωγή θερμότητας ή/και ηλεκτρισμού. Η απόδοση και η βιωσιμότητα εφαρμογών αεριοποίησης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του παραγόμενου αερίου όσον αφορά το ενεργειακό του περιεχόμενο, και το ρυπαντικό του φορτίο. Καθοριστικός παράγοντας επίτευξης βελτιστοποιημένης ποιότητας αερίου, είναι οι επικρατούσες στον αντιδραστήρα συνθήκες της διεργασίας.

Για την πειραματική διερεύνηση της αεριοποίησης βιομάζας σε αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης και την παραγωγή καυσίμου αερίου για ενεργειακή αξιοποίηση σε ΜΕΚ, κατασκευάστηκε μονάδα πιλοτικής κλίμακας. Ως μέσο ρευστοαίωρησης χρησιμοποιήθηκε ατμοσφαιρικός αέρας και ως καύσιμη ύλη πυρηνόξυλο ελιάς. Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές λειτουργίες με διαφορετικές αναλογίες αέρα καυσίμου σε θερμοκρασίες μεταξύ 750 – 900°C. Στην εργασία παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη, και αναλύεται η επίδραση κρίσιμων συνθηκών της διεργασίας στην ποιότητα του παραγόμενου αερίου. Τέλος, γίνεται σύγκριση της σύστασης του παραγόμενου αερίου με την ιδανική σύσταση ισορροπίας όπως προσδιορίστηκε από μαθηματικό μοντέλο με χρήση λογισμικού.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αεριοποίηση είναι διεργασία θερμοχημικής μετατροπής υγρών ή στερεών καυσίμων σε καύσιμο αέριο [1]. Στις περιπτώσεις χρήσης βιομάζας, η διεργασία πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες 750 – 1000°C, υπό την παρουσία οξειδωτικού μέσου (συνήθως αέρας, ατμός, ή/και καθαρό οξυγόνο) σε ποσότητα μικρότερης της στοιχειομετρικά απαιτούμενης για την πλήρη καύση του καυσίμου [2]. Ως αποτέλεσμα είναι η μερική οξείδωση του καυσίμου και η θερμική διάσπαση της υπόλοιπης ποσότητας οδηγώντας στην παραγωγή προϊόντων στερεής (εξανθράκωμα και τέφρα) και αέριας φάσης (πίσσα, σωματίδια και προϊόντα τέλειας και ατελούς καύσης, όπως CO₂, CO, H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, H₂O και N₂ στην περίπτωση χρήσης αέρα ως μέσο οξείδωσης). Το ποσοστό αυτών των συστατικών στο αέριο καθορίζει το ενεργειακό περιεχόμενό του και εξαρτάται από τις συνθήκες της διεργασίας όπως η θερμοκρασία, ο λόγος αέρα ΕΡ και ο χρόνος παραμονής του αερίου σε υψηλή θερμοκρασία. Στις περιπτώσεις

χρήσης ατμοσφαιρικού αέρα ως μέσο οξείδωσης – ρευστοαιώρησης η θερμογόνος δύναμη του αερίου κυμαίνεται μεταξύ 4 και 6 MJ / Nm³ [2]. Στόχος είναι ο καθορισμός των συνθηκών αεριοποίησης για μεγιστοποίηση της θερμογόνου δύναμης αερίου. Επιπλέον μεγέθη αξιολόγησης είναι η απώλεια άνθρακα και ο βαθμός μετατροπής καυσίμου.

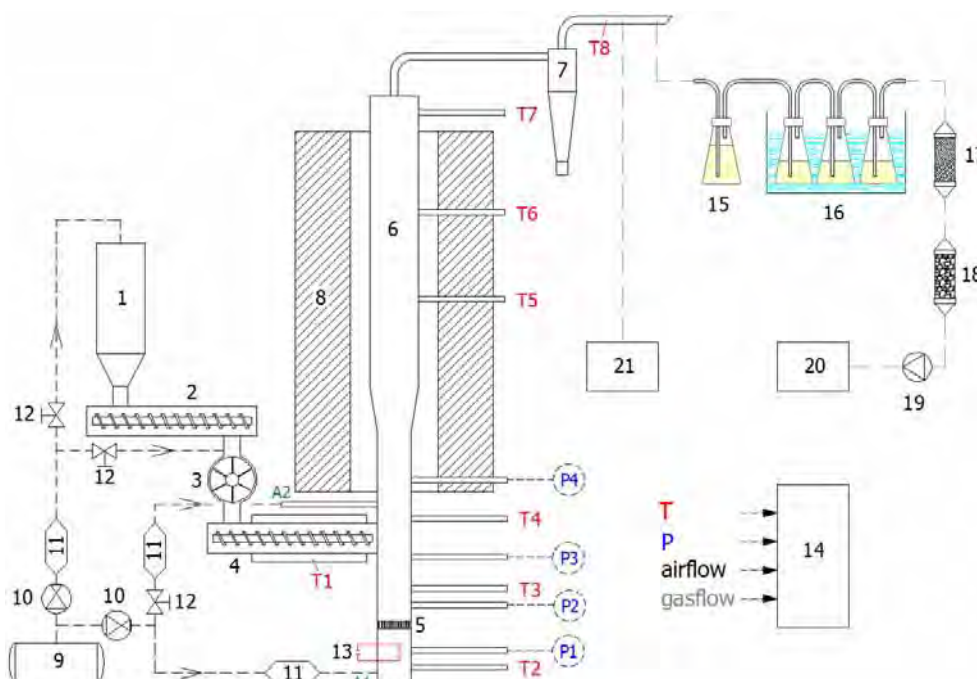
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Για την πειραματική διερεύνηση της αεριοποίησης βιομάζας σε αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης εγκαταστάθηκε πιλοτικής κλίμακας διάταξη θερμικής ισχύος 5 kW. Ως καύσιμη ύλη επελέγη το πυρηνόξυλο ελιάς, του οποίου τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά πυρηνόξυλου ελιάς [3]			
Φυσικά χαρακτηριστικά		Χημική σύσταση	
Ανώτερη θερμογόνος δύναμη ¹ [kJ/kg]	20.962	Άνθρακας, C [% κ.β.]	48,59
Υγρασία ² [% κ.β.]	12,3	Υδρογόνο, H [% κ.β.]	5,73
Τέφρα ² [% κ.β.]	1,9	Οξυγόνο, O [% κ.β.]	44,06
Καύσιμη ύλη ² [% κ.β.]	85,8	Άζωτο, N [% κ.β.]	1,57
¹ σε ξηρή βάση, ² σε υγρή βάση		Θείο, S [% κ.β.]	0,05

Η συνολική διάταξη (Εικόνα 1) αποτελείται από τα επιμέρους τμήματα:

- Τμήμα ρύθμισης τροφοδοσίας και προετοιμασίας βιομάζας αέρα (1-13),
- αντιδραστήρας αεριοποίησης και τμήμα καθαρισμού παραγόμενου αερίου (5-8),
- Εξοπλισμός δειγματοληψίας και μέτρησης σύστασης παραγόμενου αερίου (15-21)
- Τμήμα καταγραφής και ελέγχου συνθηκών διεργασίας (14, T1 έως T8, P1 έως P4),



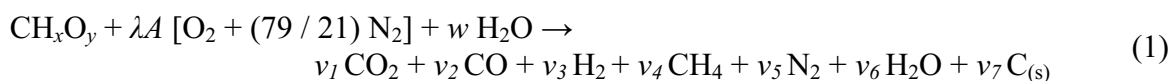
Εικόνα 1: Εργαστηριακή διάταξη αεριοποίησης

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το μαθηματικό μοντέλο της διεργασίας δημιουργήθηκε με σκοπό τον προσδιορισμό της απόδοσης της διάταξης αεριοποίησης. Η σύγκριση της θεωρητικής με την πειραματική διεργασία δείχνει τη μέγιστη θερμογόνο δύναμη και μετατροπή καυσίμου που μπορεί να επιτευχθεί. Οι παραδοχές που έγιναν κατά την κατάστρωση του μοντέλου είναι οι εξής:

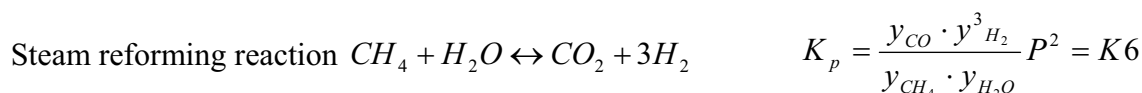
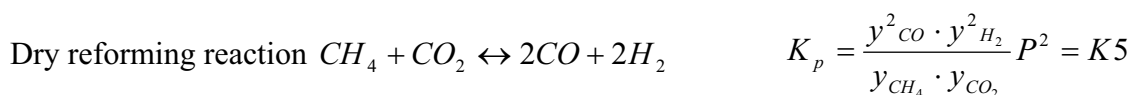
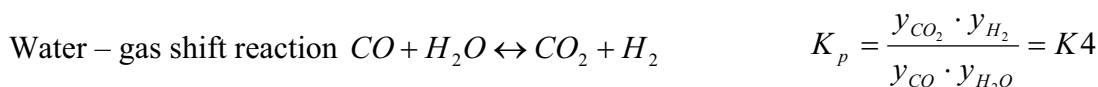
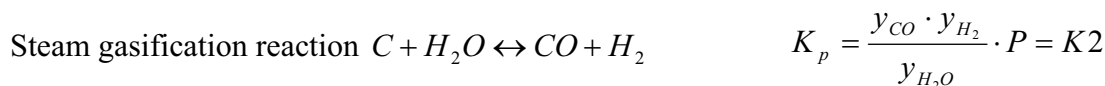
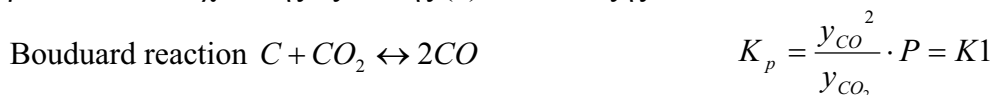
- 1) ως προϊόντα της διεργασίας λαμβάνονται τα CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , H_2O , N_2 , C(s) και δε συμπεριλαμβάνονται άλλα συστατικά όπως C_2H_4 , C_2H_6 , NO_x , O_2 , πίσσα κλπ,
- 2) η διεργασία είναι ισοθερμοκρασιακή και μελετάται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας (ανεξάρτητη του χρόνου),
- 3) το στερεό καύσιμο αποτελείται μόνο από άνθρακα, υδρογόνο, οξυγόνο και υγρασία.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η γενική χημική εξίσωση αεριοποίησης βιομάζας έχει τη μορφή:



Όπου x, y οι μοριακές αναλογίες H/C και O/C αντίστοιχα και w η υγρασία του καυσίμου.

Σύμφωνα με την τελευταία παραδοχή ο χημικός τύπος του πυρηνόξυλου που εισάγεται στην εξίσωση (1) είναι $\text{CH}_{1,78}\text{O}_{0,58}$. Η υγρασία υπολογίστηκε σε $0,101 \text{ mol} / \text{mol}_{\text{biomass}}$. Με A συμβολίζεται η στοιχειομετρική ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για πλήρη καύση και ισούται με $0,522 \text{ mol}_{\text{O}_2} / \text{mol}_{\text{biomass}}$. Οι συντελεστές ν_1 έως ν_7 αποτελούν τις μεταβλητές του μοντέλου και για τον υπολογισμό τους απαιτούνται 7 εξισώσεις. Τέσσερις εξισώσεις προκύπτουν από τα ισοζύγια μάζας των στοιχείων C , H , O , N , ενώ οι υπόλοιπες τρεις προκύπτουν από τη χημική ισορροπία. Οι αντιδράσεις ισορροπίας που λαμβάνουν χώρα κατά την αεριοποίηση και περιλαμβάνουν τα στοιχεία της εξίσωσης (1) είναι οι εξής:



Όπου $y_i = \nu_i / \nu_{\text{tot}}$.

Από τις έξι εξισώσεις επιλέχθηκε η αντίδραση Bouduard, η αντίδραση υδραερίου (water – gas shift reaction) και η αντίδραση ξηρής αναμόρφωσης (dry reforming reaction). Επίσης, εισάγεται με τις εξισώσεις ισορροπίας ένας επιπλέον άγνωστος (ν_{tot}) ο οποίος δηλώνει τα ολικά moles στα προϊόντα. Συνολικά δημιουργήθηκε ένα σύστημα 8 εξισώσεων με 8 αγνώστους. Το σύστημα είναι το εξής:

$$\text{Ισοζύγια μάζας:} \quad \text{C:} \quad v_1 + v_2 + v_4 + v_7 = 1 \quad (2)$$

$$\text{H:} \quad 2 v_3 + 4v_4 + 2v_6 = 1,78 + 2w \quad (3)$$

$$\text{O:} \quad 2 v_1 + v_2 + v_6 = 0,58 + 2\lambda A + w \quad (4)$$

$$\text{N:} \quad v_5 = (79 / 21) \lambda A \quad (5)$$

$$v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5 + v_6 + v_7 = v_{tot} \quad (6)$$

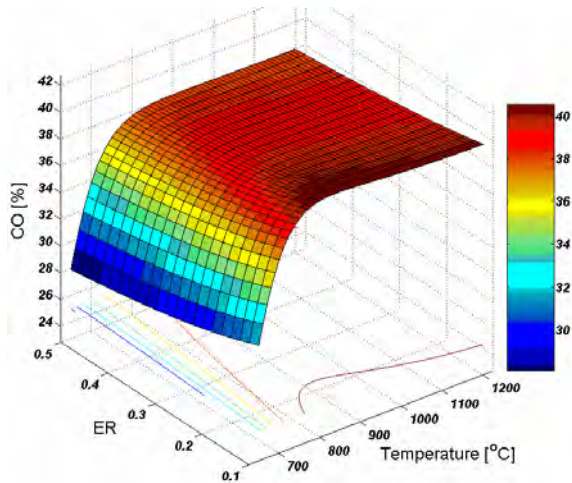
$$\text{Εξισώσεις ισορροπίας:} \quad \frac{v_2^2}{v_1 \cdot v_{tot}} \cdot P = K1 \quad (7)$$

$$\frac{v_2^2 \cdot v_3^2}{v_4 \cdot v_1 \cdot v_{tot}^2} P^2 = K5 \quad (8)$$

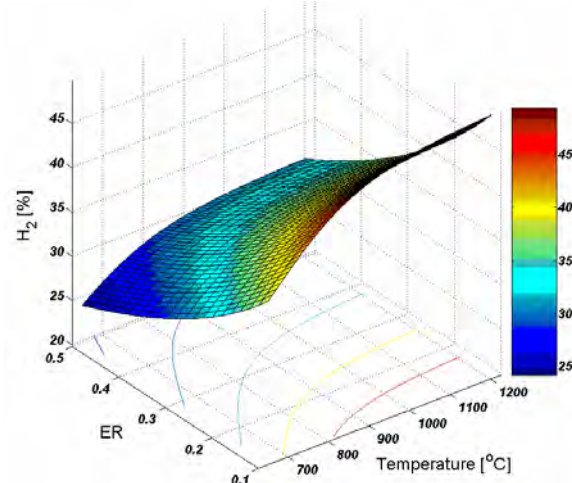
$$\frac{v_1 \cdot v_3}{v_2 \cdot v_6} = K4 \quad (9)$$

Με τη χρήση του λογισμικού MATLAB υπολογίστηκε η σύσταση ισορροπίας για ER 0,1 – 0,5 και θερμοκρασίες 650 – 1200°C.

Στις Εικόνες 2 – 5 δίνεται το μοριακό κλάσμα των καυσίμων συστατικών του αερίου καθώς επίσης και η θερμογόνο δύναμη (ΘΔ) σε σχέση με το ER και τη θερμοκρασία. Το CO (Εικόνα 2) κυμαίνεται από 28 % (ER = 0,5 και T = 650°C) μέχρι 40 % (ER = 0,1 και T = 850°C). Ραγδαία αύξηση παρουσιάζεται σε χαμηλές θερμοκρασίες μέχρι τους 850°C όπου επέρχεται σταθεροποίηση του. Το H₂ (Εικόνα 3) κυμαίνεται μεταξύ 25 % (ER = 0,5 και T = 650°C) μέχρι 50 % (λ = 0,1 και T = 1200°C). Παρατηρείται αύξηση του μοριακού του κλάσματος τόσο με αύξηση της θερμοκρασίας όσο και με την αύξηση του λόγου αέρα.



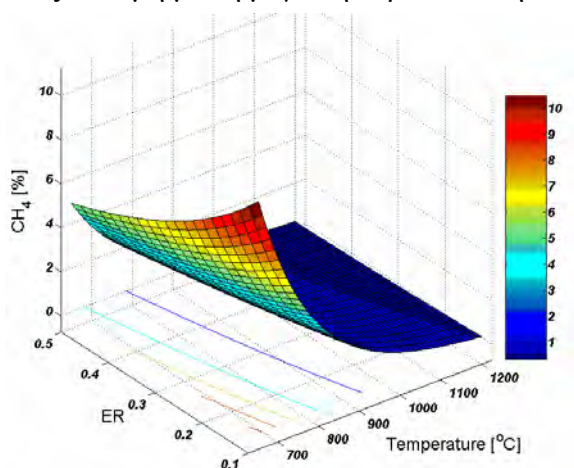
Εικόνα 2: Σύσταση CO συναρτήσει της θερμοκρασίας και του ER



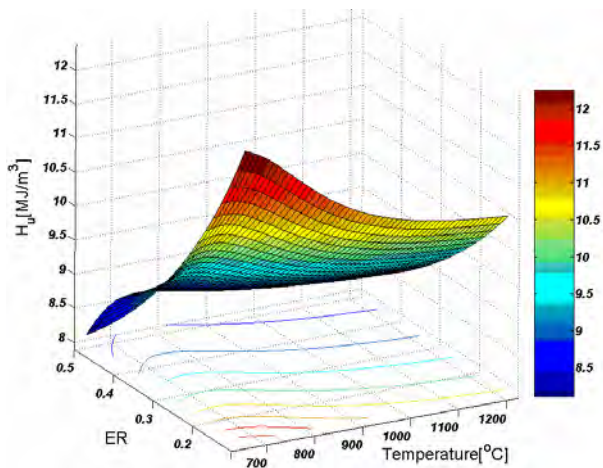
Εικόνα 3: Σύσταση H₂ συναρτήσει της θερμοκρασίας και του ER

Η μεταβολή του CH₄ (Εικόνα 4) εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασιακή μεταβολή και ελάχιστα από την αλλαγή του λόγου αέρα. Το μοριακό κλάσμα του κυμαίνεται από 0,5 % (ER = 0,5 και T = 1200°C) έως 10,2 % (ER = 0,1 και T = 650°C). Από τα τρία αυτά συστατικά υπολογίζεται και η ΘΔ του αερίου η μέγιστη τιμή της οποίας παρουσιάζεται για μειωμένο ER και χαμηλή θερμοκρασία. Η ΘΔ παίρνει τιμές από 8 – 12 MJ / m³. Οι λόγοι για τους οποίους η ΘΔ μεγιστοποιείται σε χαμηλή θερμοκρασία και μικρό ER είναι αφενός η σταθεροποίηση του CO πριν τους 900°C αλλά και η μέγιστη τιμή του CH₄ σε χαμηλή θερμοκρασία και ER. Η ενεργειακή πυκνότητα του CH₄ είναι πολύ μεγαλύτερη αυτών του CO και του H₂

(890,5 kJ / mol έναντι 283 και 242 kJ / mol αντίστοιχα) οπότε συμπίπτει η μέγιστη θερμογό-
νος δύναμη με τη μέγιστη περιεκτικότητα σε CH₄.

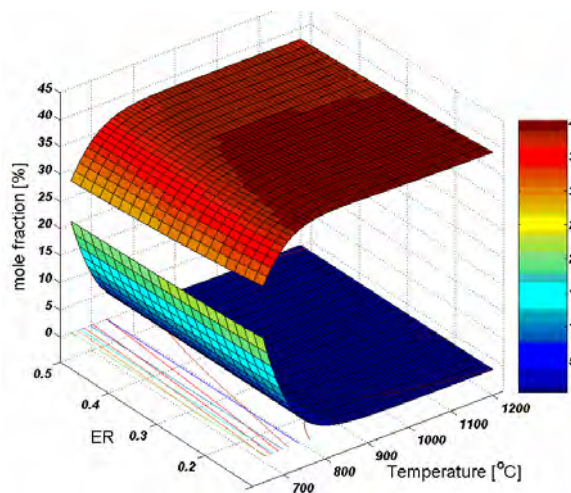


Εικόνα 4: Σύσταση CH₄ συναρτήσει της θερμοκρασίας και του ER

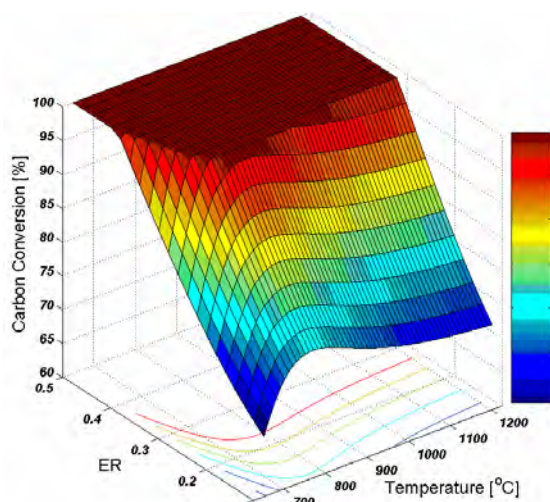


Εικόνα 5: Θερμογόνος δύναμη αερίου συναρτή-
σει της θερμοκρασίας και του ER

Για να εξηγηθεί, εν μέρει, το γιατί δεν παράγεται επιπλέον CO μέσω της αντίδρασης Boudouard σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 850°C, έγινε σύγκριση του ποσοστού των CO και CO₂. Στην Εικόνα 6, όπου και γίνεται η σύγκριση, το ποσοστό του CO₂ έχει τριπλασιαστεί για να είναι συγκρίσιμο με το CO στο ίδιο διάγραμμα. Η άνω καμπύλη αφορά το CO και η κάτω το CO₂. Εξάγεται το συμπέρασμα ότι δεν παράγεται επιπλέον CO διότι έχει σχεδόν μηδενιστεί το CO₂. Εφόσον δεν υπάρχει το απαραίτητο αυτό αντιδρών για την αντίδραση Boudouard, δεν παράγεται (ή παράγεται ελάχιστα) CO όσο κι αν αυξάνεται η θερμοκρασία (αύξηση θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση της σταθεράς χημικής ισορροπίας και κατά συνέπεια αύξηση CO).



Εικόνα 6: Σύγκριση CO και CO₂.



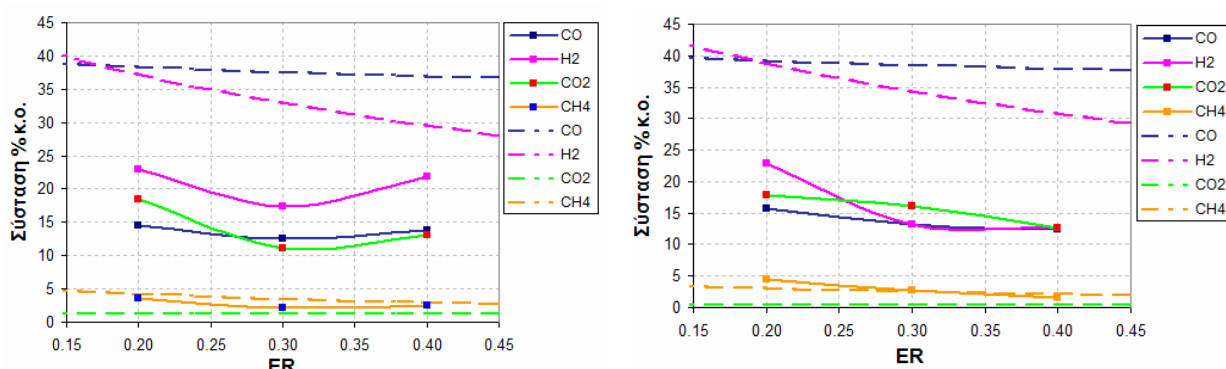
Εικόνα 7: Βαθμός μετατροπής άνθρακα συ-
ναρτήσεως του ER και της θερμοκρασίας.

Πέρα από τη θερμογόνο δύναμη, είναι απαραίτητη και η γνώση του βαθμού μετατροπής του στερεού άνθρακα της βιομάζας σε αέρια συστατικά. Ο βαθμός μετατροπής άνθρακα (carbon conversion) ορίζει το κατώτατο όριο απωλειών άνθρακα στη διεργασία. Ο άνθρακας αυτός είναι σε στερεά μορφή και είτε εξέρχεται με το ακάθαρτο αέριο ή παραμένει στη ρευστοποιημένη κλίνη και οξειδώνεται από τον αέρα που εισέρχεται μετέπειτα στον αντιδραστήρα. Στο διάγραμμα της Εικόνας 7 παρατηρείται αύξηση του βαθμού μετατροπής άνθρακα με αύ-

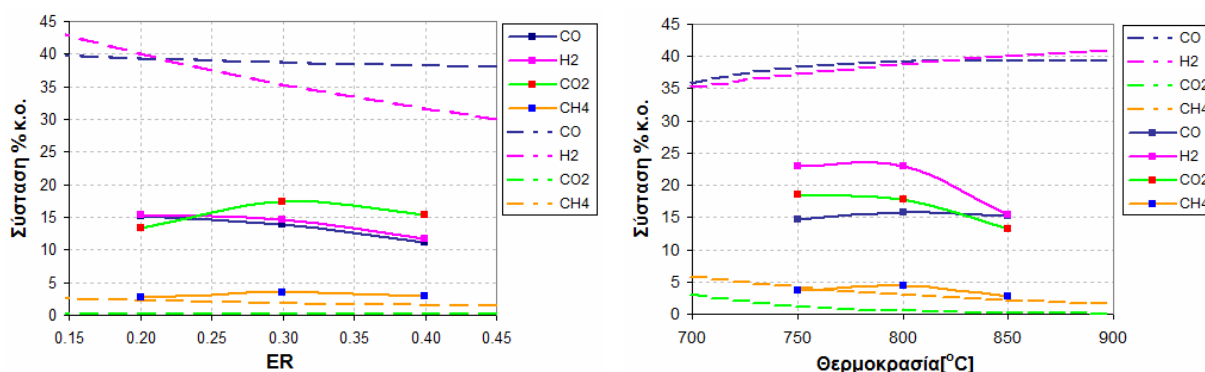
ξηση του λόγου αέρα ενώ εάν παραμείνει σταθερό το ER παρατηρείται τοπικό μέγιστο στην περιοχή των 800°C. Γενικά, σύμφωνα με το διάγραμμα εξανθράκωμα παραμένει για $ER < 0,25$.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Στόχος του μοντέλου είναι η διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας και του ER στη σύσταση ισορροπίας (και κατ' επέκταση στη θερμογόνο δύναμη και στο βαθμό μετατροπής άνθρακα). Στις Εικόνες 8 και 9 παρουσιάζεται η μεταβολή της σύστασης του αερίου σε συνάρτηση του ER. Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου ενώ οι συνεχείς είναι οι μέσες τιμές των πειραματικών μετρήσεων.



Εικόνα 8: Μεταβολή σύστασης αερίου συναρτήσεως του ER σε θερμοκρασία 750°C (αριστερά) και 800°C (δεξιά)



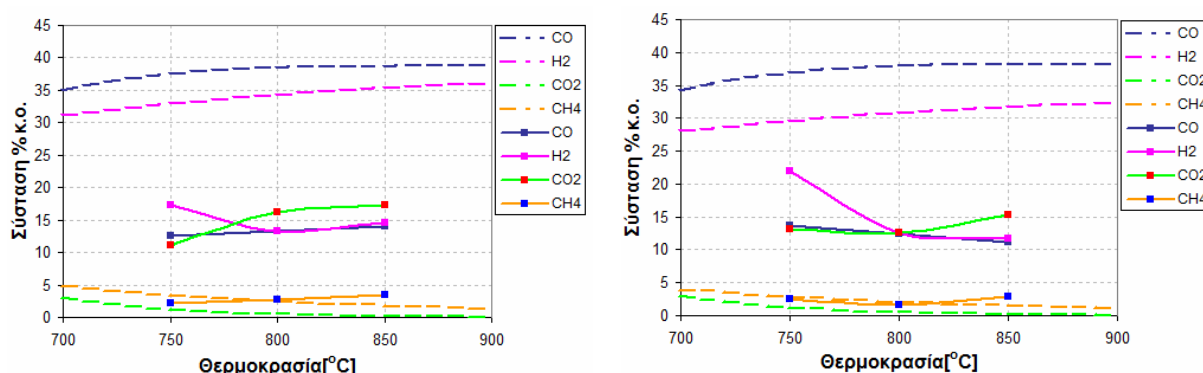
Εικόνα 9: Μεταβολή σύστασης αερίου συναρτήσεως του ER σε θερμοκρασία 850°C.

Εικόνα 10: Μεταβολή σύστασης αερίου συναρτήσεως της θερμοκρασίας για ER 20%

Ποιοτικά, παρατηρείται γενικά ταύτιση των τάσεων μεταβολής της σύστασης. Ειδικότερα, τα CO και CO₂ ελαττώνονται με αμελητέο ρυθμό ενώ εντονότερη μείωση παρατηρείται, με αύξηση του ER, στο H₂ και το CH₄. Ποσοτικά, το μόνο συστατικό που έχει παρόμοιες τιμές τόσο στο μαθηματικό μοντέλο όσο και στις πειραματικές μετρήσεις είναι το CH₄. Τα CO και H₂ έχουν υπερδιπλάσιες τιμές στο μαθηματικό μοντέλο ενώ αντίστοιχα το CO₂ μετρήθηκε σε δεκαπλάσιο ποσοστό σε σχέση με την υπολογισμένη ποσότητα. Και τα τρία διαγράμματα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι δεν έχει προκύψει χημική ισορροπία στην πειραματική διεργασία. Επίσης, παρατηρείται αλλαγή της κλίσης στα πειραματικά αποτελέσματα, κάτι που πιθανόν να οφείλεται στο μικρό αριθμό δειγματοληψιών για ER 0,4. Μία τελευταία παρατήρηση είναι ότι η μεταβολή της σύστασης ισορροπίας είναι γραμμική κάτι που επιβεβαιώνει ότι οι

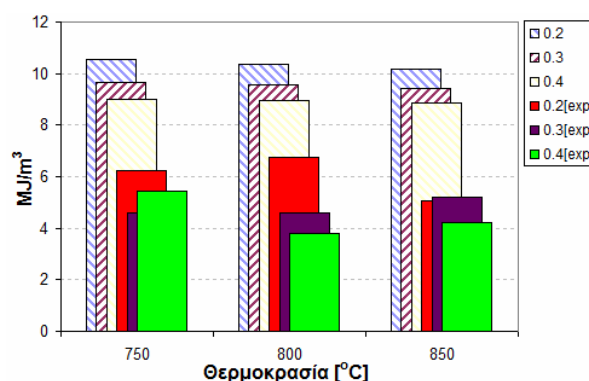
αντιδράσεις ισορροπίας δεν εξαρτώνται από το ER. Αυτό που μεταβάλλεται ουσιαστικά είναι η ποσότητα του αζώτου στο παραγόμενο αέριο.

Στις Εικόνες 10 και 11, η μεταβολή της σύστασης ισορροπίας συναρτήσει της θερμοκρασίας είναι μη γραμμική, εφόσον οι σταθερές χημικής ισορροπίας εξαρτώνται από τη θερμοκρασία μη γραμμικά επίσης. Σχετικά με τις τάσεις, παρατηρείται ότι υπάρχει συμφωνία στη μεταβολή σύστασης για όλα τα συστατικά εκτός από το H_2 . Σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο, αύξηση στη θερμοκρασία της διεργασίας οδηγεί σε αύξηση των καυσίμων συστατικών CO και το H_2 και σε μείωση του CH_4 , αλλά και του αδρανούς CO_2 . Ένα επιπλέον συμπέρασμα είναι η αλλαγή της κλίσης μετά τους $800^\circ C$ στα πειραματικά αποτελέσματα. Πιθανή αιτία είναι το μη αντιπροσωπευτικό δείγμα αερίου στους $850^\circ C$.



Εικόνα 11: Μεταβολή σύστασης αερίου συναρτήσει της θερμοκρασίας για ER 30% (αριστερά) και ER 40% (δεξιά)

Στην Εικόνα 12 δίνεται η θερμογόνος δύναμη του αερίου σε σχέση με τη θερμοκρασία και το ER. Με [exp] παριστάνονται οι μέσες τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων και με διαγράμμιση τα υπολογιστικά αποτελέσματα. Παρατηρείται πτώση της θερμογόνου δύναμης τόσο με αύξηση του ER όσο και της θερμοκρασίας. Η πτώση είναι πιο έντονη για αύξηση του ER και σχεδόν αμελητέα για αύξηση της θερμοκρασίας. Στα πειραματικά αποτελέσματα, όμοια τάση παρατηρείται μόνο για τους $800^\circ C$.



Εικόνα 12: Θερμογόνος δύναμη αερίου συναρτήσει της θερμοκρασίας και του ER

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά και την απόδοση του αεριοποιητή όσον αφορά τη σύσταση και τη θερμογόνου δύναμη του παραγόμενου αερίου. Επίσης, η σύγκριση των πειραματικών με τα υπολογιστικά αποτελέσματα δίνει όχι μόνο τη δυνατότητα αξιολόγησης της απόδοσης της διάταξης, αλλά και πληροφορίες σχετικά με τη βέλτιστη περιοχή λειτουργικών παραμέτρων.

Όσον αφορά τα πειραματικά αποτελέσματα, σημαντικά υψηλό παρουσιάζεται το ποσοστό του H_2 σε περιοχές ER $\sim 20\%$, όπου παρατηρείται μεγιστοποίηση της θερμογόνου δύναμης του αερίου. Στις συνθήκες αυτές παρουσιάζονται αυξημένα και τα ποσοστά των CO και CH_4 .

Αύξηση του ER οδηγεί σε μείωση του ποσοστού των καυσίμων συστατικών και παράλληλη αύξηση του ποσοστού του CO₂, γεγονός το οποίο συμβαδίζει με τα θεωρητικά αναμενόμενα αποτελέσματα καθώς αυξάνει η συμμετοχή των αντιδράσεων καύσης έναντι των αντιδράσεων αεριοποίησης. Η αύξηση του CO₂ δηλώνει επίσης τη μη επίτευξη χημικής ισορροπίας στη διεργασία.

Σύμφωνα με το μοντέλο χημικής ισορροπίας, η βέλτιστη περιοχή λειτουργίας για μέγιστη θερμογόνο δύναμη αερίου είναι ο ελάχιστος δυνατός λόγος αέρα και η θερμοκρασία των 650°C. Οι πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο είχαν ως ελάχιστη θερμοκρασία τους 750°C. Η μέγιστη θερμογόνο δύναμη στα πειράματα εμφανίζεται για ER 0,2 και θερμοκρασία 800°C. Ο κύριος λόγος αυτής της διαφοροποίησης είναι η παραδοχή ότι στο μοντέλο δεν προβλέπεται η παρουσία ελαφρών υδρογονανθράκων (εκτός από μεθάνιο) και πίσσας. Αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί διάσπαση όχι μόνο του μεθανίου (όπως φαίνεται στην Εικόνα 4) αλλά και των πιο βαριών υδρογονανθράκων και της πίσσας, η παρουσία της οποίας είναι ανεπιθύμητη στο αέριο. Είναι επομένως αναγκαία η αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από τους 750 °C για να διασπαστεί η πίσσα.

Το σύνολο των αερίων δειγμάτων στα πλαίσια των πειραμάτων ήταν 38. Παρατηρώντας τη μη σταθερή τάση στη μεταβολή της σύστασης για αύξηση ER και θερμοκρασίας προτείνεται η λήψη περισσότερων δειγμάτων στη θερμοκρασία των 850°C αλλά και σε λόγο αέρα 40 % ώστε να είναι μεγαλύτερη η «αντιπροσωπευτικότητα» του στατιστικού δείγματος.

Η ερευνητική δραστηριότητα συνεχίζεται διερευνώντας και άλλες λειτουργικές παραμέτρους, στοχεύοντας στη μεγιστοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου του αερίου και ταυτόχρονα στη βελτιστοποίηση της ποιότητάς του, όσον αφορά τη σύσταση και το ρυπαντικό του φορτίο (πίσσα και σωματίδια). Προς την κατεύθυνση μέτρησης και μείωσης του ρυπαντικού φορτίου έχει εγκατασταθεί εξοπλισμός καθαρισμού του αερίου στην έξοδο του αντιδραστήρα και πραγματοποιούνται μετρήσεις.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το έργο χρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Κοινοτικό Ταμείο (ΕΚΤ), το Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΥΠΙΑΝ – ΓΓΕΤ), και την εταιρία Ν. ΑΧ. ΦΙΛΙΠΠΟΠΟΥΛΟΣ (ΕΔΕ Η-Μ) στα πλαίσια του προγράμματος ΠΕΝΕΔ2003.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Prabir Basu, Combustion and Gasification in Fluidized Beds, Taylor and Francis Group Inc, 2006
- [2] McKendry P., Energy production from biomass (part 3): gasification technologies, Elsevier, Bioresource technology 83, 55 – 63, Colchester 2002
- [3] Εργαστηριακές αναλύσεις, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής, Τμήμα Μηχανολόγων μηχανικών, & Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων, Τμήμα Χημικών Μηχανικών Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ
- [4] Demirbas A, Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals, Pergamon, Energy Conversion and Management 42, 1357 – 1378, 2001
- [5] Bridgwater A.V., The technical and economical feasibility of biomass gasification for power generation, Elsevier, Fuel 74, 631 – 653, Birmingham 1995

BIOMAZA - NEA YAIKA

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ Η ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΕ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΕΣ ΧΩΡΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

Απόστολος Μαλαμάκης¹ και Αβραάμ Καραγιαννίδης¹

¹Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,
54 124 Θεσσαλονίκη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με βάση το ασταθές και πολυσύνθετο ενεργειακό περιβάλλον, η αξιολόγηση νέων ενεργειακών πηγών κρίνεται εξαιρετικά επίκαιρη. Για την επιλογή τέτοιων πηγών οι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη περιλαμβάνουν τις τοπικές συνθήκες κάθε περιοχής, το νομικό και κοινωνικό-οικονομικό πλαίσιο και τις αντιδράσεις σε τοπικό επίπεδο. Στην περίπτωση ιδιαίτερα της ενεργειακής αξιοποίησης βιοαερίου και βιομάζας επιπλέον παράγοντες όπως η ποιότητα και η διαθέσιμη ποσότητα των προς αξιοποίηση υλικών, η εποχικότητα και θέματα σχεδίασης ανάστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Συνεπώς η αξιολόγηση των εναλλακτικών επιλογών αποτελεί μια διαδικασία πολύπλοκη. Η παρούσα εργασία προτείνει ένα σύστημα υποστήριξης λήψης αποφάσεων (Decision Support System - DSS) το οποίο θα υποδεικνύει από τα αρχικά στάδια τη σκοπιμότητα ή μη της ανάπτυξης ενός έργου ενεργειακής αξιοποίησης βιοαερίου ή βιομάζας. Η εφαρμογή του συστήματος περιλαμβάνει την εκπόνηση μιας προ-μελέτης σκοπιμότητας μέσω ενός ολοκληρωμένου σκελετού δεδομένων τα οποία συλλέγονται και αξιολογούνται.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε κοινότητες απομονωμένες από το εθνικό δίκτυο αποτελεί ζήτημα ιδιαίτερης σημασίας, κοινωνικής, οικονομικής και περιβαλλοντικής. Η ενέργεια είναι αγαθό πρώτης προτεραιότητας και πρέπει να παρέχεται σε όλους ανεξαιρέτως τους κατοίκους ώστε να διατηρείται η κοινωνική ισορροπία. Όταν το κόστος για τη μεταφορά ενέργειας από το δίκτυο προς την απομακρυσμένη κοινότητα κρίνεται απαγορευτικό, τότε αποτελεί αναπόφευκτη λύση η παραγωγή ενέργειας τοπικά, σε μικρής ισχύος μονάδες. Η παραγωγή ενέργειας με συμβατικές μεθόδους ενέχει σοβαρούς περιβαλλοντικούς κινδύνους για την γύρω περιοχή. Ειδικά εάν η περιοχή εγκατάστασης είναι περιοχή ιδιαίτερης φυσικής σημασίας ή αποτελεί τουριστικό προορισμό, η εγκατάσταση μιας τέτοιας μονάδας παραγωγής ενέργειας πρέπει να εξετάζεται με ιδιαίτερη προσοχή και από περιβαλλοντική σκοπιά. Αντίστοιχο περιβαλλοντικό πρόβλημα που καλούνται να αντιμετωπίσουν περιοχές απομακρυσμένες και με συγκεκριμένες πληθυσμιακές αιχμές είναι η διαχείριση των απορριμμάτων τους.

Σκοπός της εργασίας είναι η σύνθεση των δυο παραπάνω προβλημάτων για την εξεύρεση κοινής λύσης. Η παραγωγή ενέργειας με καύση βιοαερίου από απορρίμματα και βιομάζα δεν είναι καινούργια ιδέα, αλλά η χρήση των νέων διαθέσιμων τεχνολογιών για την παραγωγή ενέργειας και, ταυτόχρονα, η αντιμετώπιση του ζητήματος των απορριμμάτων σε απομονωμένες και απομακρυσμένες περιοχές αξίζει να εξεταστεί εκ νέου.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Μια μελέτη σκοπιμότητας είναι προαπαιτούμενη για την δημιουργία ενός έργου ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας ή βιοαερίου ώστε να διασφαλιστούν οι πιθανότητες επιτυχίας του υπό μελέτη έργου. Είναι δηλαδή ανάλυσης της βιωσιμότητας του έργου και καλείται να απαντήσει εάν το προτεινόμενο έργο πρέπει να εκτελεστεί. Συχνά μια μελέτη σκοπιμότητας εξετάζει τις πιθανές εναλλακτικές λύσεις σε συγκεκριμένο πρόβλημα τονίζοντας ιδιαίτερα τις διαφορετικές επιδράσεις κάθε εναλλακτικής καταλήγοντας σε μια προτεινόμενη λύση. Για να προκύψει μια προτεινόμενη βέλτιστη λύση λαμβάνονται υπ' όψη όλοι οι παράγοντες, κοινωνικοί, οικονομικοί, νομικοί και περιβαλλοντικοί. Η μελέτη αυτών των παραγόντων έχει να κάνει τόσο με το σχεδιασμό της ίδιας της εγκατάστασης και των μεθόδων υλοποίησής, της όσο και με τη λειτουργία της και τις επιπτώσεις στο χώρο εγκατάστασης. Σημαντική βαρύτητα στην λήψη της απόφασης σχετικά με σκοπιμότητα εγκατάστασης μιας τέτοιας μονάδας έχει η ανάλυση επικινδυνότητας κάθε ενός από τους παραπάνω παράγοντες.

Πριν τη μελέτη σκοπιμότητας μια προ-μελέτη είναι δυνατό να διεξαχθεί ώστε η ευρύτερη αγορά στη οποία θα τοποθετηθεί το έργο να μελετηθεί ώστε να αποφευχθεί η διεξαγωγή μιας δαπανηρής και χρονοβόρας μελέτης σκοπιμότητας εάν οι γενικές συνθήκες υποδεικνύουν εξ αρχής ότι το έργο δεν θα είναι οικονομικά σκόπιμο. Στις περιπτώσεις έργων ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας και βιοαερίου, κυρίως σε αναπτυσσόμενες χώρες με υψηλή απαίτηση σε παραγωγή ενέργειας, τέτοιας υφής έργα έχουν επαρκή οικονομικά κίνητρα ώστε κανείς να προχωρήσει απ' ευθείας στην μελέτη σκοπιμότητας.

Η συλλογή αξιόπιστων δεδομένων είναι το πιο κρίσιμο σημείο στη διαδικασία λήψης αποφάσεων για κατασκευή έργων ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας. Η συλλογή των απαιτούμενων στοιχείων γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, το οποίο μπορεί να καλυφθεί και από την προμελέτη σκοπιμότητας, συλλέγονται γενικά στοιχεία βασικών μεγεθών του ευρύτερου περιβάλλοντος του έργου:

- ο νομοθετικό πλαίσιο,
- ο περιβαλλοντικές παράμετροι του έργου,
- ο στοιχεία κόστους,
- ο διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πρώτων υλών.

Στο επόμενο στάδιο συλλογής δεδομένων συλλέγονται επιπλέον στοιχεία σχετικά με:

- ο γεωγραφικά και κλιματικά στοιχεία της προτεινόμενης περιοχής εγκατάστασης,
- ο κοινωνικοπολιτικοί παράγοντες,
- ο σε βάθος ανάλυση των δυνατοτήτων εφοδιαστικής αλυσίδας στην περιοχή.

Επιπλέον στο δεύτερο αυτό στάδιο εξειδικεύονται τα δεδομένα που συλλέχθηκαν στο πρώτο στάδιο αναφορικά με:

- ο διαδικασίες αδειοδότησης,
- ο ακριβή οικονομοτεχνικά δεδομένα (απασχόληση προσωπικού, τυχόν επιδοτήσεις),
- ο ανάλυση του ενεργειακού τομέα της ευρύτερης περιοχής (παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας, σύνδεση σε υπάρχοντα δίκτυα μεταφοράς ενέργειας),
- ο ακριβή στοιχεία διαθεσιμότητας ανανεώσιμων πρώτων υλών,
- ο δυνατότητες χρηματοδότησης και επενδύσεων.

Τα αποτελέσματα μια τέτοιας μελέτης δεν οδηγούν αποκλειστικά στην παρουσίαση μιας εναλλακτικής λύσης αλλά παρουσιάζουν στους λήπτες αποφάσεων που εμπλέκονται τις

πιθανές εναλλακτικές με πλήρη ανάλυση των ισχυρών θετικών σημείων και των πιθανών δυσκολιών ή αποτρεπτικών παραγόντων κάθε περίπτωσης. Για κάθε προτεινόμενη λύση παρουσιάζονται αναλυτικά τα ρίσκα που υπάρχουν σε κάθε τομέα και γίνεται η σύγκριση αυτών με τα κέρδη που προβλέπονται.

Μια τέτοια διαδικασία λήψης αποφάσεων δεν πρέπει να συγχέεται με ένα επιχειρηματικό σχέδιο και ούτε μπορεί να προκαταβάλει ότι κάποιο από τα προτεινόμενα ως λύσεις θα κατασκευαστεί ούτως ή άλλως.

Στη συνέχεια θα αναλυθούν οι παράγοντες που είναι απαραίτητη η σε βάθος γνώση τους για την επιτυχημένη εφαρμογή του εργαλείου λήψης αποφάσεων που περιγράφηκε παραπάνω.

2.1 Χωροθέτηση της μονάδας

Η εύρεση κατάλληλου χώρου και η βέλτιστη χωροθέτηση της μονάδας αποτελούν προϋπόθεση για την οικονομικά αποδοτική και κοινωνικά αποδεκτή λειτουργία της. Η μελέτη χωροθέτησης λαμβάνει υπ' όψιν τόσο το ιδιοκτησιακό καθεστώς της επιλεγμένης περιοχής όσο και την στάση της τοπικής κοινωνίας στην εγκατάσταση μιας μονάδας διαχείρισης βιομάζας. Παραδείγματα μακρόχρονων καθυστερήσεων και ακόμη και ματαίωσης έργων στον Ελληνικό χώρο υπάρχουν πολλά. Ιδιαίτερη μελέτη απαιτείται σε τουριστικές περιοχές ή περιοχές ιδιαίτερου κάλλους όπως. Η διαθεσιμότητα των εκτάσεων, ο σαφής καθορισμός της αξίας της γης και η δεδηλωμένη αποδοχή από την τοπική κοινότητα της προτεινόμενης θέσης είναι παράγοντες επικινδυνότητας που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν πριν την έναρξη του έργου.

2.2 Νομικό πλαίσιο

Το νομικό πλαίσιο, στο οποίο μπορεί να βασιστεί μια μονάδα ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας και βιοαερίου, είναι διαφορετικό σε κάθε χώρα. Ιδιαίτερα σε χώρες όπου αυτό βρίσκεται υπό διαμόρφωση, αποτελεί συχνά σημαντική τροχοπέδη για την εξέλιξη τέτοιων εγχειρημάτων και την προσέλκυση επενδυτικού ενδιαφέροντος. Η διαδικασία αδειοδότησης μιας τέτοιας μονάδας και η εκπλήρωση των απαιτήσεων σχετικά με τους περιβαλλοντικούς όρους λειτουργίας πρέπει να αποτελούν προτεραιότητες στην φάση της μελέτης σκοπιμότητας.

2.3 Οικονομικοί παράγοντες

Πρώτη ενέργεια στην αξιολόγηση της σκοπιμότητας εγκατάστασης μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας με καύση βιοαερίου ή βιομάζας αποτελεί η εκτίμηση της ανάγκης χρηματοδότησης του έργου. Κύριο πρόβλημα των μικρομεσαίων επιχειρήσεων αποτελεί η έλλειψη επαρκούς χρηματοδότησης. Καθώς τα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι κατά πλειοψηφία μικρομεσαίου μεγέθους, αντιμετωπίζουν ορισμένα κοινά προβλήματα, όπως:

- μεγάλη ευπάθεια σε συνθήκες μεταβαλλόμενης αγοράς,
- υψηλούς δείκτες αποτυχίας σε σχέση με αντίστοιχες συμβατικές μονάδες,
- προτίμηση των τραπεζών προς μεγάλους ομίλους ή το δημόσιο τομέα ως δανειστές,
- υψηλά κόστη διαχείρισης σε συνδυασμό με εν γένει μικρά εγκρινόμενα δάνεια [1].

Σχετικά με την χρηματοδότηση τέτοιων έργων υπάρχουν αρκετά χρηματοδοτικά σχήματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- ο συμβατική χρηματοδότηση που περιλαμβάνει ίδια συμμετοχή και χρονομίσθωση,
- ο χρηματοδότηση προγράμματος μέσω της δημιουργίας εταιρίας αποκλειστικά για την κατασκευή της προτεινόμενης μονάδας χρηματοδοτούμενη και μέσω τυχόν

επιδοτήσεων για παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας,

- ο χρηματοδότηση με τη βοήθεια μεταφοράς δικαιωμάτων εκπομπών αέριων ρύπων και του προγράμματος Clean Development Mechanism (CDM) [2]. Παρουσιάζεται ενδεικτικά η τιμή ανά τόνο CO₂ στην Ευρωπαϊκή ένωση στο Σχήμα 1 . Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται διαγραμματικά η χρηματοδότηση ενός τέτοιου έργου.



Σχήμα 1: Εξέλιξη των τιμών (σε ευρώ) του τόνου ισοδύναμου CO₂ για την ΕΕ για το 2008 [4].

Σε σχέση με την ελληνική αγορά ιδιαίτερη αναφορά αξίζει να γίνει στις δυνατότητες χρηματοδότησης με συνεργασία δημοσίου και ιδιωτικού τομέα (ΣΔΙΤ) [3]. Η υλοποίηση της μονάδας γίνεται με κεφάλαια του ιδιώτη και η αποπληρωμή προέρχεται από τα έσοδα της μονάδας για ένα συμφωνημένο χρονικό διάστημα, στο τέλος του οποίου, η εκμετάλλευση της μονάδας επιστρέφει στο δημόσιο.



Σχήμα 2: Χρηματοδότηση έργου ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας και βιοαερίου μέσω του Clean Development Mechanism και της πώλησης δικαιωμάτων εκπομπής αέριων ρύπων.

2.4 Τεχνικοί παράγοντες

Το σημαντικότερο κομμάτι μιας μελέτης σκοπιμότητας είναι η κατ' αρχήν επιλογή της τεχνολογίας που θα χρησιμοποιηθεί και η σε πρώτη φάση εκτίμηση της δυναμικότητας της μονάδας. Λαμβάνονται υπ' όψιν οι τεχνικοί περιορισμοί, ο αναγκαίος χώρος για την εγκατάσταση και οι ίδιες απαιτήσεις της μονάδας σε ενέργεια.

Το επόμενο βήμα στον τεχνικό προσδιορισμό της υποψήφιας μονάδας είναι η επιλογή των πρώτων υλών που θα χρησιμοποιεί η μονάδα, ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών τους και, κυρίως, η σε βάθος χρόνου διαθεσιμότητά τους. Η μεταβλητότητα της διαθεσιμότητας πρώτων υλών αλλά και η αστάθεια των τιμών τους αποτελούν τους σοβαρότερους κινδύνους στην υλοποίηση ενός τέτοιου εγχειρήματος.

2.5 Περιβαλλοντικοί παράγοντες

Η χρησιμοποίηση βιοαερίου και βιομάζας για την παραγωγή ενέργειας είναι από κάθε σκοπιά περιβαλλοντικά σκόπιμη. Τα οφέλη που προκύπτουν είναι πολλαπλά και συνοψίζονται στην εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων, στην μείωση των εκπομπών και στην μείωση του όγκου των υπολειμμάτων προς τελική διάθεση.

3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑΣ

Η κύρια εργασία που πρέπει να εκτελεστεί κατά την διάρκεια της διαδικασίας λήψης απόφασης σχετικά με την προώθηση ενός έργου ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας ή βιοαερίου είναι η αξιολόγηση των επί μέρους στοιχείων του προτεινόμενου έργου.

3.1. Σχεδιασμός του έργου και τεχνική αξιολόγηση

Αρχικά αξιολογούνται οι προτεινόμενες τοποθεσίες του έργου και συγκρίνονται στοιχεία όπως οι διαθέσιμες υποδομές και οι δυνατότητες εφοδιαστικών αλυσίδων για κάθε διαφορετική επιλογή τοποθεσίας. Στη συνέχεια αναλύονται και συγκρίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε πιθανής λύσης:

- ο διαθεσιμότητα πρώτων υλών, δυνατότητες αποθήκευσης, τύποι προ-επεξεργασίας,
- ο διεργασίες και τύπος μονάδας, επιλογή τεχνολογίας, διάγραμμα ροής μονάδας, τεχνικά χαρακτηριστικά κύριου μηχανολογικού εξοπλισμού,
- ο χωροταξία μονάδας, κατασκευαστικές απαιτήσεις κτιρίων, απαιτούμενη έκταση μονάδας,
- ο φορέας ενέργειας (ηλεκτρισμός, θερμότητα, ψύξη, ατμός) και δυνατότητες διανομής, απαιτούμενοι υποσταθμοί, διαθέσιμα δίκτυα μεταφοράς ενέργειας, δυνατότητες αυτοματοποίησης της μονάδας,
- ο διαχείριση ρευμάτων εξόδου της μονάδας.

3.2. Οικονομική αξιολόγηση

Σκοπός είναι η κατανόηση των οικονομικών ωφελειών και απαιτήσεων των προτεινόμενων λύσεων. Τα κόστη τα οποία πρέπει να συνυπολογίζονται περιλαμβάνουν τα κόστη επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης καθώς και οι εισροές από την παραγωγή ενέργειας ή/και προϊόντων.

Επιπλέον η οικονομική βιωσιμότητα σε βάθος χρόνου και οι δυνατότητες χρηματοδότησης της επένδυσης εξετάζονται λαμβάνοντας υπ' όψη την αλληλεπίδραση της νέας προτεινόμενης μονάδας στο ενεργειακό σύστημα στο οποίο θα ανήκει.

3.3. Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Η ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κάθε προτεινόμενης λύσης είναι παράγοντας κριτικής σημασίας στη διαδικασία λήψης αποφάσεων που διαπραγματεύεται η παρούσα εργασία. Συχνά η προώθηση ενός έργου ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας ή βιοαερίου συσχετίζεται με την προοπτική «καθαρής ανάπτυξης» (Clean Development) την οποία ο διαχειριστής του έργου οφείλει να διατηρήσει για να έχει τη συγκατάθεση της τοπικής κοινωνίας απέναντι στο έργο. Οι παράγοντες που οφείλουν να εξετάζονται τόσο σε τοπικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο καθώς και τα πιθανά οφέλη και οι αρνητικές συνέπειες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

3.4. Διαδικασία αδειοδότησης

Ανάλογα με την εθνική νομοθεσία διαφορετικά επίπεδα αδειοδότησης πιθανώς απαιτούνται και υπάρχει σαφής ανάγκη να περιγράφονται με επάρκεια όλες οι διαδικασίες και οι απαραίτητες ενέργειες που απαιτούνται.

3.5. Ανάλυση της κοινωνικής αποδοχής

Η κοινωνική αποδοχή ενός έργου ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας ή βιοαερίου μπορεί να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα για την επιλογή συγκεκριμένης λύσης η οποία θα αντιμετωπίσει λιγότερες αντιδράσεις.

Πίνακας 1: Παράγοντες σε τοπικό και παγκόσμιο επίπεδο και επιπτώσεις (θετικές και αρνητικές) ανά παράγοντα για την εγκατάσταση έργων ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας και βιοαερίου.		
	Όφελος	Αρνητική Επίδραση
Τοπικές επιπτώσεις		
Air pollution	Reduction by replacement of fossil fuel	Exposure to local traffic (transport substrates)
Soil pollution	Reduction by uncontrolled disposal of waste; application of biofertiliser	--
Water pollution	Reduction of uncontrolled disposal of waste	--
Noise pollution	Reduction by replacement of outdated energy systems (e.g. diesel generator)	Exposure to local traffic (transport substrates), plant operation
Odor pollution	Reduction of smell from inappropriate waste handling	Exposure to smell to direct neighbors
Παγκόσμιες επιπτώσεις		
Deforestation	Reduction of deforestation by provision of other energy sources	--
Acid rain	Replacement of fossil fuel combustion	--

4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Τα ζητήματα που απασχολούν τη λήψη αποφάσεων σε θέματα έργων ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας και βιοαερίου είναι πολύπλοκα και κατά συνέπεια η εκτίμηση των κινδύνων που συνδέονται με αυτά είναι αποφασιστικής σημασίας στη διαδικασία. Υπάρχουν δυο κατηγορίες κινδύνων, αυτοί που συνδέονται με τεχνικά ζητήματα και θέματα της διεργασίας και αυτοί που συνδέονται με κοινωνικοπολιτικά και περιβαλλοντικά ζητήματα. Τα τρία κύρια βήματα της εκτίμησης επικινδυνότητας είναι:

1. Η αναγνώριση των κινδύνων και των συνεπειών τους, δηλαδή οτιδήποτε θα μπορούσε να αποτελέσει απειλή για το σύστημα.
2. Η εκτίμηση της επικινδυνότητας, δηλαδή η πιθανότητα να συμβεί ένα συμβάν.
3. Η αξιολόγηση της επικινδυνότητας, δηλαδή η εκτίμηση της σημαντικότητάς της.

4.1. Ορισμός κριτηρίων για εκτίμηση των κινδύνων

Για κάθε κατηγορία κινδύνων αποδίδεται διαφορετική σημαντικότητα βασισμένη στις τοπικές συνθήκες. Στις περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η ποσοτική κατηγοριοποίηση, χρησιμοποιείται η ποιοτική διαβάθμιση δίνοντας έτσι τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ επιλογών κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Αναφορικά με έργα ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας και βιοαερίου τα συνήθη κριτήρια είναι:

- ο θέματα υγείας σχετικά με τους εργαζόμενους στη μονάδα,
- ο περιβαλλοντικοί κίνδυνοι,
- ο τεχνολογικοί και λειτουργικοί κίνδυνοι,
- ο οικονομικοί κίνδυνοι,
- ο κίνδυνος μη ικανοποίησης της απαίτησης για επαρκή τροφοδοσία.

4.2. Εκτίμηση της επίδρασης κάθε κινδύνου

Για την ορθή επιλογή ανάμεσα στις εναλλακτικές λύσεις θα πρέπει να εκτιμηθεί η επίδραση κάθε κινδύνου με βάση την βαρύτητα που αποδίδεται σε αυτόν.

Ένα πιθανό εργαλείο για την υποστήριξη αυτής της διαδικασίας είναι η Ανάλυση Κύκλου Ζωής κατά την οποία εξετάζονται όλες οι δράσεις γύρω από το σύστημα το οποίο ορίζεται από την κατασκευή μέχρι τον τερματισμό της λειτουργίας. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να αξιολογήσουμε την επίδραση κάθε στοιχείου του εξεταζόμενου έργου στους κινδύνους που αναφέρθηκαν παραπάνω.

4.3. Καθορισμός μέτρων αποφυγής κινδύνων

Από τη στιγμή που όλοι οι πιθανοί κίνδυνοι έχουν εντοπιστεί και αξιολογηθεί απαιτείται η διαμόρφωση μέτρων για την αποφυγή τους. Τέτοια μέτρα μπορούν να περιλαμβάνουν πρωτόκολλα ασφάλειας στη λειτουργία της μονάδας, αυστηρούς κανονισμούς λειτουργίας για το προσωπικό ή επιλογή τεχνολογιών που αποδεδειγμένα ελαχιστοποιούν τις πιθανότητες αστοχίας.

5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΛΥΣΕΩΝ

Μετά την επιλογή των διαθέσιμων εναλλακτικών λύσεων και την αξιολόγηση των κινδύνων που συνδέονται με αυτές ακολουθεί η σύγκριση των εναλλακτικών με βάση ένα πλαίσιο κριτηρίων το οποίο θα χρησιμοποιηθεί σε σύζευξη με μέθοδο πολυκριτηριακής ανάλυσης για την υποστήριξη της λήψης απόφασης.

5.1. Πολυκριτηριακή Ανάλυση

Η πολυκριτηριακή ανάλυση αποτελεί εργαλείο προσδιορισμού προτιμήσεων μεταξύ εναλλακτικών επιλογών το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Πολύπλοκα προβλήματα όπως αυτά των έργων ενεργειακής αξιοποίησης βιοαερίου ή βιομάζας τα οποία συνδέονται με πολλούς παράγοντες μπορούν να επιλυθούν με τη βοήθεια της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Υπάρχουν διαφορετικές μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης, όλες όμως βασίζονται στην επιλογή αντικειμενικών συναρτήσεων και μετρήσιμων κριτηρίων με βάση τα οποία λαμβάνονται οι επιδόσεις κάθε εναλλακτικής επιλογής. Η μέθοδος της πολυκριτηριακής έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε πολλές περιπτώσεις στην διαδικασία λήψης αποφάσεων [5].

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία προτείνει μια μεθοδολογία για την εκτίμηση της σκοπιμότητας έργων ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας και βιοαερίου με έμφαση στα εργαλεία, οικονομικά κυρίως, και στις ιδιαιτερότητες χωρών σε μετάβαση. Για την υποστήριξη της μεθοδολογίας λήψης αποφάσεων προτείνονται τα εργαλεία της πολυκριτηριακής ανάλυσης και της ανάλυσης κύκλου ζωής. Ιδιαίτερα σημαντικό σημείο στην προτεινόμενη μεθοδολογία είναι η κατανόηση των ιδιαιτεροτήτων της κάθε περίπτωσης και συγκεκριμένα στο πλαίσιο των χωρών υπό μετάβαση η σαφής και σε βάθος ανάλυση των ραγδαία διαφοροποιούμενων πολιτικών, κοινωνικών και οικονομικών συνθηκών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙ ΕΠΙΛΟΓΟΥ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου RENEW το οποίο χρηματοδοτήθηκε από το πρόγραμμα EC-ASEAN Energy Facility της Ευρωπαϊκής Ένωσης κατά το διάστημα 2005-2006. Η αναπτυσσόμενη χώρα εφαρμογής του ήταν το Βιετνάμ αλλά το έργο προσέφερε πολλά μαθήματα και ανέπτυξε τεχνογνωσία και για άλλες χώρες υπό μετάβαση στην διαχείριση απορριμμάτων όπως η Ελλάδα και ιδιαίτερα οι νησιωτικές της περιοχές (καθότι η κύρια περιοχή εφαρμογής του RENEW ήταν το μεγαλύτερο νησί του Βιετνάμ ονόματι Phu Quoc). Κατά το τέλος του 2008 και 2 έτη μετά την ολοκλήρωση του RENEW, αναφέρθηκε ότι στο Phu Quoc προχώρησαν οι διαδικασίες υλοποίησης έργου αναερόβιας ζύμωσης των απορριμμάτων του νησιού, αξιοποιώντας άμεσα όλα τα αποτελέσματα του RENEW.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Gonzales, C., 'Financing Issues and Options for Small-Scale Industrial CDM Projects in Asia', Paper Prepared for FINESSE, United Nations Development Program (UNDP), Thailand, 2001.
2. Todoc, L. J., Cazelles, P., Alexandre, J.M., Lefevre, T., Schindler, S., 'Project Structure and Financing of Green IPPs in SEA', In: GrIPP-Net News, Volume 2, Number 3, 2003.
3. Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, 'Νόμος 3389/2005, Συμπράξεις Δημοσίου και Ιδιωτικού Τομέα', ΦΕΚ Α' 232/22.9.2005, 2005.
4. www.eex.de
5. Petrie, J., Stewart, M., Basson, L., Notten, P. & Brett, A. (2000): Structured Approaches to Decision Making for Cleaner Products and Processes, Use of Life Cycle Assessment in Effective Environmental Decision Making, CRESTA – Centre for Risk, Environment and Systems Technology and Analysis, Department of Chemical Engineering, University of Sydney, Sydney.

ΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ, CASE STUDY Χ.Υ.Τ.Α. ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Κ. Αλιβάνης¹, Ι. Χατζηιορδάνη², Γ. Χατζούδης³

¹Σύνδεσμος ΟΤΑ Μείζονος Θεσσαλονίκης, Φράγκων 6-8, 54626 Θεσσαλονίκη, alivanis@otenet.gr

²Πρόγραμμα Κατάρτισης "Βιώσιμη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων- Ανακύκλωση Υλικών, ΚΕΚ Α.Π.Θ., gianna_xatzhiordani@hotmail.com

³Πρόγραμμα Κατάρτισης "Βιώσιμη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων- Ανακύκλωση Υλικών, ΚΕΚ Α.Π.Θ., gchatzoudis@yahoo.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η παραγωγή, η διαχείριση και η ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου κατά τη βιοαποδόμηση του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων στο Χώρο Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) Ταγαράδων. Γίνεται μια περιγραφή του χώρου, παρατίθενται στοιχεία λειτουργίας του και αναλύονται οι φυσικοχημικές διεργασίες που έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή βιοαερίου. Μετά από μια ιστορική αναδρομή των μεθόδων διαχείρισης που λαμβάνουν χώρα στον εν λόγω Χ.Υ.Τ.Α. η μελέτη επικεντρώνεται στα επιμέρους στάδια παραγωγής και αξιοποίησης καταλήγοντας στα εξαγόμενα από αυτές συμπεράσματα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε ένα χώρο διάθεσης απορριμμάτων λαμβάνει χώρα μια πληθώρα ιδιαίτερων φυσικοχημικών διεργασιών. Το είδος, όπως επίσης και η ένταση των διεργασιών αυτών, εξαρτάται από την ποιοτική σύσταση του υλικού, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τη μέθοδο διαχείρισης. Πρόσφατες οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωση επιβάλλουν τη μείωση του βιοδιασπάσιμου οργανικού φορτίου των απορριμμάτων που αποτίθενται σε Χ.Υ.Τ.Α.. Το μεγαλύτερο μέρος του κλάσματος αυτού μετατρέπεται στους χώρους ταφής σε βιοαέριο, το οποίο συμβάλλει στη δημιουργία πληθώρας περιβαλλοντικών και άλλων προβλημάτων. Αφενός οι δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις και αφετέρου η δυνατότητα ενεργειακής αξιοποίησης του παραγόμενου προϊόντος (βιοαέριο) επιβάλλει τη διαχείρισή τους κατά τη λειτουργία του Χ.Υ.Τ.Α. καθώς και μετά το πέρας της. Οι τεχνικές προδιαγραφές, οι οποίες καθορίζουν τις ενέργειες μετά το πέρας λειτουργίας του Χ.Υ.Τ.Α. και είναι κοινές για όλα τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης αναφέρονται στην ΚΥΑ 114218/97 με τίτλο "Κατάρτιση πλαισίου Προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων".

2. ΧΩΡΟΣ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΑΦΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ (Χ.Υ.Τ.Α.) ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Ο Χ.Υ.Τ.Α βρίσκεται Ν-ΝΑ του πολεοδομικού συγκροτήματος Θεσσαλονίκης, στην περιοχή χαλάσματα. Η περιοχή παρουσιάζει έντονη χαραδρωτή διάβρωση, που οφείλεται τόσο στο έντονο ανάγλυφο, όσο και στο μεγάλο πάχος των ιζημάτων. Όσον αφορά την υδρολιθολογία του χώρου παρατηρούνται δύο είδη γεωλογικών σχηματισμών: τα ασβεστολιθικά πετρώματα και τα χαλαρά ιζήματα. Η κυρίως μάζα του ασβεστόλιθου παρουσιάζεται συμπαγής και τα πιθανά ρήγματα είναι πληρωμένα με αργιλικό υλικό.

Ο Χ.Υ.Τ.Α δεχόταν καθημερινά απορρίμματα που ανέρχονταν σε 1.800 τόνους. Καθημερινά κατασκευάζονται κύτταρα όγκου 1.300-1.600 m³ με συνεχή χωματοκάλυψη στην επιφάνεια και καθημερινή χωματοκάλυψη στο μέτωπο, μετά τη λήξη της πρωινής δραστηριότητας. Η πυκνότητα των απορριμμάτων ανά κύτταρο ανέρχεται σε 500-600kg/m³. Το υλικό της χωματοκάλυψης είναι αργιλοαμμώδες, αποτελείται κύρια από τους εδαφικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται στο χώρο και θεωρείται το ιδανικότερο.

Αποτέλεσμα των φυσικοχημικών διεργασιών, που λαμβάνουν χώρα στο Χ.Υ.Τ.Α., μετά την ολοκλήρωση της ταφής των στερεών απορριμμάτων είναι η παραγωγή δύο ρυπαντικών προιόντων, των στραγγισμάτων και του βιοαερίου.

Η παραγωγή στραγγισμάτων στο χώρο εκτιμάται στα 150 m³ την ημέρα. το βιοαέριο αποτελεί μια σειρά αερίων ρύπων με κύρια συστατικά το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα σε αναλογία 50:50, αλλά και πληθώρας άλλων χημικών ενώσεων σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις.

Η παραγωγή του βιοαερίου γίνεται σε πέντε ξεχωριστές φάσεις ενώ στη μεγαλύτερη χρονική περίοδο το σύστημα λειτουργεί σε αναερόβιες συνθήκες. Οι ρυθμοί παραγωγής του βιοαερίου ακολουθούν, όπως και αυτοί των στραγγισμάτων, φθίνουσα πορεία στο χρόνο που καταδεικνύει το σταδιακό πέρασμα από την ενεργό στην ανενεργό φάση.

3. ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ

Το βιοαέριο είναι ένα χαρακτηριστικό μίγμα αερίων με κύρια συστατικά το μεθάνιο (CH₄) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) που παράγεται υπό αναερόβιες συνθήκες στους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Η παραγωγή του οφείλεται στην διεργασία της υδρόλυσης η οποία ξεκινά στην διεπιφάνεια μεταξύ του στερεού οργανικού υλικού (απορρίμματα) και του νερού (ελεύθερο ή σαν υγρασία). Το οργανικό υλικό αποτελεί την τροφή των βακτηριδίων που αναπτύσσονται πάνω του και το οποίο διαλύεται στο νερό είτε χημικά είτε βιοχημικά.

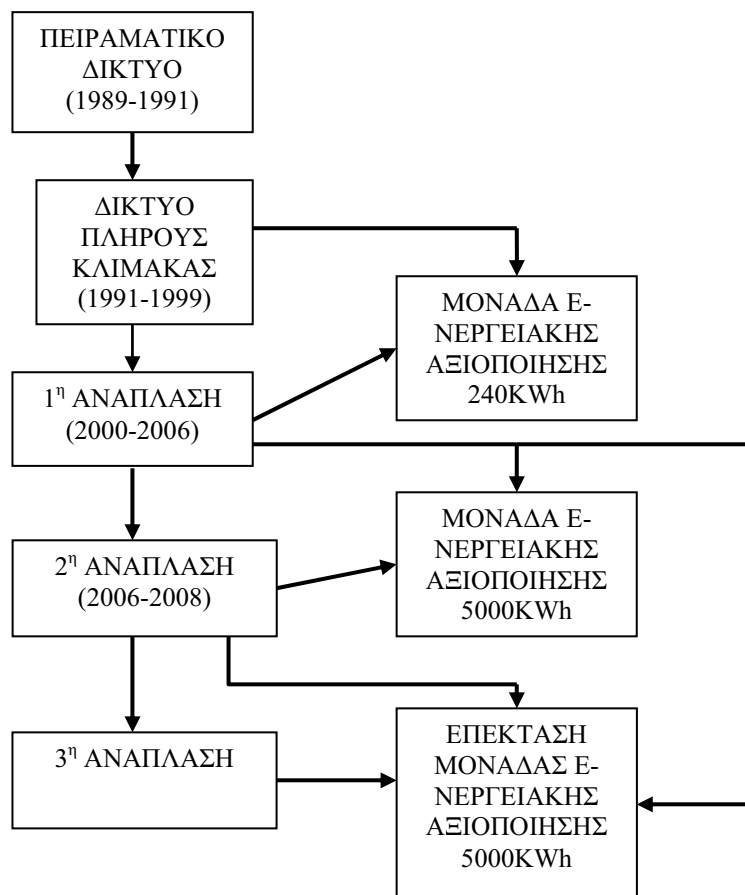
Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της αναερόβιας ζύμωσης, επομένως και την ποσότητα, το ρυθμό παραγωγής και την ποιοτική σύσταση του βιοαερίου είναι η ποιότητα και η αρχική συμπίεση των απορριμμάτων, η υγρασία και η θερμοκρασία τους, ο συνδυασμός ΡΗ – αλκαλικότητας, τα χαρακτηριστικά του χώρου διάθεσης και η σχέση άνθρακα προς άζωτο (C/N).

Ο ρυθμός παραγωγής του βιοαερίου αυξάνει κατά τη διάρκεια των δύο πρώτων χρόνων, ενώ για τα επόμενα 8-10 χρόνια ο ρυθμός σταθεροποιείται. Θεωρητικά μετά από τα 10 χρόνια υπάρχει πτώση της παραγωγής του βιοαερίου, αλλά στην πράξη έχουν μετρηθεί σημαντικές συγκεντρώσεις σε ΧΥΤΑ σαράντα και πλέον χρόνια αφού έχουν κλείσει.

Η παραγωγή του βιοαερίου έχει δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον και εγκυμονεί κινδύνους ανεξέλεγκτης ρύπανσης, για το λόγο αυτό είναι αναγκαία η εγκατάσταση συστήματος παρακολούθησης και διαχείρισης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη συλλογή του από ένα σύστημα πηγαδιών άντλησης στους χώρους απόθεσης και την καύση του στην ατμόσφαιρα ώστε να απαλλαγούμε από τις δυσάρεστες συνέπειες του. Παράλληλα οι μεγάλες ποσότητες βιοαερίου που εκλύονται καθώς και η μεγάλη διάρκεια παραγωγής του κάνουν οικονομικότερη την περαιτέρω εκμετάλλευσή του.

4. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΣΤΟ Χ.Υ.Τ.Α. ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Από το 1989 στην περιοχή της Μείζονος Θεσ/νίκης ξεκίνησε η διερεύνηση πολλών φυσικοχημικών παραμέτρων με γνώμονα την ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου στο εγγύς μέλλον. Η διεξοδική αυτή έρευνα οδήγησε στη δημιουργία ενός πειραματικού δικτύου, το οποίο στην πορεία εξελίχθηκε σε ένα δίκτυο πλήρους κλίμακας και ολοκληρώθηκε με τις επιμέρους αναπλάσεις.



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση ιστορικής αναδρομής

4.1 Πειραματικό δίκτυο

Για περίοδο δύο ετών λειτούργησε πειραματικό δίκτυο από το οποίο συλλέχθηκαν στοιχεία που αφορούσαν την χημική σύσταση και τις παραμέτρους άντλησης του συλλεγόμενου βιοαερίου. Το πειραματικό δίκτυο αποτελούταν από 12 πηγάδια απλής μορφής, από 3 πηγάδια σύνθετης μορφής και από 1 πηγάδι υψηλής χωρητικότητας. Τα πηγάδια απλής μορφής είχαν διανοιχτεί σε απορρίμματα ηλικίας 3-4 χρόνων και είχαν βάθος 3-4 m. Η άντληση του βιοαερίου γινόταν με την βοήθεια αντλίας αερίων ισχύος 2kW και με ρυθμιστή παροχής, ενώ η καύση του πραγματοποιούνταν σε καυστήρα που διέθετε αυξομειούμενο στόμιο εξόδου από 4" έως 1/2 " για την μελέτη των συνθηκών καύσης κάτω από στατικές ή δυναμικές συνθήκες. Ο καυστήρας ήταν εξοπλισμένος με σύστημα ελέγχου συνεχούς καύσης τροφοδοτούμενο από μπουκάλια υγραερίου.

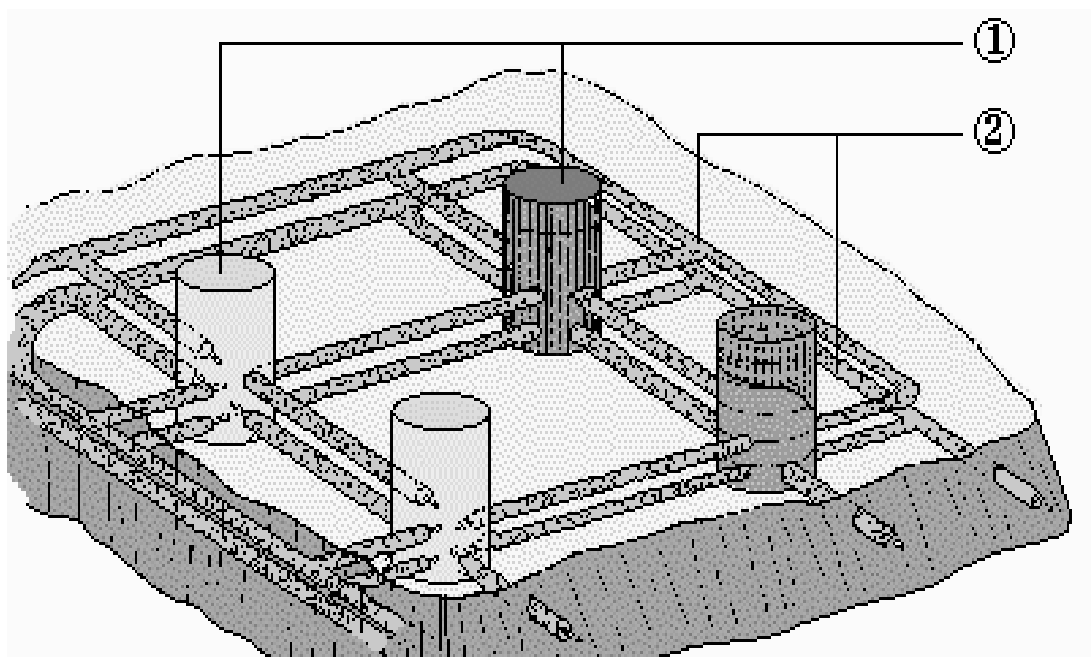
4.2 Δίκτυο πλήρους κλίμακας

Τα στοιχεία τα οποία συλλέχθηκαν κατά το πειραματικό στάδιο οδήγησαν μετά από πολύμηνη επεξεργασία στον σχεδιασμό συστήματος διαχείρισης βιοαερίου πλήρους κλίμακας (full scale), το οποίο αναπτύχθηκε σε έκταση 100 περίπου στρεμμάτων. Η κατασκευή του συστήματος ξεκίνησε τον Αύγουστο του 1991 και περιλαμβάνει υποσύστημα συλλογής βιοαερίου, υποσύστημα μεταφοράς και αντλητικό συγκρότημα με παράλληλη συνεχή καταγραφή των διαφόρων φυσικοχημικών παραμέτρων και φρεάτια ανακύκλωσης διασταλαζόντων.

Η κατασκευή των φρεατίων συλλογής βιοαερίου έγινε κατά στάδια που αντιστοιχούν στα ταμπάνια διάστρωσης των απορριμμάτων τα οποία εξελίσσονται καθ' ύψος. Σε κάθε ταμπάνι διάστρωσης τα φρεάτια συλλογής βιοαερίου κατασκευάζονται με διάτρητες τσιμεντοσωλήνες διαμέτρου 0.60 m, οι οποίες τοποθετούνται κάθετα η μία πάνω στην άλλη ώστε να σχηματισθεί κολώνα ύψους 4-5 m. Στο εσωτερικό των τσιμεντοσωλήνων τοποθετείται σωλήνα τύπου "νεροσώλ", διαμέτρου 4" διάτρητη στο κάτω άκρο σε διάστημα 1.5- 2 m, σιδηροσωλήνας γαλβανισμένος διαμέτρου 1.5" διάτρητος στο κάτω άκρο σε διάστημα 1.5-2 m για τον έλεγχο της στάθμης των διασταλλαζόντων. Στη συνέχεια τα φρεάτια ενώνονταν σε δίκτυο, το οποίο γινόταν με χρήση σωλήνας πολυαιθυλενίου, της οποίας η διάμετρος ποικίλει ανάλογα με την απόσταση του φρεατίου από το σημείο άντλησης και κατέληγαν στο αντλιοστάσιο. Ακολούθησε η προμήθεια και λειτουργία μονάδας ενεργειακής αξιοποίησης του βιοαερίου με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος 240kWh.

4.3 1^η ανάπλαση

Το 2000 ξεκίνησε η 1^η ανάπλαση σε έκταση 120 στρεμμάτων, η οποία περιλάμβανε τη διάνοιξη γεωτρήσεων και την κατασκευή δικτύου συλλογής-μεταφοράς βιοαερίου για την τροφοδοσία της μονάδας ενεργειακής αξιοποίησης των 240 kWh. Επίσης περιλάμβανε την κατασκευή επιφανειακού καλύμματος και τη φυτοτεχνική διαμόρφωση. Παράλληλα κατασκευάστηκε δίκτυο άρδευσης, μετεωρολογικός σταθμός όπως επίσης και σύστημα ελέγχου ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων. Το δίκτυο συλλογής αποτελείται από το κατακόρυφο και οριζόντιο δίκτυο μεταφοράς.



Εικόνα 2: Σύστημα συλλογής βιοαερίου

1- Κατακόρυφα περιμετρικά φρεάτια συλλογής 2- Οριζόντιοι σωλήνες συλλογής (διάτρητοι)

Το κατακόρυφο δίκτυο μεταφοράς αποτελείται από 43 κατακόρυφα πηγάδια βιοαερίου διαμέτρου 1m και βάσης πυθμένα 2m τουλάχιστον από το κάτω όριο του φραγμού. Το οριζόντιο δίκτυο μεταφοράς αποτελείται από σωλήνες οι οποίοι συνδέουν τα πηγάδια βιοαερίου με τους υποσταθμούς ανά ομάδες των δεκατριών πηγαδιών. Η ομαδοποίηση επιλέγεται ώστε να είναι αντιπροσωπευτικό το συλλεγόμενο αέριο ενώ έγινε προσπάθεια να συνδυασθούν πηγάδια υψηλής παραγωγής με χαμηλής ώστε να λαμβάνεται αξιοποιήσιμο μίγμα.

Το βιοαέριο που θα συλλέγεται στα πηγάδια θα μεταφέρεται (αναρροφάται) μέσω του δικτύου μεταφοράς στην υπάρχουσα εγκατάσταση επεξεργασίας, όπου ανάλογα με την ποιότητα του είτε θα καίγεται σε δαυλό καύσης είτε θα αξιοποιείται μέσω ειδικής γεννήτριας βιοαερίου για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Επειδή η ανάμιξη μεθανίου και οξυγόνου συνιστά εκρηκτικό μείγμα, πρέπει να εμποδίζεται αυστηρά οποιαδήποτε εισροή ατμοσφαιρικού αέρα στο δίκτυο μεταφοράς. Για τη συγκέντρωση του βιοαερίου εγκαταστάθηκε στο σταθμό άντλησης μια αντλία αναρρόφησης / συμπίεσης που θα αναρροφά το βιοαέριο και θα το στέλνει είτε στο δαυλό καύσης, είτε στη γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα συλλογής και μεταφοράς βιοαερίου σχεδιάστηκε έτσι ώστε να υπάρχει δυνατότητα επέκτασης του εφόσον αυτό μελλοντικά απαιτηθεί. Για να διαστασιολογηθούν οι αγωγοί της χωματερής θα πρέπει να υπολογιστεί η ποσότητα του βιοαερίου που παράγεται σε κάθε πηγάδι.

4.3 2^η ανάπλαση

Κατά το 2005 ξεκίνησε η 2^η ανάπλαση, η οποία αναπτύχθηκε σε έκταση 190 στρεμμάτων και περιλάμβανε την κατασκευή επιφανειακού καλύμματος, την εγκατάσταση συστήματος συλλογής και μεταφοράς βιοαερίου και τη φυτοτεχνική διαμόρφωση. Αρχικά κατασκευάστηκαν 98 φρεάτια συλλογής βιοαερίου εκ των οποίων όμως μόνο τα 52 συνδέθηκαν (Δεκέμβριος 2006). Παράλληλα λειτουργούσαν και 4-6 φρεάτια από την 1^η ανάπλαση. Η 2^η ανάπλαση ολοκληρώθηκε με την κατασκευή συνολικά 195 φρεατίων με ποσοστό λειτουργίας 60-70%, με απώτερο στόχο να λειτουργήσουν όλα. Το δίκτυο συλλογής έχει την ίδια μορφή με αυτό της 1^{ης} ανάπλασης. Αξίζει να τονισθεί ότι στους υποσταθμούς άντλησης γίνονται δύο φορές την εβδομάδα μετρήσεις της ποιοτικής και ποσοτικής σύστασης του παραγόμενου βιοαερίου από κάθε πηγάδι άντλησης.

Τα σημαντικότερα στοιχεία είναι το ποσοστό του μεθανίου και του οξυγόνου καθώς και η διαφορά πίεσεως μεταξύ του υποσταθμού και του πηγαδιού. Μέσα από αυτές τις μετρήσεις προκύπτουν περαιτέρω συμπεράσματα, που αφορούν τη λειτουργία του δικτύου άντλησης.

Η μονάδα ενεργειακής αξιοποίησης των 240kWh αντικαταστάθηκε από σύγχρονη μονάδα ενεργειακής αξιοποίησης των 5000 kWh. Στα άμεσα σχέδια είναι και η υλοποίηση μια 3^{ης} ανάπλασης στο Χ.Υ.Τ. Α.Τ. Θεσσαλονίκη.

4.4 Ενεργειακή αξιοποίηση

Ο Σταθμός Ηλεκτροπαραγωγής της ΗΛΕΚΤΩΡ ΑΕ στη Θεσσαλονίκη συνολικής ισχύος 5,048 MW, έχει κατασκευαστεί στη θέση Καναλάκι Ταγαράδων του Δήμου Θέρμης, πλησίον του ΧΥΤΑ Ταγαράδων. Με τη λειτουργία του πραγματοποιείται η ενεργειακή αξιοποίηση του παραγόμενου από το ΧΥΤΑ Ταγαράδων βιοαερίου. Η ποσότητα της ενέργειας που παράγεται ικανοποιεί τις ανάγκες μιας μέσης πόλης 80.000 κατοίκων. Υπάρχει σκέψη για ενίσχυση της μονάδας με δύο ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, με απώτερο σκοπό την αύξηση της παραγωγής ισχύος της μονάδας.

Ο σταθμός αποτελείται από τέσσερα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη (H/Z) (μηχανές εσωτερικής καύσης βιοαερίου – γεννήτριες) εγκατεστημένα σε ηχομονωμένα εμπορευματοκιβώτια (containers), συνολικής ισχύος 5,048MW, και όλα τα απαραίτητα βοηθητικά συστήματα και εγκαταστάσεις, όπως συστήματα ασφαλειοδιακοπών, φυσητήρων βιοαερίου, επεξεργασίας και αφύγρανσης βιοαερίου, δεξαμενές λιπαντικών, βοηθητική ντιζελογεννήτρια κ.α.. Η σύνδεσή του με τον Υποσταθμό Σχολαρίου γίνεται μέσω εναέριας διασυνδετικής γραμμής Μέσης Τάσης μήκους 5,3km.

Κατά την καύση του βιοαερίου παράγονται αέρια προϊόντα (κυρίως CO₂), των οποίων η σύ-

σταση και η ποσότητα ελέγχονται συνεχώς κατά τη λειτουργία της μονάδας. Επιπρόσθετα ένα εγκεκριμένο συνεργείο από το κράτος κάθε τέσσερις μήνες πραγματοποιεί ελέγχους και βεβαιώνει την ορθή ή μη λειτουργία της μονάδας.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο χώρος στον οποίο αναπτύχθηκε το πειραματικό δίκτυο ανάκτησης βιοαερίου χαρακτηριζόταν από ομοιόμορφη και υψηλή εκατοστιαία σύσταση σε μεθάνιο. Σε αντίθεση με το πειραματικό δίκτυο στην 1^η ανάπλαση η ποσότητα του παραγόμενου βιοαερίου δεν είναι ικανοποιητική. Αυτό οφείλεται σε ενδεχόμενες κατασκευαστικές αστοχίες. Στη 2^η ανάπλαση υπήρχε καλύτερη τεχνογνωσία και χρησιμοποιήθηκαν σύγχρονες μέθοδοι. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την εντατική παρακολούθηση του συστήματος παραγωγής, διαχείρισης και αξιοποίησης του βιοαερίου οδήγησε σε καλύτερα αποτελέσματα και στην επίτευξη των οικονομικών και περιβαλλοντικών στόχων.

Από τις μετρήσεις που γίνονται διαπιστώνεται η επίδραση της ατμοσφαιρικής πίεσης στην στατική πίεση των πηγαδιών βιοαερίου. Η πτώση της θερμοκρασίας δε φαίνεται να επιδρά άμεσα και ακαριαία στο οικοσύστημα.

Από τις αντλήσεις του βιοαερίου διαπιστώθηκε ανομοιομορφία στη συμπίεση των απορριμμάτων με αποτέλεσμα το βιοαέριο να κινείται σε κανάλια που ήδη υπάρχουν μέσα στα απορρίμματα μην επιτρέποντας προς το παρόν την εκτίμηση της ακτίνας άντλησης. Κρίνεται λοιπόν αναγκαία η μεγαλύτερη συμπίεση των απορριμμάτων σε συνδυασμό με τη χρήση γεωφασμάτων και επιστρώσεων, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των κενών και την παρεμπόδιση εισροής ατμοσφαιρικού αέρα που δρα ανασταλτικά στη μεθανογένεση.

Η αξιοποίηση της θερμογόνου δύναμης του βιοαερίου, το καθιστά μια ανανεώσιμη-ήπια πηγή ενέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, εφόσον συμβάλλει στην εξοικονόμηση συμβατικών καυσίμων.

Σύμφωνα με στοιχεία προκύπτει ότι η μονάδα ενεργειακής αξιοποίησης του βιοαερίου στον Χ.Υ.Τ.Α Ανατολικού Τομέα Θεσσαλονίκης παρουσιάζει κέρδη. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι μία τέτοια μονάδα είναι οικονομικά βιώσιμη και ότι η αξιοποίηση του βιοαερίου παρουσιάζεται ως σημαντική ευκαιρία για επένδυση και για περαιτέρω αύξηση της εκμετάλλευσής του.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Κων/νος Αλιβάνης, Τάτση Αλεξάνδρα, 1991 : *“Παραγωγή και Σύσταση βιοαερίου στο χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων Ανατολικού Τομέα Θεσσαλονίκης”*, Πρακτικά 2^{ου} Συνεδρίου Περιβαλλοντικής Επιστήμης, Μόλυβος Μυτιλήνης, Σεπτέμβριος 1991
- 2) Κων/νος Αλιβάνης, Τάτση Αλεξάνδρα, 1991 : *“Συστήματα Διαχείρισης Βιοαερίου από Χώρους Υγειονομικής Ταφής”*. Πρακτικά 7^{ου} Συνεδρίου Προστασίας Περιβάλλοντος, “Βιομηχανικά Τοξικά Απόβλητα-Αστικά Απορρίμματα”. Τμήμα Χημείας Α.Π.Θ.-Δήμος Θεσσαλονίκης- Goethe Institute, Θεσσαλονίκη σελ. 108-120.
- 3) Σύνδεσμος Ο.Τ.Α., *“Μελέτη 1^{ης} ανάπλασης του Χ.Υ.Τ.Α. Ανατολικού Τομέα Θεσσαλονίκης”*, 1999
- 4) Βατικιώτης Χαρίδημος, Βενέτης Ιωάννης, Χατζηιορδάνη Ιωάννα, Χατζούδης Γρηγόριος, 2008, εργασία εκπαιδευόμενων κατά την πρακτική άσκηση στον ΟΤΑ Μείζονος Θεσσαλονίκης, Πρόγραμμα κατάρτισης “Βιώσιμη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων- Ανακύκλωση Υλικών”.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΝΕΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΛΕΚΤΙΚΗ ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΠΙΣΣΑΣ (ΠΡΟΪΟΝ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ) ΣΕ ΥΔΡΟΓΟΝΟ

*Δόμνα Α. Κωνσταντίνου, Άγγελος Μ. Ευσταθίου**

Εργαστήριο Ετερογενούς Κατάλυσης, Τμήμα Χημείας, Πανεπιστήμιο Κύπρου, Τ. Κ. 20537, CY 1678, Λευκωσία, Κύπρος, e-mail: efstath@ucy.ac.cy

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα ερευνητική εργασία έχει στόχο την ανάπτυξη και μελέτη νέων, χαμηλού κόστους και φιλικών προς το περιβάλλον στερεών καταλυτών για την αντίδραση αναμόρφωσης με ατμό ενός από τα κυριότερα συστατικά της πίσσας (φαινόλη), η οποία παράγεται κατά την αντίδραση αναμόρφωσης και αεριοποίησης με ατμό ή αέρα της βιομάζας-ξύλο προς παραγωγή αερίου μίγματος πλούσιο σε H_2 , και η οποία είναι ανεπιθύμητο προϊόν.

Μελετήθηκαν πέντε φυσικοί ασβεστίτες ως προς την αντίδραση αναμόρφωσης της φαινόλης με ατμό και πραγματοποιήθηκε συσχέτιση της δραστηριότητάς τους με κάποια φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τους. Η συγκέντρωση των μεταλλικών προσμίξεων βρέθηκε να είναι πολύ χαμηλή ($<0.8\%$ κ.β.) και για τα πέντε υπό μελέτη στερεά μετά από μελέτες EDX και XPS. Από τη μελέτη αυτή προέκυψε ότι η δραστηριότητα των ασβεστιτών σχετίζεται άμεσα με τη διαφορετική ενεργότητα των επιφανειακών καταλυτικών κέντρων CaO (site reactivity) και τη ποσότητα προσροφημένου CO_2 στη μονοδοντική του μορφή. Επιπλέον, βρέθηκε ότι η παρουσία υδρογόνου στην τροφοδοσία οδηγεί σε μείωση της μετατροπής της φαινόλης, υποδεικνύοντας τη δέσμευση ενεργών κέντρων του στερεού CaO από το H_2 εμποδίζοντας έτσι τη διασπαστική χημική προσρόφηση του H_2O . Το τελευταίο επιβεβαιώθηκε και από τη διεξαγωγή πειραμάτων *in-situ* DRIFTS CO_2 chemisorption όπου παρατηρήθηκε έντονη μείωση των διττανθρακικών και επιφανειακών $-OH$ ειδών.

Επιπρόσθετα, μελετήθηκε η παρουσία στηριζόμενων καταλυτών Rh σε εμπορικά μεταλλοξείδια του τύπου $Ce_xZr_yM_{(1-x-y)}O_2$ (M : La και Mg) ως προς την αντίδραση αναμόρφωσης της φαινόλης με ατμό προς παραγωγή H_2 . Η μελέτη αυτή οδήγησε στο συμπέρασμα ότι υψηλή επιφάνεια BET, μικρό μέγεθος πρωτογενών σωματιδίων (<12 nm) και υψηλό ποσοστό Ce^{+4} ενισχύουν την εκλεκτικότητα της αντίδρασης προς παραγωγή H_2 .

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

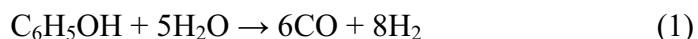
Η αεριοποίηση/πυρόλυση της βιομάζας για παραγωγή εναλλακτικών καυσίμων παρουσιάζει σημαντικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα έναντι των ορυκτών καυσίμων, με κυριότερο αυτό της μηδενικής εκπομπής CO_2 και πολύ χαμηλότερων εκπομπών άλλων αερίων θερμοκηπίου [1]. Μια από τις πλέον αναπτυσσόμενες τεχνολογίες αξιοποίησης της βιομάζας είναι η καταλυτική αεριοποίηση/αναμόρφωση της με ατμό για την παραγωγή μίγματος πλούσιου σε H_2 . Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σήμερα στην Ευρώπη (Güssing, Austria) λειτουργεί η πρώτη μονάδα παραγωγής ισχύος 1.5 MWe με χρήση βιομάζας-ξύλο. Το σημαντικότερο πρόβλημα που παρουσιάζει η τεχνολογία αυτή είναι ο σχηματισμός πίσσας (tar) (π.χ., φράξιμο σωληνώσεων και επικαθήσεις σε εναλλάκτες θερμότητας), όπου στην περίπτωση της βιομάζας-ξύλο κύρια συστατικά της είναι η φαινόλη και το τολουόλιο [2].

Εκτεταμένες μελέτες που αφορούν την καταλυτική αεριοποίηση/αναμόρφωση της βιομάζας με ατμό έδειξαν ότι οι δολομίτες ($MgCO_3 \cdot CaCO_3$) είναι υλικά αρκετά δραστικά για την αναμόρφωση της πίσσας, όπως και οι ασβεστίτες ($CaCO_3$) και ολιβίνες ($(Mg, Fe)_2SiO_4$), υλι-

κά χαμηλού κόστους, τα οποία τα καθιστούν υποψήφιους καταλύτες για εφαρμογή σε αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης, λόγω απώλειας στερεού [3]. Η δυνατότητα επίσης χρήσης φυσικών υλικών χαμηλού κόστους και μη τοξικών ως υποστρώματα πολύ ενεργών καταλυτικών στοιχείων (π.χ., στηριζόμενοι καταλύτες ροδίου (Rh) χαμηλής φόρτισης (0.1-0.5%κ.β.)) για τη διεργασία της αναμόρφωσης της φαινόλης και τολουολίου με ατμό προς παραγωγή H₂ παρουσιάζεται ως μια αρκετά ελκυστική τεχνολογική λύση σε διεργασίες χρήσης αντιδραστήρων σταθερής κλίνης (fixed-bed reactors) [2-4].

Στόχος της παρούσας ερευνητικής εργασίας είναι η μελέτη της αντίδρασης αναμόρφωσης της φαινόλης με ατμό για παραγωγή H₂ παρουσία φυσικών ασβεστιτών διαφορετικής γεωγραφικής προέλευσης και καταλυτών Rh στηριζομένων σε μεταλλοξειδία του τύπου Ce_xZr_yM_(1-x-y)O₂ (M: La και Mg). Οι τεχνικές BET, XRD, CO₂-TPD, TPR-H₂, CO₂-DRIFTS και μετρήσεις αξιολόγησης της καταλυτικής συμπεριφοράς χρησιμοποιήθηκαν για τη συσχέτιση της καταλυτικής ενεργότητας με μερικά από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υπό μελέτη καταλυτικών συστημάτων.

Αξίζει να αναφερθεί ότι ελάχιστες είναι οι βιβλιογραφικές αναφορές χρήσης φυσικών υλικών ή άλλων χαμηλού κόστους μη τοξικών υλικών για παραγωγή υδρογόνου μέσω αναμόρφωσης φαινόλης με ατμό. Κατά τη διεργασία αναμόρφωσης της φαινόλης με ατμό με τη χρήση οξειδίου του ασβεστίου (CaO), το δίκτυο των αντιδράσεων έχει ως εξής:



Σημαντικό πλεονέκτημα αυτών των υλικών (χαμηλό κόστος, μη τοξικότητα, αφθονία) είναι ότι εκτός από την καταλυτική τους δράση (Εξ. (1) και (2)) δρουν και σαν προσροφητές CO₂ (Εξ. 3) με αποτέλεσμα την αύξηση του παραγόμενου H₂ σε ένα μόνο στάδιο [2].

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1. Σύνθεση Μεταλλικά Στηριζομένων Καταλυτών

Η μέθοδος του υγρού εμποτισμού με ελεγχόμενο pH χρησιμοποιήθηκε για τη σύνθεση των στηριζόμενων καταλυτών Rh. Συγκεκριμένα, παρασκευάστηκαν οι καταλύτες: 0.5%Rh/ZrO₂, 0.5%Rh/26%CeO₂-74%ZrO₂, 0.5%Rh/19%CeO₂-79.5%ZrO₂-1.5%MgO₂ και 0.5%Rh/17%CeO₂-78%ZrO₂-5%LaO₂ με τη χρήση εμπορικά διαθέσιμων μεταλλοξειδίων (MEL Chemicals, UK) τα οποία χαρακτηρίζονται για τη θερμική τους σταθερότητα και την αυξημένη ικανότητα αποθήκευσης οξυγόνου. Κατάλληλη ποσότητα του πρόδρομου άλατος Rh(NO₃)₃ (Aldrich) προστέθηκε σε υδατικό διάλυμα ποσότητας των εμπορικών μεταλλοξειδίων. Το προκύπτον διάλυμα παρέμεινε υπό ανάδευση στους 60°C με ταυτόχρονη περιοδική ρύθμιση του pH στη τιμή 9. Το στερεό υπόλειμμα ξηράνθηκε σε φούρνο παρουσία αέρα (12 h) στους 120°C.

2.2. Χαρακτηρισμός Καταλυτών

2.2.1. Μετρήσεις Ειδικής Επιφάνειας (BET) και Περίθλασης Ακτίνων-X

Η μέτρηση της ειδικής επιφάνειας (BET, m²/g) των πέντε ασβεστιτών διαφορετικής γεωγραφικής προέλευσης πραγματοποιήθηκε με φυσική προσρόφηση N₂ στους 77 K (Micromeritics Gemini III Surface Area and Pore size Analyser). Το μέγεθος των κρυσταλλινών (primary crystal size) κάθε ασβεστίτη υπολογίστηκε με βάση μετρήσεις XRD (περίθλασόμετρο Shimadzu 6000 Series) και χρήση της εξίσωσης Scherrer. Για όλες τις παραπάνω μετρήσεις οι ασβεστίτες προκατεργάστηκαν στους 850°C για 2 h υπό ροή αέρα. Όμοιες με-

τρήσεις έγιναν και για τα εμπορικά μεταλλοξείδια μετά την προκατεργασία τους για 5 h στους 750°C.

2.2.2. Τεχνική Θερμοπρογραμματιζόμενης Εκρόφησης (Temperature-Programmed Desorption, TPD) CO₂ και Τεχνική Θερμοπρογραμματιζόμενης Αναγωγής (Temperature Programmed Reduction, TPR)

Τα πειράματα CO₂-TPD και H₂-TPR πραγματοποιήθηκαν σε ειδικά σχεδιασμένο σύστημα ροής αερίων [5] για την εύρεση της συγκέντρωσης των βασικών επιφανειακών κέντρων και για την ποσοτικοποίηση των «ευκίνητων» ειδών οξυγόνου του υποστρώματος, αντίστοιχα. Η μάζα του καταλύτη ήταν 0.5g και η συνολική ροή 30 NmL/min. Η αλληλουχία των βημάτων που ακολουθήθηκαν περιγράφεται ως εξής:

H₂-TPR (για στηριζόμενους καταλύτες): 20%O₂/He (600°C, 2h) → He (25°C, 15 min) → 2%H₂/He (25°C, 5 min) → TPR υπό ροή 2%H₂/He τους 800°C.

CO₂-TPD (για ασβεστίτες): 20%O₂/He (850°C, 2h) → He (25°C) → 2%CO₂/He (25°C, 30 min) → He (25°C, 15 min) → TPD σε He μέχρι τους 800°C.

2.2.3. Φασματοσκοπία Διάχυτης Ανάκλασης με Μετασχηματισμό Fourier (Diffuse Reflectance Infra-Red Fourier Transform Spectroscopy, DRIFTS)

Ο χαρακτηρισμός της δομής των διαφόρων χημικά προσροφημένων ανθρακικών ειδών στους υπό μελέτη ασβεστίτες πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της τεχνικής *in situ* DRIFTS (PerkinElmer, Spectrum GX II). Το δείγμα (~ 30 mg) πυρώθηκε υπό ροή αέρα στους 850°C για 2 h και τοποθετήθηκε σε μορφή σκόνης σε κελί DRIFTS (Harrick, Praying Mantis). Η ροή των αερίων που χρησιμοποιήθηκε ήταν 50 NmL/min. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα προσρόφησης CO₂ με βάση την ακόλουθη αλληλουχία βημάτων:

20%O₂/Ar (600°C, 2h) → ψύξη υπό ροή Ar (25°C) → 2%CO₂/He (25°C, 30 min) ή 2%CO₂/40%H₂O/30% ή 50% H₂/He (600°C, 30 min).

2.3. Καταλυτικές Μετρήσεις

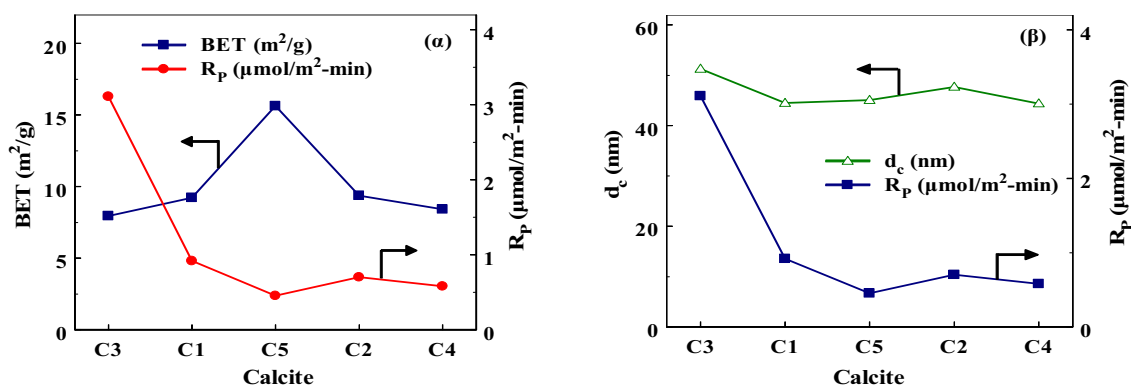
Η πειραματική συσκευή η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της καταλυτικής συμπεριφοράς των υπό μελέτη στερεών έχει περιγραφεί [6]. Η προκατεργασία των υπό μελέτη ασβεστιτών και στηριζομένων καταλυτών έγινε με 20%O₂/He για 2 h στους 850°C και 600°C, αντίστοιχα. Για όλα τα καταλυτικά πειράματα η μάζα του στερεού που χρησιμοποιήθηκε ήταν 0.3g, η συνολική ροή 200 NmL/min, και η σύσταση τροφοδοσίας 0.6%C₆H₅OH/40%H₂O/x%H₂/He (x=0-50mol%).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ και ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Μελέτη Φυσικών Ασβεστιτών

3.1.1. Συσχέτιση Καταλυτικής Ενεργότητας με Ειδική Επιφάνεια (BET) και Μέγεθος Πρωτογενών Κρυσταλλιτών

Στα Σχήματα 1α και 1β παρουσιάζονται συγκριτικά τιμές του ειδικού ολοκληρωτικού ρυθμού μετατροπής της φαινόλης, R_p (μmol C₆H₅OH/m²-min) και της επιφάνειας BET, όπως και του μέσου μεγέθους των πρωτογενών κρυσταλλικών σωματιδίων (primary mean crystal size) του CaO, αντίστοιχα, για τους πέντε υπό μελέτη φυσικούς ασβεστίτες.



Σχήμα 1: Συσχέτιση του ειδικού ολοκληρωτικού ρυθμού μετατροπής της φαινόλης, R_p (μmol C₆H₅OH/m²·min) με (α) την επιφάνεια BET, και (β) το μέσο μέγεθος πρωτογενών κρυσταλλικών σωματιδίων CaO για τους ασβεστίτες, C1-C5. Q=200 NmL/min, W_{κατ.}=0.3 g, T=680°C.

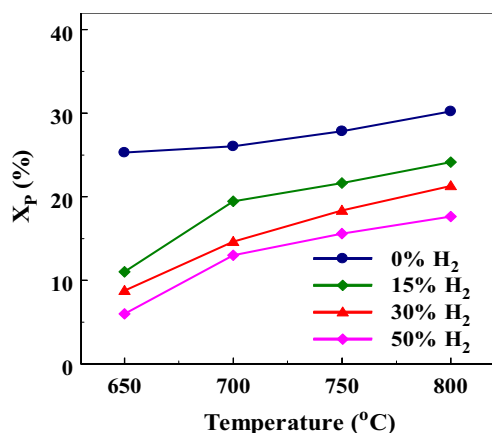
Παρατηρείται η ακόλουθη σειρά καταλυτικής ενεργότητας: C3 >> C1 > C5 > C2 > C4. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά δεν προκύπτει καμία συσχέτιση με την επιφάνεια BET (Σχ. 1α) όπως και με το μέσο μέγεθος κρυσταλλιτών του CaO (Σχ. 1β). Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι η μελέτη των στερεών έγινε μετά από πύρωση τους στους 850°C για 2 h υπό ροή 20%O₂/He όπου και επιτεύχθηκε η λήψη της δομής CaO (XRD, FTIR) [7]. Επιπλέον, βρέθηκε (HRTEM/EDX, XPS) ότι οι πέντε φυσικοί ασβεστίτες περιέχουν πολύ χαμηλό ποσοστό (< 0.8%κ.β.) μεταλλικών προσμίξεων (Si, Mg, Fe, K και Sn) [7, 8]. Τα παραπάνω αποτελέσματα ενισχύουν την άποψη ύπαρξης διαφορετικής ενεργότητας επιφανειακών καταλυτικών κέντρων (site reactivity) σε κάθε στερεό CaO, μέσω της διαφορετικής μορφολογίας και ετερογένειας της επιφάνειάς τους [9].

3.1.2. Καταλυτικές Μετρήσεις - Ασβεστίτης C3

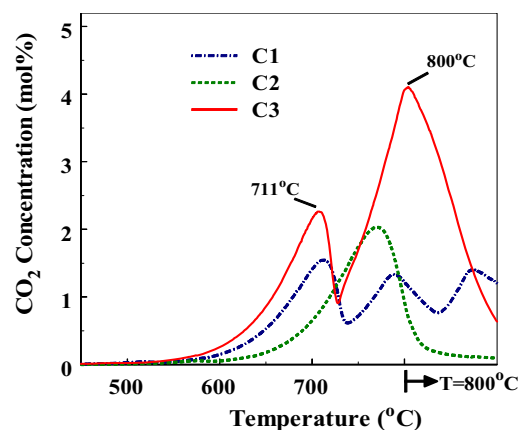
Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η επίδραση της παρουσίας H₂ στην τροφοδοσία στη μετατροπή της φαινόλης (X_p, %) στη θερμοκρασιακή περιοχή 650-800°C για τον ασβεστίτη C3 ο οποίος παρουσίασε την υψηλότερη καταλυτική ενεργότητα (Σχ. 1). Όπως προκύπτει από το Σχήμα 2, η μετατροπή της φαινόλης αυξάνει με αύξηση της θερμοκρασίας αντίδρασης. Στην περίπτωση ύπαρξης H₂ στην τροφοδοσία παρατηρείται σημαντική μείωση της μετατροπής της φαινόλης, ιδιαίτερα στη χαμηλή θερμοκρασιακή περιοχή, 650-700°C. Η συμπεριφορά αυτή υποδεικνύει τη δέσμευση ενεργών κέντρων του καταλύτη από το H₂ εμποδίζοντας έτσι τη διάσπαση H₂O (ανταγωνιστική διασπαστική προσρόφηση σε κέντρα Ca²⁺-O²⁻). Τα παραπάνω αποτελέσματα βρίσκονται σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία [10].

3.1.3. Μελέτες CO₂ - TPD

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται τα προφίλ CO₂-TPD που λήφθηκαν για τους ασβεστίτες C1, C2 και C3. Η σειρά με βάση την εκροφούμενη ποσότητα CO₂ για τους πέντε ασβεστίτες βρέθηκε να είναι: C3 (60.1 μmol/m²) >> C1 (30.0 μmol/m²) > C5 (19.3 μmol/m²) ~ C2 (18.0 μmol/m²) ~ C4 (18.6 μmol/m²). Η σειρά αυτή βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με τη σειρά καταλυτικής δραστηριότητας. Θα μπορούσε να λεχθεί επομένως ότι αύξηση της συγκέντρωσης των επιφανειακών βασικών κέντρων CaO αυξάνει το ρυθμό μετατροπής της φαινόλης (Εξ. (1)-(3)). Να σημειωθεί επίσης ότι για T<700°C ο ρυθμός εκρόφησης CO₂ για τον ασβεστίτη C3 είναι σημαντικά μεγαλύτερος από αυτό των άλλων ασβεστιτών.



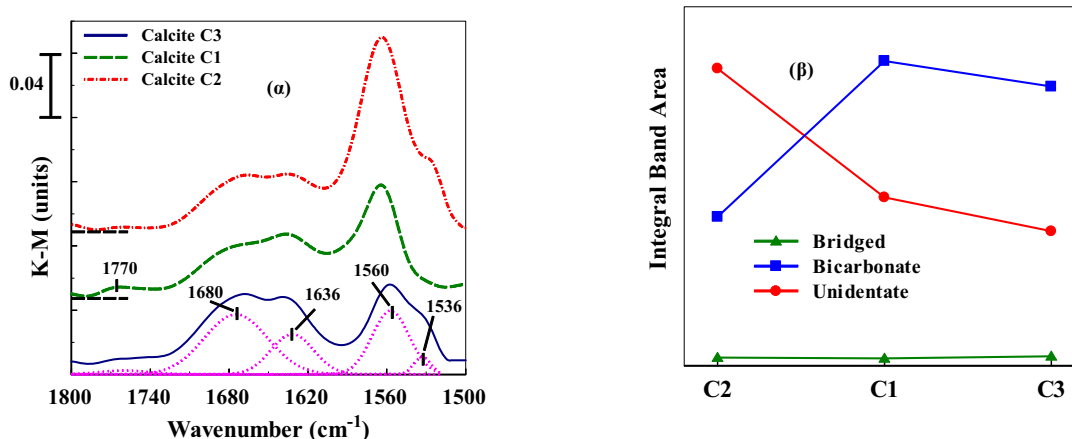
Σχήμα 2: Επίδραση της συγκέντρωσης H₂ στην τροφοδοσία στη μετατροπή της φαινόλης παρουσία του στερεού C3 στη θερμοκρασιακή περιοχή 650-800°C. F=0.6%C₆H₅OH/40%H₂O/x%H₂/He, Q=200mL/min, W_{καταλ.}=0.3 g.



Σχήμα 3: Προφίλ TPD-CO₂ που λήφθηκαν στους ασβεστίτες C1-C3. Συνθήκες προσρόφησης: 2%CO₂/He, 25°C, 30 min.

3.1.4. Μελέτες CO₂-DRIFTS

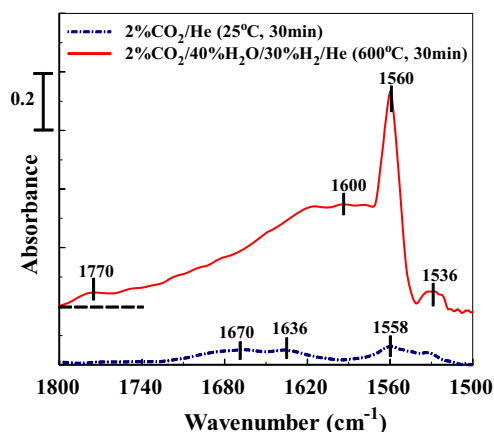
Στο Σχήμα 4α παρουσιάζονται φάσματα *in situ* DRIFTS που λήφθηκαν μετά από 5 min προκατεργασίας των ασβεστιτών C1, C2 και C3 με το μίγμα 2%CO₂/He στους 25°C. Παρατηρείται ο σχηματισμός του γεφυρωτού ανθρακικού είδους (1770 cm⁻¹), δύο διαφορετικών διττανθρακικών ειδών, HCO₃⁻ (1680 και 1636 cm⁻¹) και δύο διαφορετικών μονοδοντικών ανθρακικών ειδών, CO₃²⁻, (1560 και 1536 cm⁻¹) [10]. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η επιφανειακή συγκέντρωση που αντιστοιχεί στο μονοδοντικό είδος (θερμικά σταθερότερο) είναι μεγαλύτερη για το C2 σε σχέση με τα C1 και C3 στερεά (Σχ. 4β). Φάσματα DRIFTS λήφθηκαν επίσης και μετά από 30 min προσρόφησης του μίγματος 2%CO₂/40%H₂O/30%H₂/He στους 600°C για τους ασβεστίτες C1, C2 και C3. Παρατηρήθηκε ότι τα ανθρακικά είδη που σχηματίζονται είναι όμοια με αυτά στη περίπτωση προσρόφησης CO₂ στους 25°C (Σχ. 4α), με την εμφάνιση μιας επιπλέον ζώνης απορρόφησης (1600 cm⁻¹) που αντιστοιχεί σε φορμικά είδη [11].



Σχήμα 4: (α) Φάσματα *in situ* DRIFTS που λήφθηκαν μετά από προσρόφηση CO₂ στους 25°C για τους ασβεστίτες C1, C2 και C3. (β) Εμβαδό των κορυφών που αντιστοιχεί στα τρία κύρια είδη ανθρακικών που σχηματίζονται στην επιφάνεια των ασβεστιτών μετά από αποσυνέλιξη (βλέπε (α)).

Η σύγκριση της καταλυτικής ενεργότητας (Σχ. 1α, β) με τα ανθρακικά είδη που σχηματίζονται στην επιφάνεια κάθε ασβεστίτη (Σχ. 4β) οδηγεί στο συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερη είναι η επιφανειακή συγκέντρωση που αντιστοιχεί στα μονοδοντικά ανθρακικά είδη τόσο χαμηλότερη η ενεργότητα του ασβεστίτη.

Φάσματα DRIFTS λήφθηκαν για το δραστηκότερο ασβεστίτη C3 με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης της παρουσίας υδρογόνου στην τροφοδοσία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Παρουσιάζονται φάσματα μετά από 30 min κατεργασίας του στερεού στους 600°C παρουσία 2%CO₂/He, 2%CO₂/40%H₂O/He, 2%CO₂/40%H₂O/30 ή 50%H₂/He. Παρατηρείται η έντονη μείωση της επιφανειακής κάλυψης των διττανθρακικών ειδών και επιφανειακών -OH (3525cm⁻¹) οδηγώντας στη διαπίστωση ότι το H₂ εμποδίζει τη διάσπαση του H₂O στα ενεργά επιφανειακά κέντρα CaO [12].



Σχήμα 5: Συγκριτικά φάσματα *in situ* DRIFTS μετά από 30 min κατεργασίας του στερεού C3 στους 600°C με 2%CO₂/40%H₂O/30 ή 50%H₂/He.

3.2. Μελέτη Στηριζόμενων Καταλυτών Rh ως προς την Αντίδραση Αναμόρφωσης της Φαινόλης με Ατμό

3.2.1. Χαρακτηρισμός Εμπορικών Μεταλλοξειδίων με τις τεχνικές BET και XRD

Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα εμπορικά μεταλλοξείδια για τη σύνθεση στηριζόμενων καταλυτών Rh με φόρτιση 0.5% κ.β. Οι επιφάνειες BET των στερεών αυτών βρέθηκαν: 17%CeO₂-78%ZrO₂-5%LaO₂=65.3m²/g, 26%CeO₂-74%ZrO₂=63.1m²/g, 19%CeO₂-79.5%ZrO₂-1.5%MgO₂=55.5m²/g και ZrO₂=26.5m²/g. Παρατηρείται ότι το ZrO₂ έχει χαμηλότερη ειδική επιφάνεια σε σχέση με τα μεικτά εμπορικά μεταλλοξείδια. Επομένως, συμπεραίνεται ότι η εισαγωγή ποσοτήτων Ce στο κρυσταλλικό πλέγμα του ZrO₂ παρουσιάζει ευεργετική επίδραση στην επιφάνεια BET.

Με βάση τα περιθλασογράμματα ακτίνων-X που λήφθηκαν και σύμφωνα με τη βάση δεδομένων XRD/ASTM, βρέθηκε η παρουσία της μονοκλινικής και τετραγωνικής δομής του φθορίτη για το στερεό ZrO₂. Στην περίπτωση των μεικτών εμπορικών οξειδίων παρατηρήθηκε επιπρόσθετα η κυβική δομή του φθορίτη που οφείλεται στην ύπαρξη καθαρού CeO₂ [16]. Με χρήση της εξίσωσης Scherrer υπολογίστηκε το μέσο μέγεθος των πρωτογενών κρυσταλλικών σωματιδίων (primary crystal size) μετά από πύρωση των στερεών για 5h στους 750°C. Το μέγεθος των σωματιδίων βρέθηκε: 19%CeO₂-79.5%ZrO₂-1.5%MgO₂=7.2 nm, 26%CeO₂-74%ZrO₂=8.6 nm, 17%CeO₂-78%ZrO₂-5%LaO₂= 11.8 nm και ZrO₂=19.6 nm, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για μικροκρυσταλλικά υλικά (περιοχή μικροκρυσταλλικών 5-20 nm). Επομένως, τα εμπορικά αυτά στερεά είναι θερμικά σταθερά έναντι συσσωμάτωσης. Το τελευταίο αποτελεί σημαντική ιδιότητα των στερεών λόγω των έντονων υδροθερμικών συνθηκών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα ερευνητική εργασία.

3.2.2. Πειράματα Θερμοπρογραμματιζόμενης Αναγωγής

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται τα θερμοκρασιακά προφίλ H₂-TPR που λήφθηκαν για τα υπό μελέτη εμπορικά μεταλλοξείδια. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 6 λαμβάνονται για όλα τα μεταλλοξείδια δύο κορυφές. Η πρώτη κορυφή κοντά στους 300-400°C οφείλεται στην αναγωγή των ατόμων οξυγόνου της επιφάνειας, και η δεύτερη κορυφή κοντά τους 700°C στην αναγωγή των πλεγματικών οξυγόνων. Με βάση τη συνολική ποσότητα H₂ η οποία καταναλώνεται κατά τη διάρκεια του πειράματος H₂-TPR (Σχ. 6) βρέθηκε η πιο κάτω σειρά αναγωγής:

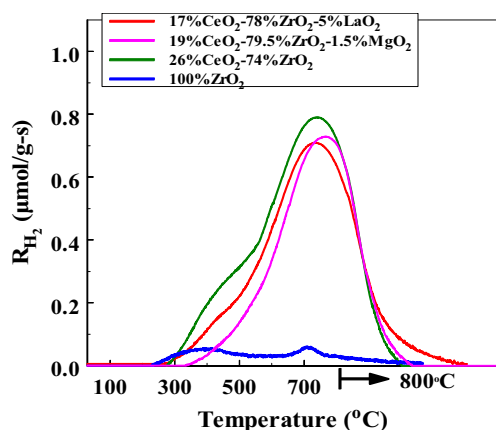
26%CeO₂-74%ZrO₂ (510.2 μmol/g) > 17%CeO₂-78%ZrO₂-5%LaO₂ (503.3 μmol/g) > 19%CeO₂-79.5%ZrO₂-1.5%MgO₂ (431.1 μmol/g) > ZrO₂ (47.8 μmol/g). Η σειρά αυτή βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με τις τιμές της ειδικής επιφάνειας BET κάθε στερεού. Αξίζει να σημειωθεί ότι το στερεό ZrO₂ παρουσίασε τη μικρότερη κατανάλωση H₂ γεγονός που βρίσκεται σε συμφωνία με τη μικρή τιμή BET και τους μεγαλύτερους σε μέγεθος κρυσταλλίτες σε σχέση με τα άλλα υπό μελέτη στερεά.

Όμοια πειράματα πραγματοποιήθηκαν και για τους στηριζόμενους καταλύτες Rh. Στην τελευταία περίπτωση παρατηρήθηκε η εμφάνιση κορυφών και στη χαμηλή θερμοκρασιακή περιοχή 25-300°C, γεγονός το οποίο οφείλεται στην αναγωγή του Rh₂O₃. Η σειρά με βάση την κατανάλωση H₂ βρέθηκε να είναι: 0.5%Rh/17%CeO₂-78%ZrO₂-5%LaO₂ (643.2 μmol/g) > 0.5%Rh/26%CeO₂-74%ZrO₂ (615.4 μmol/g) > 0.5%Rh/19%CeO₂-79.5%ZrO₂-1.5%MgO₂ (500 μmol/g) > 0.5%Rh/ZrO₂ (54.6 μmol/g). Τα αποτελέσματα αυτά αποδεικνύουν ξεκάθαρα ότι η υψηλότερη ειδική επιφάνεια του εμπορικού μεταλλοξειδίου ευνοεί την κατανάλωση H₂ όπως και στην περίπτωση των αποτελεσμάτων του Σχ. 6.

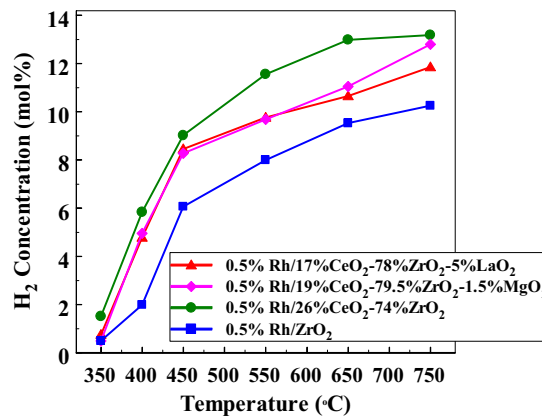
3.2.3. Καταλυτικές Μετρήσεις Στηριζόμενων Καταλυτών Rh

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η συγκέντρωση H₂ (mol%, ξηρή βάση) που λαμβάνεται στην έξοδο του αντιδραστήρα μετά από αντίδραση αναμόρφωσης της φαινόλης με ατμό στη θερμοκρασιακή περιοχή 350-750°C και παρουσία των τεσσάρων υπό μελέτη μεταλλικά στηριζόμενων καταλυτών.

Με βάση τα αποτελέσματα του Σχ. 7 συμπεραίνεται ότι όλα τα καταλυτικά συστήματα παρουσιάζουν σταδιακή αύξηση στην παραγωγή H₂ με αύξηση της θερμοκρασίας. Ο καταλύτης 0.5%Rh/ZrO₂ οδήγησε στην παραγωγή χαμηλότερης ποσότητας H₂ σε σύγκριση με τα υπόλοιπα καταλυτικά συστήματα.



Σχήμα 6: Προφίλ H₂-TPR για τα στερεά εμπορικά μεταλλοξείδια Ce_xZr_yM_(1-x-y)O₂.



Σχήμα 7: Συγκέντρωση παραγόμενου H₂ στη θερμοκρασιακή περιοχή 350-750°C παρουσία στηριζόμενων καταλυτών Rh. F: 0.6%C₆H₅OH/40%H₂O/He, W=0.3 g, F_T=200 NmL/min.

Επιπρόσθετα το καταλυτικό σύστημα 0.5%Rh/26%CeO₂-74%ZrO₂ παρουσίασε την υψηλότερη ποσότητα παραγόμενου H₂ ιδιαίτερα στο υψηλό θερμοκρασιακό εύρος (550-750°C). Όμοια αποτελέσματα λήφθηκαν και για τη μετατροπή της φαινόλης. Οι παραπάνω παρατηρήσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι υψηλή επιφάνεια BET, μικρό μέγεθος πρωτογενών σωματιδίων (<12 nm) και υψηλό ποσοστό Ce⁺⁴ ενισχύουν την εκλεκτικότητα της αντίδρασης ως προς την παραγωγή H₂.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

(α) Η δραστηριότητα των ασβεστιτών ως προς την αντίδραση αναμόρφωσης της φαινόλης με ατμό φαίνεται να σχετίζεται άμεσα με τη διαφορετική ενεργότητα των επιφανειακών καταλυτικών κέντρων CaO (site reactivity) και τη δυνατότητα μικρότερης ποσότητας προσροφημένου CO₂ στη μονοδοντική του μορφή.

(β) Η παρουσία υδρογόνου στην τροφοδοσία οδηγεί σε μείωση της μετατροπής της φαινόλης, υποδεικνύοντας τη δέσμευση ενεργών κέντρων του στερεού CaO από το H₂, εμποδίζοντας με τον τρόπο αυτό τη διασπαστική χημική προσρόφηση του H₂O.

(γ) Πειράματα χημικής προσρόφησης CO₂-DRIFTS έδειξαν το σχηματισμό τριών ανθρακικών ειδών (μονοδοντικό, διττανθρακικού και γεφυρωτό) στην επιφάνεια των ασβεστιτών, ενώ παρατηρήθηκε έντονη μείωση της επιφανειακής συγκέντρωσης των διττανθρακικών ειδών και μείωση των επιφανειακών υδροξυλομάδων (–OH) στην περίπτωση προσρόφησης του CO₂ παρουσία H₂O και 30 ή 50 mol% H₂. Τα αποτελέσματα αυτά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η διασπαστική χημική προσρόφηση H₂ ανταγωνίζεται αυτή του H₂O στην επιφάνεια του CaO στη περιοχή 650-800°C.

(δ) Η χρήση στηριζόμενων καταλυτών Rh σε εμπορικά μεταλλοξείδια του τύπου Ce_xZr_yM_(1-x-y)O₂ (M: La και Mg) οδήγησαν σε υψηλές συγκεντρώσεις παραγόμενου H₂. Επιπλέον, οδήγησαν σε υψηλότερες τιμές μετατροπής της φαινόλης (μέχρι 50% υψηλότερες) σε χαμηλότερες θερμοκρασίες αντίδρασης σε σύγκριση με του φυσικούς ασβεστίτες.

(ε) Η υψηλή επιφάνεια BET, το μικρό μέγεθος πρωτογενών σωματιδίων (<12 nm) και το υψηλό ποσοστό Ce⁺⁴ ενισχύουν την εκλεκτικότητα της αντίδρασης αναμόρφωσης της φαινόλης με ατμό ως προς την παραγωγή H₂.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

- Ευρωπαϊκή Ένωση (6th FP, Contact No. 5183309), “Biomass Fluidized Bed Gasification with in-situ Gas Cleaning”.
- Επιτροπή Έρευνας, Πανεπιστήμιο Κύπρου.
-

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] L.Devi, K.J. Ptasiński, F.J.J.G. Jansen, Biomass Bioenergy 24 (2003) 125.
- [2] European Projects: ENK5-CT-2001-00545 (5th FP); “Biomass Fluidised Bed Gasification with in-situ HotGas Cleaning”, Energy, Environment and Sustainable Development, 6th FP.
- [3] D. Dayton, A Review of the Literature on the Catalytic Biomass Tar Destruction, NREL/TP-510-32815, National Renewable Energy Laboratory, 2002.
- [4] T.A. Milne, N. Abatzoglou, R.J. Evans, Biomass Gasifier Tars: Their Nature, Formation and Conversion, NREL/TP-570-25357, National Renewable Energy Laboratory, USA, 1989.
- [5] C.N. Costa, T. Anastasiadou, A.M. Efstathiou, J. Catal. 194 (2000) 250.
- [6] K. Polychronopoulou, C.N. Costa, A.M. Efstathiou, Appl. Catal. A: Gen. 272 (2004) 37.
- [7] D.A. Constantinou, A.M. Efstathiou, Catal. Today, *in press* (2008).
- [8] D.A. Constantinou, J.L.G. Fierro, A.M. Efstathiou, J. Catal., *to be submitted*, (2008)
- [9] A. A. Davydov, M.L. Shepotko, A. A. Budneva, Catal. Today 24 (1995) 225.
- [10] P.A. Simell, E.K. Hirvensalo, V. Smolander, A.O.I. Krause, Ind. Eng. Chem. Res. 38 (1999) 1250.
- [11] R. Philipp, K. Omata, A. Aoki, K. Fujimoto, J. Catal. 134 (1992) 422.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCMs) – ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ PCM

**Μ. Γρ. Βραχόπουλος, Μ.Κ. Κούκου, Δ.Γ. Σταυλάς,
Β.Ν. Σταματόπουλος και Α.Φ. Γονίδης**

Εργαστήριο Περιβαλλοντικών Ερευνών, Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ιδρυμα
Χαλκίδας, 34400 Ψαχνά Εύβοια e-mail: mvrachop@teiha.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ενεργειακή κρίση που βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη, καθώς και η ανησυχητική επιβάρυνση του περιβάλλοντος με ρύπους, έχει αυξήσει την ανάγκη για αξιοποίηση των ήπιων μορφών ενέργειας. Η ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης (Phase Change Materials, PCMs) στο κέλυφος ενός κτιρίου δείχνει να είναι ένας αρκετά αποδοτικός τρόπος αύξησης της θερμικής του μάζας και βελτίωσης της αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Αυτό θα εξασφαλίσει την αποθήκευση της θερμικής ενέργειας που δημιουργείται από την ηλιακή ακτινοβολία στους τοίχους κατά τη διάρκεια της ημέρας και τη μετέπειτα απελευθέρωση της τη νύχτα, όταν μειωθεί η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Κατά συνέπεια, η θερμοκρασία δωματίου, γενικά, θα έχει μικρότερες διακυμάνσεις, θα είναι συνεχώς εντός των ορίων της ανθρώπινης θερμικής άνεσης και η κατανάλωση ενέργειας θα μειωθεί.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η δυνατότητα ενεργειακής αποθήκευσης με PCM σε διάφορα επίπεδα. Προσδιορίζονται πειραματικά οι θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης ενώ μελετάται πειραματικά και θεωρητικά μια παθητική εφαρμογή τους. Για τον προσδιορισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων ενός συγκεκριμένου PCM εφαρμόζεται μία νέα προσέγγιση, η “μέθοδο του δοχείου”, όπου λαμβάνοντας μια σειρά μετρήσεων και με τη χρήση απλών εξισώσεων, προσδιορίζονται η λανθάνουσα θερμότητα τήξης και η ειδική θερμότητα του υλικού. Με την κατασκευή του πρότυπου θαλάμου (παθητική εφαρμογή) μελετάται η ικανότητα απορρόφησης φορτίων κλιματισμού με τη χρήση των υλικών αλλαγής φάσης. Τέλος, αναπτύσσεται υπολογιστικό μοντέλο το οποίο συγκρίνεται με τις πειραματικές μετρήσεις.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές μελέτες με αντικείμενο την ενεργειακή κατάσταση στη χώρα μας, οι οποίες εκτιμούν ότι η ενεργειακή κατανάλωση θα αυξάνεται με ετήσιο ρυθμό 2.1 % έως το 2010 [1]. Στις προσπάθειες μείωσης του ρυθμού αυτού πιθανότατα να βοηθήσουν τα υλικά αλλαγής φάσης (PCMs) αφού η αποθήκευση θερμότητας με τη χρήση τους αποτελεί έναν από τους πλέον αποτελεσματικούς τρόπους αποθήκευσης θερμικής ενέργειας [2]. Αν και τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί σημαντικά ο ρυθμός εμφάνισης νέων εμπορικών εφαρμογών των υλικών αλλαγής φάσης (PCM), παρατηρούνται σημαντικές ελλείψεις στον τομέα προσδιορισμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων τους. Ο ακριβής προσδιορισμός των ιδιοτήτων των υλικών αλλαγής φάσης αποτελεί θέμα μείζονος σημασίας τόσο για τον κατασκευαστή όσο και για το μηχανικό-χρήστη του προϊόντος καθώς η έλλειψη προτύπων μέτρησης δυσχεραίνει την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται με τις ήδη γνωστές μεθόδους. Οι πλέον γνωστές μέθοδοι προσδιορισμού ιδιοτήτων υλικών είναι η μέθοδος διαφορικής θερμικής ανάλυσης (DTA) [3], η θερμιδομετρία διαφορικής ανίχνευσης (DSC) [4], η T-History [5] και η συμβατική μέθοδος θερμιδομετρίας.

Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται μια νέα μέθοδος, η «μέθοδος του δοχείου» που προσδιορίζει την αποθηκευόμενη θερμότητα υπό ατμοσφαιρική πίεση στερεών, υγρών και υλικών που αλλάζουν φάση (από την στερεή στην υγρή φάση). Σε σχέση με τις παραπάνω μεθόδους, η μέθοδος αυτή είναι μια μέθοδος χαμηλού κόστους και ικανοποιητικής ακρίβειας. Σημαντικά πλεονεκτήματα είναι η απλότητα της κατασκευής της πειραματικής διάταξης, η μέτρηση μεγάλης ποσότητας δείγματος υλικού που απλοποιεί τη διαδικασία εκλογής δείγματος μέτρησης και η εφαρμογή της σε σύνθετα υλικά και σε υλικά που παρουσιάζουν κοκκομετρία. Στο πειραματικό τμήμα της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου με χρήση νερού, χρώματος και εμπορικών PCM. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ικανοποιητική συμφωνία με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας.

Επίσης, στη παρούσα εργασία σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένας πρότυπος θάλαμος PCM στο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Χαλκίδας. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική αυτή διάταξη είναι το GR 27 της εταιρείας Rubitherm [6]. Για τη μέτρηση των θερμοκρασιών στα τοιχώματα του θαλάμου χρησιμοποιήθηκαν θερμοζεύγη τύπου K. Επιπλέον, στα πλαίσια της εργασίας αναπτύχθηκε μονοδιάστατο υπολογιστικό μοντέλο βασισμένο στη μέθοδο του ισοδύναμου c_p . Η πιστοποίηση του μοντέλου έγινε με σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις που ελήφθησαν από τον πρότυπο θάλαμο και παρατηρήθηκε ικανοποιητική συμφωνία. Με βάση τα αποτελέσματα προέκυψε το συμπέρασμα ότι το PCM δε δρα σε μονωτικό υλικό αλλά περισσότερο σε μέσο σταθεροποίησης της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια μίας ημέρας.

2. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ PCM

2.1. Πειραματική διάταξη

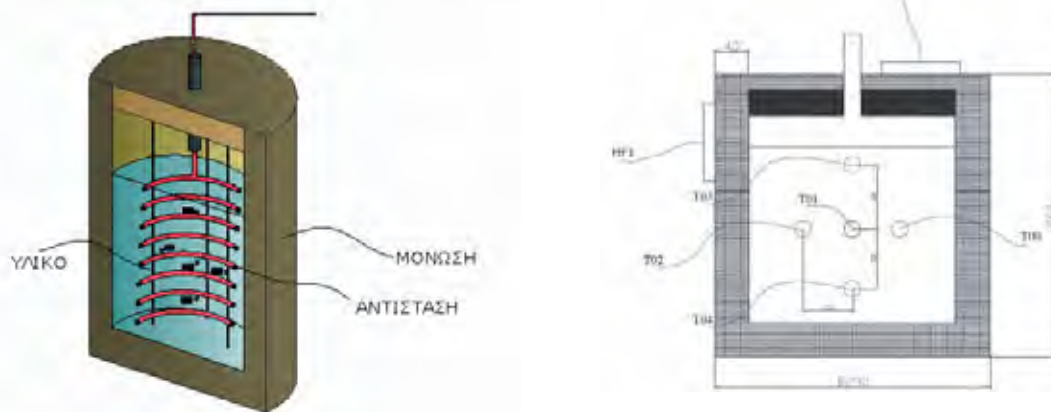
Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται η διάταξη που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε με σκοπό τον πειραματικό προσδιορισμό της θερμοχωρητικότητας υπό ατμοσφαιρική πίεση και της λανθάνουσας θερμότητας τήξης – στερεοποίησης ομογενών υλικών και υλικών σε μορφή κόκκων ανεξαρτήτου κοκκομετρίας όπως π.χ εμπορική παραφίνη και εργοστασιακά υλικά αλλαγής φάσης. Το μεταλλικό δοχείο είναι χωρητικότητας 3,5 lt ύψους 200 mm και εξωτερικής διαμέτρου 150 mm.



Εικόνα 1: Δοχείο μέτρησης

Για τον περιορισμό της συναλλαγής θερμότητας με το περιβάλλον το δοχείο μονώθηκε κατάλληλα με πάπλωμα πετροβάμβακα πάχους 90 mm. Για την προσθήκη θερμότητας στο σύστημα χρησιμοποιήθηκε εμβαπτιζόμενη αντίσταση σιλικόνης χαμηλών θερμοκρασιών, συνολικής ισχύος 75 Watt και μήκους 1,4 m. Η αντίσταση τοποθετήθηκε καθ' ύψος και περιμετρικά του μεταλλικού δοχείου και σταθεροποιήθηκε με τη χρήση κατάλληλων μεταλλικών στηριγμάτων (Σχήμα 1α). Η ισχύς της αντίστασης ρυθμίζεται πλήρως με τη χρήση ροοστάτη τύπου Variac και καταγράφεται μέσω ψηφιακού βατομέτρου. Επιπλέον, για τον υπολογισμό των απωλειών θερμότητας του δοχείου χρησιμοποιούνται δυο θερμορροόμετρα που τοποθετούνται εξωτερικά του δοχείου. Για τη μέτρηση των θερμοκρασιών χρησιμοποιήθηκαν θερμοζεύγη τύπου T τα οποία τοποθετηθήκαν όπως φαίνεται στο Σχήμα 1β. Τα αισθητήρια θερμοκρασίας και θερμορροής συνδέθηκαν σε Data

logger 8 θέσεων. Η καταγραφή των τιμών των θερμοκρασιών και των θερμορροών έγινε με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού.



Σχήμα 1 (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση δοχείου (β) Τοποθέτηση αισθητήρων στο δοχείο

Το προς μέτρηση υλικό εισάγεται στο δοχείο αφού προηγουμένως έχει μετρηθεί σε ογκομετρικό σωλήνα και έχει ζυγιστεί σε ζυγαριά ακριβείας. Δίνεται η επιθυμητή τιμή στο ροοστάτη για τη ρύθμιση της αντίστασης και αρχίζει η καταχώρηση των τιμών των αισθητήριων. Γνωρίζοντας τη θερμοκρασία του δείγματος, την ενέργεια που προσδίδεται και το χρόνο που απαιτείται για δεδομένο θερμοκρασιακό εύρος υπολογίζεται η αποθηκευμένη θερμότητα στο δείγμα σε αισθητή και λανθάνουσα μορφή.

2.2 Υπολογισμός αποθηκευμένης θερμότητας

Για την πραγματοποίηση της μέτρησης κάποιου υλικού ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Γίνεται ρύθμιση της τάσης στα άκρα της αντίστασης μέσω του Variac και μέτρηση της απορροφούμενης ισχύος από την αντίσταση σε (W). Επιπλέον, γίνεται καταγραφή του χρόνου που διαρκεί η μέτρηση. Η διαδικασία υπολογισμού της αποθηκευμένης θερμότητας είναι η εξής: Στην καμπύλη μέσης τιμής θερμοκρασίας δείγματος – χρόνου λαμβάνονται οι δύο τιμές των θερμοκρασιών που καθορίζουν το θερμοκρασιακό εύρος που ενδιαφέρει, ανάλογα με το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής, ο προσδιορισμός της θερμοχωρητικότητας ή της λανθάνουσας θερμότητας. Από το διάγραμμα γίνεται ανάγνωση του χρονικού διαστήματος για την πραγματοποίηση της θερμοκρασιακής μεταβολής. Η εκλυόμενη από την αντίσταση θερμότητα προσδιορίζεται πλέον ως εξής:

$$Q_R = \int_{t_1}^{t_2} P_R \cdot \Delta t \quad (\text{J}) \quad [1]$$

όπου : Q_R : Εκλυόμενη θερμότητα από ηλεκτρική αντίσταση (J), P_R : Ισχύς ηλεκτρικής αντίστασης (W), Δt : Χρονικό βήμα (s)

Αλλά επειδή η ισχύς της ηλεκτρικής αντίστασης είναι σταθερή η [1] γίνεται :

$$Q_R = P_R \cdot \Delta t \quad (\text{J}) \quad [2]$$

Η αποδιδόμενη από την αντίσταση θερμότητα καταναλώνεται ως εξής :

1. Αποθήκευση θερμότητας στο μετρούμενο υλικό
2. Αποθήκευση θερμότητας στο υλικό του δοχείου
3. Αποθήκευση θερμότητας στο υλικό της μόνωσης του δοχείου
4. Απώλειες προς το περιβάλλον

Άρα η θερμότητα που αποθηκεύεται στο υλικό είναι :

$$Q_c = Q_R - m_{\text{δοχείου}} \cdot c_{p \text{ δοχείου}} \cdot \Delta T_{\text{δοχείου}} - m_{\text{μόνωσης}} \cdot c_{p \text{ μόνωσης}} \cdot \Delta T_{\text{μόνωσης}} - h \cdot A_{\text{δοχείου}} \cdot (T_{\text{επιφ}} - T_{\text{περιβ}}) \cdot \Delta t \quad [3]$$

όπου: $m_{\text{δοχείου}}$: μάζα δοχείου (kg), $m_{\text{μόνωσης}}$: μάζα μόνωσης (kg), $C_{p\text{δοχείου}}$: ειδική θερμότητα υλικού δοχείου (J/kg·K), $C_{p\text{μόνωσης}}$: ειδική θερμότητα υλικού μόνωσης (J/kg·K), $\Delta T_{\text{δοχείου}}$: θερμοκρασιακή διαφορά υλικού δοχείου (K), $\Delta T_{\text{μόνωσης}}$: θερμοκρασιακή διαφορά υλικού μόνωσης (K), h : συντελεστής ειδικής συναγωγιμότητας (W/m²K), A : εμβαδό διατομής δοχείου (m²), $T_{\text{επιφ}}$: θερμοκρασία επιφάνειας δοχείου (K), $T_{\text{περιβ}}$: θερμοκρασία περιβάλλοντος (K), Q_R : Εκλυόμενη θερμότητα από ηλεκτρική αντίσταση (J), Q_c : Αποθηκευόμενη θερμότητα στο μετρούμενο υλικό (J)

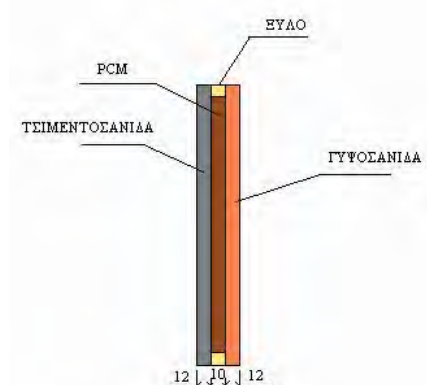
3. ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ PCM

3.1. Κατασκευή πρότυπου θαλάμου PCM

Για τις ανάγκες της πειραματικής διαδικασίας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένας πρότυπος θάλαμος του οποίου οι διαστάσεις είναι 2 m x 2m x 2 m (Εικόνα 2) και τοποθετήθηκε σε θέση τέτοια ώστε να μη δημιουργούνται σκιάσεις από παρακείμενα αντικείμενα. Η κατασκευή του πρότυπου θαλάμου ολοκληρώθηκε σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος αποτελεί η κατασκευή του μεταλλικού σκελετού ενώ το δεύτερο μέρος η κατασκευή της ενισχυμένης τοιχοποιίας με υλικό αλλαγής φάσης και η τοποθέτηση τους επάνω στο μεταλλικό σκελετό.



Εικόνα 2: Πρότυπος θάλαμος PCM



Σχήμα 2: Τομή πάνελ

Ο μεταλλικός σκελετός αποτελείται από ελάσματα σιδήρου τύπου γωνίας, τα οποία συγκολλήθηκαν. Το κάθε πάνελ είχε ύψος 2 m, πλάτος 1 m και πάχος 0.034 m. Όπως διακρίνεται από το Σχήμα 2 το τοίχωμα αποτελείται από τσιμεντοσανίδα και γυψοσανίδα πάχους 12 mm η καθεμία. Για τη δημιουργία του κενού χώρου πάχους ενός εκατοστού, στον οποίο τοποθετήθηκε το υλικό αλλαγής φάσης, χρησιμοποιήθηκαν ξύλινα πηχάκια. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική αυτή διάταξη είναι το GR 27 της εταιρείας Rubitherm. Σε κάθε τέτοιο πάνελ τοποθετήθηκαν 15 kg υλικού, για ολόκληρο το θάλαμο χρειάστηκαν 150 kg, εφ' όσον τοποθετήθηκαν σε κάθε προσανατολισμό δύο τέτοια πανελ.

3.2. Λήψη και καταγραφή δεδομένων

Η λήψη των δεδομένων χωρίστηκε σε δύο επιμέρους τμήματα, ένα για τις θερμοκρασίες και ένα για τις καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν εκτός του θαλάμου κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων. Μετρήσεις ελήφθησαν από το Φεβρουάριο του 2007 έως το Σεπτέμβριο του ίδιου έτους. Για τη μέτρηση των θερμοκρασιών τα 21 συνολικά θερμοστοιχεία (4 ανα πανελ και ένα στο εσωτερικό του θαλάμου) συνδέθηκαν σε τρία modules, τα οποία με τη σειρά τους μετέφεραν τα σήματα σε ένα μετατροπέα, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τον Η/Υ. Ο μετεωρολογικός σταθμός ο οποίος είναι τοποθετημένος σε απόσταση 4 m από το θάλαμο παρείχε τις ενδείξεις της εξωτερικής θερμοκρασίας, της

σχετικής υγρασίας, της ποσότητας της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας, της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου και τέλος της συνολικής διάρκειας ηλιοφάνειας ανά ημέρα. Όλα τα όργανα του μετεωρολογικού ήταν συνδεδεμένα με τον Η/Υ και με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού ήταν δυνατόν να αναγνωσθούν οι ενδείξεις.

3.3. Ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλου

Το υπολογιστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε λύνει το πρόβλημα της μεταβατικής μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Για την ανάπτυξη ενός απλού και αξιόπιστου κώδικα έγιναν συγκεκριμένες παραδοχές όπως: α. σε όλες τις περιπτώσεις θεωρήθηκαν σταθεροί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας, β. οι ιδιότητες των υλικών στην υγρή και στερεή φάση είναι γνωστές ενώ για τη διαφανή περιοχή εφαρμόζονται διάφορες συναρτήσεις (π.χ. γραμμικές, εκθετικές, πολυωνυμικές), κ.ά. Η μερική διαφορική εξίσωση που περιγράφει το πρόβλημα είναι η:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad [4]$$

όπου T , η θερμοκρασία και t , x οι συντεταγμένες στο χρόνο και στο χώρο, ρ , η πυκνότητα, C_p , η ειδική θερμότητα και k η θερμική αγωγιμότητα.

Εφαρμόζονται οι ακόλουθες οριακές συνθήκες:

- 1) Στο εσωτερικό όριο του τοιχώματος του θαλάμου η θερμοροή προσδιορίζεται μέσω συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ίσου με $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ [7] και της θερμοκρασίας του αέρα.
- 2) Στο εξωτερικό όριο του τοιχώματος του θαλάμου η θερμοροή προσδιορίζεται μέσω συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ίσου με $22 \text{ W/m}^2\text{K}$ [8] και της ισοδύναμης θερμοκρασίας ηλίου-αέρα που υπολογίζεται από τη σχέση [8-9]:

$$t_e = t_o + \frac{a \cdot G_T}{h_o} - \frac{\varepsilon \cdot \Delta R}{h_o} \quad [5]$$

όπου t_o , είναι η θερμοκρασία ξηρού βολβού του εξωτερικού αέρα ($^{\circ}\text{C}$), a η απορροφητικότητα (absorptance) της επιφάνειας του εξωτερικού τοιχώματος για την ηλιακή ακτινοβολία, G_T , είναι η συνολική ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2), h_o είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος και συναγωγή στην εξωτερική επιφάνεια ($\text{W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$), ε η ημισφαιρική εκπομπή (emittance) της εξωτερικής επιφάνειας και ΔR είναι η διαφορά ανάμεσα στην ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που προσπίπτει στην επιφάνεια από τον ουρανό και το περιβάλλον και την ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα σε θερμοκρασία αέρα στο εξωτερικό του θαλάμου (W/m^2), a/h_o έχει ληφθεί ίσο με 0.026 για την ξωτερική επιφάνεια του τοιχώματος λευκού χρώματος [8].

Για τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας εφαρμόστηκαν τεχνικές που ακολουθούνται σε περιπτώσεις μεγάλων μεταβολών ή ασυνεχειών [9].

Υπολογισμός του C_p : Η αλλαγή φάσης τροποποιεί τη θερμική συμπεριφορά των υλικών. Αυτή η αλλαγή μπορεί να προσομοιωθεί με χρήση της συνάρτησης της θερμοχωρητικότητας του υλικού σε σχέση με τη θερμοκρασία. Αν αυτή η συνάρτηση είναι γνωστή για το υλικό που μελετάται τότε η διαδικασία των πεπερασμένων διαφορών θα είναι η ίδια με αυτή που εφαρμόζεται σε υλικά που δεν αλλάζουν φάση. Το πρόβλημα εστιάζει στη μέτρηση της καμπύλης $C_p(T)$ για το υλικό που μελετάται και για τα υλικά για τα οποία η καμπύλη αυτή δεν είναι γνωστή αλλά είναι γνωστές η λανθάνουσα θερμότητα και το θερμοκρασιακό διάστημα αλλαγής φάσης. Όταν το σχήμα της καμπύλης δεν είναι γνωστό αλλά είναι γνωστή η λανθάνουσα θερμότητα το πρόβλημα επιλύεται θεωρώντας ειδικά σχήματα της καμπύλης. Στην εργασία ελέγχθηκαν τρία σχήματα της καμπύλης και διαπιστώθηκε ότι έδιναν παρόμοια αποτελέσματα για αυτό χρησιμοποιήθηκε και το απλούστερο αυτό της βηματικής συνάρτησης.

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών (Πίνακας 1) ελήφθησαν απο τη βιβλιογραφία.

Πίνακας 1: Θερμοφυσικές Ιδιότητες Υλικών [6-10]			
ΙΔΙΟΤΗΤΑ ΥΛΙΚΟ	Θερμική Αγωγιμότητα $k \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$	Πυκνότητα $\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	Ειδική Θερμότητα $C_p \left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right)$
Τσιμεντοσανίδα	0.58	1920	0.80
PCM	0.20	750	1.50
Γυψοσανίδα	0.17	800	1.09

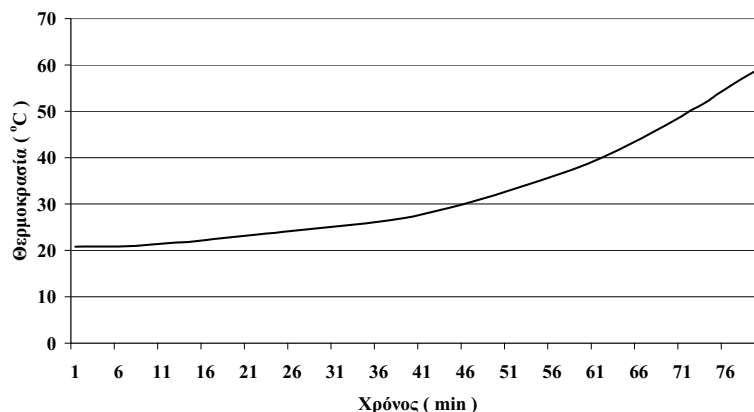
Τέλος, έγινε μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος η οποία υπέδειξε ότι το βέλτιστο μέγεθος πλέγματος αποτελείται από 400 κελιά στη x διεύθυνση ενώ το χρονικό βήμα ήταν 3600s.

4. ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 Μέτρηση θερμοφυσικών ιδιοτήτων PCM

Για την πιστοποίηση της πειραματικής διάταξης διεξήχθησαν αρχικά μετρήσεις διπλά απεσταγμένου νερού. Ακολουθώντας στη συνέχεια τη διαδικασία που αναλύθηκε στην παράγραφο 2.2 υπολογίζεται η ειδική θερμότητα του νερού σε 4.19 kJ/kg·K η οποία έχει πολύ ικανοποιητική συμφωνία σε σχέση με την τιμή 4.18 kJ/kg·K στους 20°C που αναφέρεται στη βιβλιογραφία [11]. Επιπλέον, μετρήθηκε χώμα από τον περιβάλλοντα χώρο του εργαστηρίου, του οποίου η ειδική θερμότητα προσδιορίστηκε στα 0.83 kJ/kg·K. Το PCM που χρησιμοποιήθηκε είναι το GR27 (Σχήμα 3) της εταιρείας Rubitherm, του οποίου η αποθηκευόμενη θερμότητα τήξης προσδιορίστηκε σε 73.3 kJ/kg ενώ ο κατασκευαστής την υπολογίζει σε 72 kJ/kg για θερμοκρασιακό εύρος 20°C έως 35°C [6].

Από την ικανοποιητική συμφωνία που παρατηρείται μεταξύ των πειραματικών δεδομένων, των υπολογιστικών αποτελεσμάτων και των τιμών της διεθνούς βιβλιογραφίας, η μέθοδος κρίνεται αξιόπιστη και με αρκετά καλή ακρίβεια. Το χαρακτηριστικό της προτεινόμενης μεθόδου είναι η ιδιαίτερη απλότητα της κατασκευής σε σύγκριση με τα πολυπλόκωτερα θερμιδόμετρα (calorimeters). Επιπλέον, η μέθοδος αυτή δίνει τη δυνατότητα μέτρησης υλικών σε μορφή κόκκων καθώς η ποσότητα του δείγματος είναι τέτοια ώστε να εγγυάται την ανεξαρτησία από τη διαδικασία λήψης αυτού.



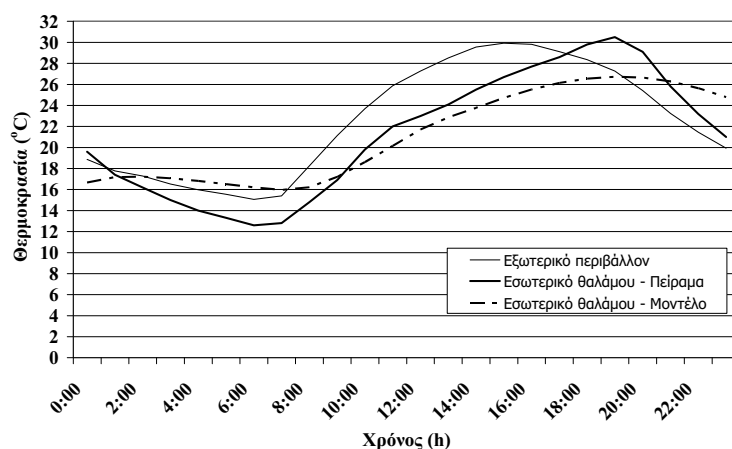
Σχήμα 3: Μέτρηση GR 27 με ρύθμιση της αντίστασης στα 40 Watt

Το φαινόμενο της μη επίτευξης θερμοκρασιακής ισορροπίας που θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως πρόβλημα της μεθόδου υφίσταται και στις μεθόδους που χρησιμοποιούν

θερμιδόμετρα. Για τον περιορισμό του προβλήματος χρησιμοποιούνται χαμηλότεροι ρυθμοί φόρτισης. Το πρόβλημα αυτό στα θερμιδόμετρα εντείνεται εξαιτίας του γεγονότος ότι η μέτρηση της θερμοκρασίας του δείγματος γίνεται από ένα σημείο. Στην περίπτωση της προτεινόμενης μεθόδου εντός του δείγματος παρουσιάζονται μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διαφορές αλλά δίνεται η δυνατότητα μέτρησης της θερμοκρασίας σε πολλά σημεία ταυτόχρονα, παρέχοντας τη δυνατότητα προσδιορισμού μιας μέσης τιμής της θερμοκρασίας με αποτέλεσμα τη μείωση της πιθανότητας σφάλματος. Όσο περισσότερα είναι τα σημεία μέτρησης θερμοκρασίας στο δείγμα τόσο πιο αντιπροσωπευτική είναι η μέση τιμή που προκύπτει για τη θερμοκρασιακή κατάσταση του δείγματος.

4.2 Παθητική εφαρμογή PCM

Στο Σχήμα 4 φαίνεται ότι κατά τη διάρκεια μία τυπικής ημέρας του Μαΐου 2007 η εξωτερική θερμοκρασία αυξάνει προκαλώντας προοδευτικά θέρμανση και τήξη του PCM που απορροφά τα ηλιακά φορτία. Εντούτοις, κατά την περίοδο της τήξης δεν εισέρχεται ροή θερμότητας στο θάλαμο, προκαλώντας μείωση στο ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θαλάμου καθώς και μετατόπιση της μέγιστης θερμοκρασίας κατά σχεδόν τέσσερις ώρες. Το αντίθετο συμβαίνει κατά τη διάρκεια της νύχτας καθώς η θερμοκρασία του αέρα στο εξωτερικό του θαλάμου μειώνεται προκαλώντας προοδευτική ψύξη και στερεοποίηση του PCM που εκλύει την αποθηκευμένη λανθάνουσα θερμότητα. Εντούτοις, κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θαλάμου μειώνεται. Μετά από αυτή την περίοδο τις πρώτες πρωινές ώρες το εξωτερικό θερμικό φορτίο εισέρχεται στο εσωτερικό του θαλάμου με παράλληλη αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του.

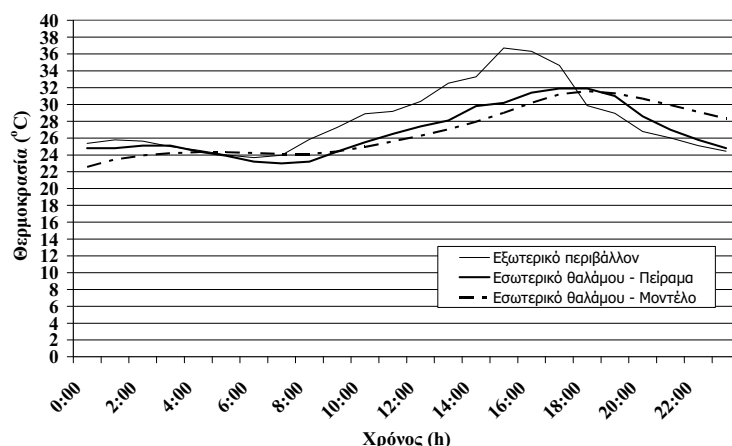


Σχήμα 4: Θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος και πειραματική και αριθμητική εκτίμηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θαλάμου το Μαΐο 2007.

Αρα προκύπτει το συμπέρασμα ότι το PCM δε δρα σα μονωτικό υλικό αλλά περισσότερο σα μέσο σταθεροποίησης της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια μίας ημέρας. Οι ίδιες παρατηρήσεις ισχύουν και για τους υπόλοιπους μήνες με μικρές διαφορές που οφείλονται στις διαφορετικές τιμές των θερμοκρασιών στο εξωτερικό του θαλάμου.

Από τα Σχήματα 4,5 εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι αριθμητικές προβλέψεις είναι σε καλή ποιοτική συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις καθώς προβλέπεται ορθά η τάση στη μεταβολή της θερμοκρασίας. Η ποσοτική συμφωνία κρίνεται ικανοποιητική αν ληφθούν υπόψη τα ακόλουθα: α. Η χρήση μέσης τιμής θερμοκρασίας περιβάλλοντος έτσι ώστε να αποφευχθεί το σφάλμα που παρουσιάζεται εξαιτίας της 24ωρης μεταβολής που είναι διαφορετική κάθε ημέρα καθώς θεωρείται στον κώδικα μία τυπική 24ώρη περίοδος που υπολογίζεται από τη μέση ωριαία τιμή των μετρήσεων. β. Δεν έχουν εισαχθεί

προσανατολισμοί στον κώδικα εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων ακτινοβολίας για κάθε προσανατολισμό. γ. Το κάτω τμήμα του θαλάμου θεωρήθηκε αδιαβατικό. δ. Η χρήση συγκεκριμένων τιμών για το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στο εσωτερικό και στο εξωτερικό του θαλάμου PCM.



Σχήμα 5: Θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος και πειραματική και αριθμητική εκτίμηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θαλάμου το Σεπτέμβριο 2007.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα ερευνητική εργασία χρηματοδοτήθηκε από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (European Social Fund) και Εθνικές πηγές (ΕΠΕΑΕΚ II - Αρχιμήδης II).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. European Union Energy Outlook to 2020, Directorate General for Energy.
2. B. Zalba, J.M. Maran, L.F. Cabeza, H. Mehling, 'Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications', Applied Thermal Engineering 23, 251–283, 2003.
3. Bhuddhi D., Sawhney, R.L., Sehgal, P.N., and N.K. Bansal, 'A simplification of the differential thermal analysis method to determine the latent heat of fusion of phase change materials', J. Phys. D: Appl. Phys., 20, 1601-1605, 1987.
4. Bhadesia H., 'Differential Scanning Calorimetry', University of Cambridge, Materials Science & Technology.
5. Zhang Yinping and Jiang Yi, 'A simple Method- The T- History Method', Meas. Sci. Technol., 10, 201-205, 1999.
6. <http://www.rubitherm.com>
7. Vrachopoulos, M.Gr. Calculation of the thermal properties of building elements under transient heat transfer. PhD thesis, NTUA, 1996.
8. Antonopoulos, K.A. Air Conditioning. Athens, NTUA, 1999.
9. Antonopoulos, K.A. Computational Methods in Transport Phenomena. Athens, NTUA, 1994.
10. <http://www.gypsum.org>
11. Perry, R.H. and Green, D.W., Perry's Chemical Engineers' Handbook (7th Edition) 1997 McGraw-Hill.

ΥΔΡΟΓΟΝΟ - ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

ΜΕΛΕΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Π. Α. Ζέρβας, Χ. Σαρίμβεης, Ι. Α. Παλυβός, Ν. Χ. Μαρκάτος

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών,
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα 157 80,
Τηλ: +30 210 7723235, Fax: +30 210 7723228, Email: pzervas@chemeng.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία, μελετάται μία υβριδική μονάδα ισχύος η οποία συνδυάζει Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) και Τεχνολογίες Υδρογόνου. Ως τελικός καταναλωτής θεωρείται μία τυπική οικία της Μεσογείου. Η μονάδα μπορεί να δώσει λύση στο σύνολο των προβλημάτων που σχετίζονται με τις ΑΠΕ με την ενδιάμεση παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου (χημικής ενέργειας). Αρχικά αναπτύσσεται ένα μοντέλο πρόβλεψης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, το οποίο χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Στη συνέχεια αναπτύσσεται ένα σύστημα βέλτιστης λήψης αποφάσεων με βάση αρχές από τη ρύθμιση προβλεπτικού μοντέλου (Model Predictive Control, MPC), θεωρώντας δεδομένη την κατανομή της ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Μεταβλητές απόφασης του συστήματος αποτελούν η ενέργεια που διατίθεται προς ηλεκτρόλυση και προς πώληση, η ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο, καθώς και η ποσότητα του υδρογόνου που καταναλώνεται στη συστοιχία των κελιών καυσίμου ενώ στόχο του συστήματος αποτελεί η ελαχιστοποίηση της προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο. Οι βέλτιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης υπολογίζονται με την επίλυση ενός προβλήματος Μεικτού Ακέραιου Μη-γραμμικού Προγραμματισμού που διαμορφώνεται και επιλύεται σε κάθε χρονική περίοδο λαμβάνοντας υπόψη και τις πραγματικές τιμές για την κάθε μεταβλητή του συστήματος. Το σύστημα είναι σε θέση να καλύψει έως και 75% της συνολικής απαίτησης σε ενέργεια, αξιοποιώντας με το βέλτιστο δυνατό τρόπο την ηλιακή ενέργεια.

Λέξεις-Κλειδιά: υβριδικό σύστημα, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, υδρογόνο, κελιά καυσίμου, MPC, βελτιστοποίηση

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα πεπερασμένα αποθέματα σε συμβατικά καύσιμα και η ολοένα αυξανόμενη ευαισθητοποίηση σε θέματα προστασίας του περιβάλλοντος έχουν στρέψει ένα μεγάλο μέρος της ερευνητικής δραστηριότητας που σχετίζεται με την παραγωγή και διαχείριση ενέργειας στην αξιοποίηση ήπιων μορφών και τεχνολογιών ενέργειας. Μία από αυτές τις τεχνολογίες είναι και τα κελιά καυσίμου (fuel cells) τα οποία ουσιαστικά αποτελούν χημικές μηχανές που μετατρέπουν το χημικό δυναμικό σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα δύο σημαντικότερα πλεονεκτήματα των κελιών καυσίμου έναντι των συμβατικών μεθοδολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η υψηλότερη απόδοση και η ελαχιστοποίηση των καυσαερίων που αποβάλλονται προς το περιβάλλον. Από την άλλη πλευρά, το σημαντικότερο πρόβλημα που έχει διαφανεί στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των κελιών υδρογόνου είναι η εξασφάλιση του ίδιου του καυσίμου, αφού το υδρογόνο δεν υπάρχει ελεύθερο στη φύση [1].

Μία άλλη πολύ ώριμη τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος που κατηγοριοποιείται ως μία από τις κατεξοχήν ήπιες μορφές ενέργειας, είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (PV), τα

οποία χαρακτηρίζονται από μηδενική εκπομπή καυσαερίων, αλλά επίσης και από χαμηλές αποδόσεις [2]. Το τελευταίο όμως δεν αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα, καθώς η ηλιακή ενέργεια δεν εμπεριέχει κόστος παραγωγής. Το βασικό πρόβλημα στην τεχνολογία αυτή σχετίζεται με τη διαθεσιμότητά της, αφού η ηλιακή ενέργεια δεν είναι πάντα διαθέσιμη, ενώ επίσης δεν είναι εφικτή η ακριβής πρόβλεψη της διαθεσιμότητάς της σε ένα μελλοντικό χρονικό ορίζοντα.

Στην παρούσα εργασία μελετάται μία υβριδική μονάδα ισχύος η οποία αποτελείται από μία συστοιχία PV και τεχνολογίες υδρογόνου. Στη διεθνή βιβλιογραφία μπορούν να βρεθούν διάφορες εργασίες που μελετούν υβριδικά συστήματα ΑΠΕ με τεχνολογίες υδρογόνου οι οποίες βασίζονται σε πειραματικές διατάξεις [3] ή επικεντρώνονται στην προσομοίωση και βέλτιστη λειτουργία παρόμοιων συστημάτων [4-9]. Το σημαντικότερο πλεονεκτήματα της μεθοδολογίας που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία είναι ότι λαμβάνει υπόψη της την μετεωρολογική πρόγνωση σε έναν μελλοντικό χρονικό ορίζοντα και ανανεώνει τακτικά τις αποφάσεις της λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες που είναι διαθέσιμες. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία λήψης βέλτιστων αποφάσεων που αφορούν στην υβριδική μονάδα.

2. PV-FC ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει λεπτομερώς την μελετώμενη υβριδική μονάδα ισχύος:



Διάγραμμα 1 Σχηματική διάταξη της υβριδικής μονάδας PV-FC

Η υβριδική μονάδα ισχύος αποτελείται από τις εξής κύριες διατάξεις: φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV), ηλεκτρολυτική διάταξη (Electrolyser), φιάλες μεταλλικών υδριδίων, κελιά καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) και μετατροπέας DC/AC. Το σύστημα λειτουργεί ως εξής: Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα PV μπορεί είτε να τροφοδοτήσει την ηλεκτρολυτική διάταξη –με σκοπό την παραγωγή υδρογόνου είτε να καλύψει απευθείας τις απαιτήσεις του καταναλωτή. Το παραγόμενο υδρογόνο αποθηκεύεται σε φιάλες υδριδίων των μετάλλων τα οποία συνδέονται σε μία συστοιχία κελιών καυσίμου. Η συστοιχία παράγει ηλεκτρική ενέργεια η οποία χρησιμοποιείται για να καλύψει μέρος ή όλες τις ανάγκες του καταναλωτή. Επιπροσθέτως, το σύστημα δίνει τη δυνατότητα να αγοράσει/πουλήσει ηλεκτρική ενέργεια από/προς το δίκτυο αντίστοιχα.

3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Αρχικά αναπτύχθηκε ένα μοντέλο πρόβλεψης του προφίλ της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το μοντέλο βασίζεται σε ένα νευρωνικό δίκτυο ακτινικής συνάρτησης βάσης που εκπαιδεύτηκε με βάση καταγεγραμμένα

μετεωρολογικά στοιχεία και χρησιμοποιεί ως πληροφορία εισόδου την πρόβλεψη της νεφοκάλυψης (διακριτοποιημένης με τιμές από 1 έως 6) από μετεωρολογικά μοντέλα.[10].

Στη συνέχεια, με βάση την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο και δεδομένα του σημείου στο οποίο είναι εγκατεστημένη η υβριδική μονάδα (γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος κλπ.) προσδιορίζεται η ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και στη συνέχεια η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αυτή. Ενδεικτικά δίνεται η σχέση υπολογισμού της παραγωγής από την PV συστοιχία:

$$PVOut = (0.128 \cdot GSIT - 0.239 \cdot 10^{-3} \cdot T_{amb}) \cdot PVsurface \quad (1)$$

Η ποσότητα αυτή ενέργειας παρέχεται στην ηλεκτρολυτική διάταξη για την παραγωγή του υδρογόνου.

3.1. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΙΣΟΖΥΓΙΩΝ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι δύο κύριες διεργασίες λαμβάνουν χώρα στην ηλεκτρολυτική διάταξη και στα κελιά καυσίμου ενώ οι φιάλες μεταλλικών υδριδίων εξυπηρετούν ως μονάδες αποθήκευσης. Η απόδοση του μετατροπέα επίσης λαμβάνεται υπόψη στην ανάπτυξη των εξισώσεων που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα. Χρησιμοποιώντας τη σήμανση $CS(k)$, $EFG(k)$, $ELIn(k)$, $ELOut(k)$, $ETG(k)$, $FCIn(k)$, $FCOut(k)$, $INVIn(k)$, $INVOut(k)$, $PDir(k)$, $PVOut(k)$, για να δηλώσουμε τις ολοκληρωμένες τιμές των μεταβλητών που εισήχθησαν στο Διάγραμμα 1 κατά τη διάρκεια μίας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου k και την αντίστοιχη σήμανση $Inv(k)$ για το επίπεδο του αποθηκευμένου υδρογόνου στο τέλος της περιόδου k , μπορούμε να γράψουμε τις σχετικές εξισώσεις:

Εξισώσεις που αφορούν στην ηλεκτρολυτική διάταξη και στη συστοιχία κελιών καυσίμου

Οι εξισώσεις που αφορούν στην ηλεκτρολυτική διάταξη και στα κελιά καυσίμου (όπως δίνονται από τους κατασκευαστές) δίνονται παρακάτω:

$$ELIn(k) = 3.348 \cdot ELOut(k) + 1.367 \cdot \ln\left(\frac{ELOut(k)}{104.621}\right) + 3.845E - 5 \cdot ELOut(k)^2 \quad (2)$$

$$FCOut(k) = -0.273E - 9 \cdot FCIn(k)^4 + 7.726E - 7 \cdot FCIn(k)^3 - 0.916E - 3 \cdot FCIn(k)^2 + 1.745 \cdot FCIn(k) \quad (3)$$

Ισοζύγιο μάζας υδρογόνου

Το επίπεδο του αποθηκευμένου υδρογόνου στο τέλος της περιόδου k είναι ίσο με το αποθηκευμένο υδρογόνο στο τέλος της προηγούμενης χρονικής περιόδου συν την ποσότητα του υδρογόνου που παράγεται από την ηλεκτρολυτική διάταξη κατά τη διάρκεια της περιόδου k μείον την ποσότητα του υδρογόνου που καταναλώνεται από τα κελιά καυσίμου κατά τη διάρκεια της ίδιας περιόδου:

$$Inv(k) = Inv(k-1) + ELOut(k) - FCIn(k) \quad (4)$$

Συνολικό ισοζύγιο ηλεκτρικής ενέργειας

Το συνολικό ισοζύγιο ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνει υπόψη του όλες τις διαφορετικές περιοχές του συστήματος όπου ενέργεια παράγεται ή καταναλώνεται. Έτσι, συνδυάζοντας τα ισοζύγια ενέργειας στους κόμβους 1, 2, 3, όπως αυτοί ορίζονται στο Διάγραμμα 1, εξάγουμε την εξίσωση του συνολικού ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας:

$$eff \cdot (PVOut(k) + EFG(k) + FCOut(k) - ELIn(k)) = CS(k) + ETG(k) \quad (5)$$

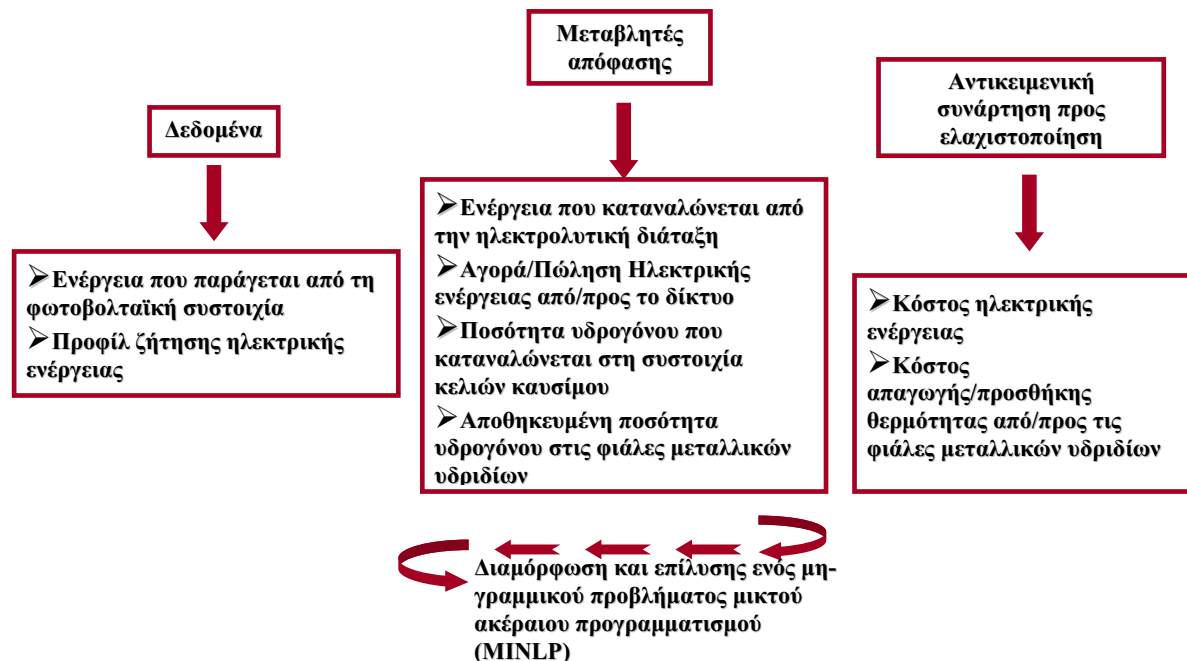
3.2 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η ρύθμιση προβλεπτικού μοντέλου (MPC) έχει αναδειχτεί τα τελευταία χρόνια ως μία πολύ δημοφιλής μεθοδολογία με εφαρμογή σε πλήθος συστημάτων. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που διαμορφώνεται βασίζεται στη διακριτοποίηση του μελλοντικού χρονικού ορίζοντα. Η επίλυση αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης παρέχει τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης για το μελλοντικό χρονικό ορίζοντα. Η υιοθεσία της αρχής του κυλιόμενου χρονικού ορίζοντα ουσιαστικά σημαίνει ότι μόνο οι βέλτιστες τιμές που σχετίζονται με την πρώτη μελλοντική χρονική περίοδο εφαρμόζονται στο σύστημα.

Αντικειμενική συνάρτηση

$$\min \sum_{i=1}^P \left[EFG(k+i) \cdot Cost(k+i) - ETG(k+i) \cdot Price(k+i) \right] + InvU(k+i) \cdot CostCool + InvD(k+i) \cdot CostHeat \quad (6)$$

Η Εξ.(6) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση η οποία ουσιαστικά αντιπροσωπεύει το κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια του μελλοντικού χρονικού ορίζοντα μείον το αντίστοιχο κέρδος από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει επίσης υπόψη το κόστος απαγωγής της θερμότητας από τα υδρίδια των μετάλλων κατά τη διάρκεια της πλήρωσής τους με υδρογόνο (CostCool) και το κόστος θέρμανσης αυτών κατά την εξαγωγή του υδρογόνου αντίστοιχα (CostHeat). Η διαμόρφωση του προβλήματος βελτιστοποίησης παρουσιάζεται γραφικά στο Διάγραμμα 2.



Διάγραμμα 2 Διαμόρφωση του προβλήματος βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκε στην υβριδική μονάδα PV-FC

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

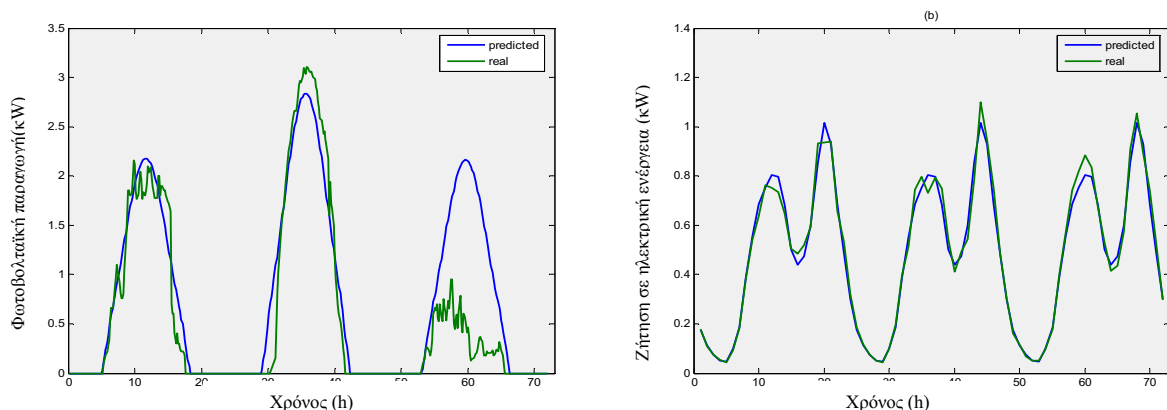
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης που αφορούν στην εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας για τη βέλτιστη λειτουργία μίας υβριδικής μονάδας ισχύος με αποθήκευση υδρογόνου, η οποία χρησιμοποιείται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μίας τυπικής οικίας που βρίσκεται στην Αθήνα. Οι μελλοντικές προβλέψεις για την ενέργεια που παράγεται από τη συστοιχία PV βασίζονται στο μοντέλο πρόβλεψης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που αναφέρθηκε παραπάνω [9, 10].

Το κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι 0.09 €/kWh ενώ το κέρδος από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο θεωρείται ίσο με 0.05 €/kWh. Ένα κάτω όριο ίσο με 1Nm^3 επιβάλλεται στο αποθηκευμένο υδρογόνο. Εξαιτίας του γεγονότος ότι χρησιμοποιούμε φιάλες μεταλλικών υδριδίων μικρών μεγεθών στις προσομοιώσεις μας, το κόστος παραγωγής ή προσθήκης θερμότητας στις φιάλες θεωρείται αμελητέο και έτσι οι παράμετροι *CostCool* και *CostHeat* θέτονται ίσοι με μηδέν. Τα χαρακτηριστικά του μελετώμενου υβριδικού συστήματος φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 Χαρακτηριστικά υβριδικού συστήματος PV-FC

Σενάριο	
Συστοιχία PV	4 kW _p
Ηλεκτρολυτική διάταξη	0.25 Nm ³ /h
Συστοιχία κελιών καυσίμου	1.2 kW
Φιάλες μεταλλικών υδριδίων	5 Nm ³

Μία βασική θεώρηση σε πολλές εργασίες είναι ότι τα χρονικά προφίλ των μεταβλητών εισόδου (δηλαδή των *PVOut* και *CS*) είναι ντετερμινιστικά, δηλαδή οι πραγματικές τους τιμές συμπίπτουν απόλυτα με τις προβλέψεις καθ' όλη τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα. Προφανώς, τέλεια πρόβλεψη δεν μπορεί να επιτευχθεί σε πραγματικές εφαρμογές. Με σκοπό να διερευνηθεί μία εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες, δημιουργήσαμε τροποποιημένα χρονικά προφίλ στη μεταβλητή *CS* εισάγοντας ένα θόρυβο στις διαθέσιμες προβλέψεις ενώ για τη μεταβλητή *PVOut* χρησιμοποιήσαμε τα πραγματικά προφίλ όπως έχουν καταγραφεί σε τρεις διαδοχικές ημέρες τον Οκτώβριο [11].



Διάγραμμα 3 Πραγματικά και προβλεπόμενα χρονικά προφίλ για (a) *PVOut* και (b) *CS*

Δεδομένων των διαφορών μεταξύ των πραγματικών και των προβλεπόμενων τιμών των προφίλ των *PVOut* και *CS*, αναδεικνύεται μία προφανής ερώτηση: Πώς θα μπορούσε αυτή η ανακολουθία να μειώσει την απόδοση της στρατηγικής βέλτιστων αποφάσεων που αποκτήθηκε ως λύση από το ντετερμινιστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης; Για να απαντηθεί αυτό το ερώτημα, θεωρούμε τα πραγματικά χρονικά σήματα των μεταβλητών *PVOut* και *CS* στη θέση αυτών που είχαν προκύψει από τα προβλεπτικά μοντέλα. Κατά τη διάρκεια κάθε χρονικής περιόδου, επιπλέον έλλειμμα ενέργειας καλύπτονταν αγοράζοντας από το δίκτυο ενώ πιθανό πλεόνασμα ενέργειας πωλείτο στο δίκτυο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με πράσινες γραμμές στο Διάγραμμα 4. Οι ποσότητες ενέργειας που αγοράζονται από το δίκτυο η πωλούνται σε αυτό για όλο το χρονικό ορίζοντα, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 και συγκρίνονται με εκείνες που προέκυψαν όταν είχε θεωρηθεί μηδενικός θόρυβος. Είναι εμφανές ότι και οι δύο ποσότητες είναι σημαντικά μεγαλύτερες όταν λαμβάνονται υπόψη οι πραγματικές τιμές των χρονικών προφίλ των μεταβλητών *PVOut* και *CS*. Το συνολικό κόστος

(η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης) αυξάνεται σημαντικά (160%). Αυτή η παρατήρηση ουσιαστικά οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η απόδοση μειώνεται όταν ο σχεδιασμός που προκύπτει από την επίλυση του ντετερμινιστικού προβλήματος βελτιστοποίησης εφαρμόζεται σε πραγματικές καταστάσεις που εμπεριέχουν χρονικά προφίλ με θόρυβο των μεταβλητών *PVOut* και *CS*.

Στο υπόλοιπο της ενότητας θα διερευνήσουμε τα οφέλη της εφαρμογής της αρχής του κυλιόμενου χρονικού ορίζοντα για τη βελτίωση της στρατηγικής αποφάσεων που έχει αναπτυχθεί μέχρι στιγμής. Η φιλοσοφία του κυλιόμενου χρονικού ορίζοντα βασίζεται στο γεγονός ότι κάθε διακριτή χρονική στιγμή, η διαμόρφωση του προβλήματος βελτιστοποίησης μπορεί να ανανεωθεί με τις πραγματικές τρέχουσες συνθήκες που επικρατούν στο σύστημα (ποσότητα του αποθηκευμένου υδρογόνου) καθώς επίσης και με πιο αξιόπιστες προβλέψεις που αφορούν στα μελλοντικά *PVOut* και *CS* χρονικά προφίλ. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, θεωρούμε ότι κάθε χρονική στιγμή γνωρίζουμε τις πραγματικές τιμές των *PVOut* και *CS* μόνο για την επόμενη χρονική περίοδο, ενώ για τον υπόλοιπο χρονικό ορίζοντα συνεχίζουμε να χρησιμοποιούμε τις αρχικές προβλέψεις αυτών.

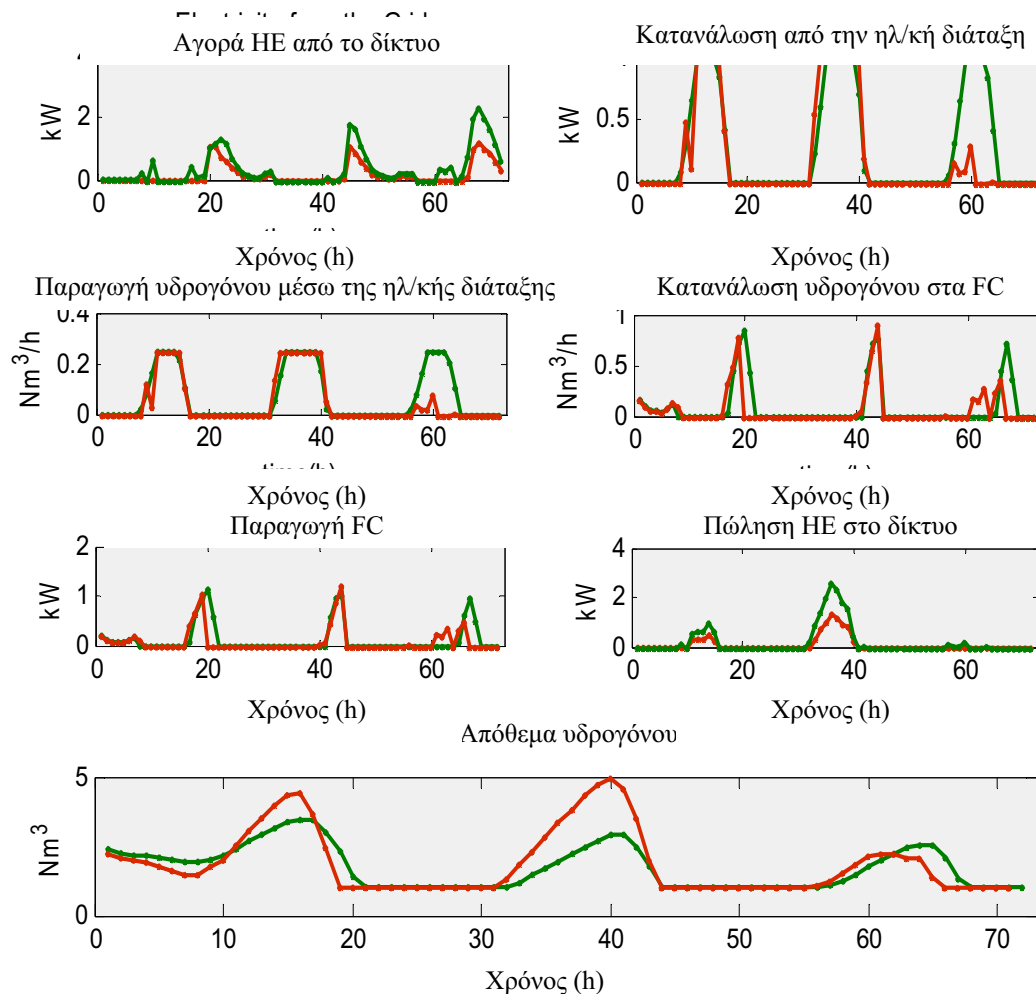
Πίνακας 2 Αγορά/Πώληση ηλεκτρικής ενέργειας και τιμή αντικειμενικής συνάρτησης χρησιμοποιώντας ντετερμινιστικό σχεδιασμό καθώς και τη στρατηγική ανανέωσης αποφάσεων το υβριδικό σύστημα

	Συνολική ενέργεια από το δίκτυο (kWh)	Συνολική ενέργεια προς το δίκτυο (kWh)	Αντικειμενική συνάρτηση (€)
Ντετερμινιστικός σχεδιασμός χρησιμοποιώντας τις προβλέψεις για τα χρονικά προφίλ των <i>PVOut</i> και <i>CS</i>	9.7808	4.9563	0.63
Ντετερμινιστικός σχεδιασμός χρησιμοποιώντας τα πραγματικά χρονικά προφίλ των <i>PVOut</i> και <i>CS</i>	27.8317	17.2793	1.64
Στρατηγική ανανέωσης αποφάσεων χρησιμοποιώντας τα πραγματικά χρονικά προφίλ των <i>PVOut</i> και <i>CS</i>	13.2176	7.9778	0.79

Ακολουθώντας την προαναφερθείσα διαδικασία ανανέωσης των πληροφοριών που εισάγονται στο σύστημα, το ολοκληρωμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης επαναδιαμορφώνεται και επιλύεται στην αρχή κάθε χρονικής περιόδου. Η βέλτιστη στρατηγική αποφάσεων που προκύπτει από την εφαρμογή της φιλοσοφίας του κυλιόμενου χρονικού ορίζοντα, απεικονίζεται με κόκκινες γραμμές στο Διάγραμμα 4, όπου μπορούμε να τη συγκρίνουμε με την αντίστοιχη στρατηγική που προέκυψε από την επίλυση του ντετερμινιστικού προβλήματος (απεικονίζεται με πράσινες γραμμές).

Παρατηρούμε ελαφρές τροποποιήσεις στο σχεδιασμό λειτουργίας της ηλεκτρολυτικής διάταξης για τις δύο πρώτες ημέρες και σημαντικές διαφοροποιήσεις κατά τη διάρκεια της τρίτης ημέρας. Για το σύστημα των κελιών καυσίμου, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές, οι οποίες οδηγούν σε ένα αρκετά διαφορετικό χρονικό προφίλ του αποθηκευμένου υδρογόνου και σε μειωμένες ποσότητες αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας (βλ. Πίνακας 2). Το συνολικό κόστος είναι αρκετά κοντά σε αυτό που υπολογίστηκε μέσω της χρήσης των προβλέψεων και όχι των πραγματικών τιμών για τα χρονικά προφίλ των μεταβλητών *PVOut* και *CS* (παρατηρείται μία αύξηση μόνο 25%). Είναι επίσης χρήσιμο να συγκρίνουμε αυτό το αποτέλεσμα με το κόστος κάλυψης όλων των ενεργειακών αναγκών αγοράζοντας από το δίκτυο, το οποίο είναι 3.16€ (δηλαδή μόνο 25% των αναγκών του καταναλωτή καλύπτεται αγοράζοντας ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο). Έτσι, η υιοθέτηση της αρχής του

κυλιόμενου χρονικού ορίζοντα μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση του υβριδικού συστήματος σε πραγματικές εφαρμογές όπου οι μεταβλητές $PVOut$ και CS προφανώς εμπεριέχουν σφάλματα.



Διάγραμμα 4 Ντετερμινιστικός σχεδιασμός και στρατηγική ανανέωσης αποφάσεων με τις πραγματικές τιμές των προφίλ των $PVOut$ και CS (Ο ντετερμινιστικός σχεδιασμός και η στρατηγική ανανέωσης αποφάσεων απεικονίζονται με πράσινο και κόκκινο χρώμα αντίστοιχα)

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας MPC για τη βέλτιστη λήψη αποφάσεων σε ένα υβριδικό σύστημα ΑΠΕ – τεχνολογιών υδρογόνου συνοψίζονται παρακάτω:

- Πρόβλεψη της ηλεκτρικής ενέργειας από την PV συστοιχία
- Ανάπτυξη ενός μοντέλου που περιγράφει ρεαλιστικά τη λειτουργία και τους περιορισμούς του συστήματος
- Διαμόρφωση και επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης πραγματικού χρόνου το οποίο χρησιμοποιείται ως εργαλείο για τη βέλτιστη λήψη αποφάσεων που αφορούν στη λειτουργία του συστήματος.

Συμπερασματικά το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να αποδειχτεί εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο για τη βέλτιστη λήψη αποφάσεων που αφορούν σε υβριδικά συστήματα που

συνδυάζουν ΑΠΕ με τεχνολογίες υδρογόνου. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε υβριδικό σύστημα που περιλαμβάνει ΑΠΕ (ή και σε συνδυασμό με κάποιες συμβατικές τεχνολογίες όπως κινητήρες ντίζελ) και αποθήκευση υδρογόνου (ή γενικά κάποια αποθηκευτική διάταξη όπως συσσωρευτές).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Larminie J, Dicks A, 'Fuel Cell Systems Explained -2nd edition-', John Wiley & Sons Ltd, New York, 2003.
2. Duffie, J.A., Beckman, W.A., 'Solar Engineering on Thermal Processes -3rd edition-', John Wiley & Sons Ltd, New York, 2006.
3. Gazey, R., Salman, S.K., Aklil-D'Halluin, D.D., 'A field application experience of integrating hydrogen technology with wind power in a remote island location', Journal of Power Sources 157 (2006) 841–8.
4. Santarelli, M., Macagno, S., 'A thermoeconomic analysis of a PV-hydrogen system feeding the energy requests of a residential building in an isolated valley of the Alps', Energy Conversion and Management 45 (2004) 427–451.
5. Iqbal, M.T., 'Simulation of a small wind fuel cell hybrid energy system', Renewable Energy 28 (2003) 511–522.
6. Ntziachristos, L., Kouridis, C., Samaras, Z., Pattas, K., 'A wind-power fuel-cell hybrid system study on the non-interconnected Aegean islands grid', Renewable Energy 30 (2005) 1471–1487.
7. Kelouwani, S. Agbossou, K., Chahine, R., 'Model for energy conversion in renewable energy system with hydrogen storage', Journal of Power Sources 140 (2005) 392–399.
8. Jun-Hai Shi,y, Xin-Jian Zhu and Guang-Yi Cao, 'Design and techno-economical optimization for stand-alone hybrid power systems with multi-objective evolutionary algorithms', Int. Journal of Energy Resources. 31 (2007) 315–328.
9. Zervas, P.L., Sarimveis , H., Palyvos, J.A, Markatos, N.C, 'Model-based Optimal Control of a Hybrid Power Generation System consisting of Photovoltaic Arrays and Fuel Cells', Journal of Power sources 185 (2008) 345-355.
- 10.Zervas, P.L., Sarimveis , H., Palyvos, J.A, Markatos, N.C, 'Prediction of Daily Global Solar Irradiance Surfaces Based on Neural-Network Techniques', Renewable Energy, 33 (2008) 1796-1803.
- 11.<<http://www.chemeng.ntua.gr/solarlab/THERMIE-en.html>> 'THERMIE Project'.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

*Δ. Ιψάκης^{1,2}, Γ. Βεζυράκης³, Κ. Κωνσταντίνου³, Γ. Γιαννακούδης³,
Α. Ι. Παπαδόπουλος¹, Χ. Ζιώγου¹, Σ. Βουτετάκης¹, Π. Σεφερλής³*

¹ Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διεργασιών (Ι.Τ.ΧΗ.Δ), Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (Ε.Κ.Ε.Τ.Α.), Τ.Θ. 60361, 57001 Θέρμη, Θεσσαλονίκη.

² Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τ.Θ. 1517, 54124, Θεσσαλονίκη

³ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τ.Θ. 484, 54124, Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας εργασίας αποτελεί ο βέλτιστος σχεδιασμός και η λειτουργία ενός συνδυασμένου συστήματος παραγωγής ενέργειας που βασίζεται στην εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε.). Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από φωτοβολταϊκά στοιχεία και ανεμογεννήτριες για την κάλυψη ενός σταθερού φορτίου. Λόγω όμως της μεγάλης διακύμανσης που παρουσιάζουν οι τιμές της ηλιοφάνειας και κυρίως της ταχύτητας του ανέμου, απαιτείται η παρουσία ενός συσσωρευτή για την αντιστάθμιση των συνεχών αυτών διακυμάνσεων. Επίσης, προτείνεται η ύπαρξη ενός φορέα αποθήκευσης ενέργειας όπου θα χρησιμεύει για την κάλυψη μακροπρόθεσμων αναγκών του συστήματος. Αυτός ο φορέας ενέργειας είναι το υδρογόνο που παράγεται από την περίσσεια ενέργειας μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού, αποθηκεύεται σε δοχεία πίεσης και χρησιμοποιείται σε κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ενέργειας σε περίπτωση ελλείμματος. Στην συγκεκριμένη εργασία, θα παρουσιασθούν δύο βασικές στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας (ΣΔΕ) που έχουν εφαρμοσθεί σε ήδη υπάρχουσα μονάδα. Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων των ΣΔΕ υπολογίζονται ώστε να επιτευχθεί το ελάχιστο κόστος λειτουργίας του συστήματος με ταυτόχρονη προστασία των επιμέρους συσκευών από ανεπιθύμητες συνθήκες λειτουργίας. Το πρόβλημα σχεδιασμού περιλαμβάνει συνεχείς και διακριτές σχεδιαστικές μεταβλητές και επιλύεται με τεχνικές προσομοιωμένης απόπτησης (simulated annealing).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το υδρογόνο αποτελεί τον ενεργειακό φορέα του μέλλοντος. Η μη ύπαρξη του αυτούσιου στην φύση, απαιτεί την παραγωγή του από άλλες πηγές όπως είναι το νερό. Η ηλεκτρόλυση όμως του νερού, απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας που μόνο συστήματα εκμετάλλευσης Α.Π.Ε. μπορούν να παρέχουν με τρόπο οικονομικό και φιλικό προς το περιβάλλον [1, 2]. Για τη δημιουργία ενός αυτόνομου συστήματος παραγωγής ενέργειας, προτείνεται η παρουσία υποσυστημάτων εκμετάλλευσης Α.Π.Ε., όπως φωτοβολταϊκά στοιχεία και ανεμογεννήτριες, η παρουσία συσσωρευτών για την κάλυψη βραχυπρόθεσμων αναγκών, καθώς και η παρουσία ενός υποσυστήματος για μακροπρόθεσμες ανάγκες βασισμένο στην παραγωγή υδρογόνου.

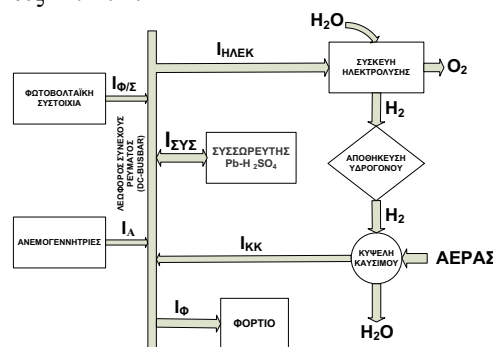
Τα μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν την λειτουργία των υποσυστημάτων έχουν παρουσιασθεί στα [1-3], όπου είναι δυνατή η προσομοίωση της λειτουργίας των υποσυστημάτων ξεχωριστά. Για την σύνδεση όμως των υποσυστημάτων, απαιτείται η ύπαρξη αλγορίθμων διαχείρισης ενέργειας που βασίζονται στην παρακολούθηση της κατάστασης φόρτισης (State-of-Charge, SOC) του συσσωρευτή [1, 2, 4, 5]. Κύριος στόχος του συστήματος διαχείρισης ενέργειας αποτελεί η προστασία των υποσυστημάτων από

υπερβολική και συχνά διακοπτόμενη χρήση καθώς και η παρακολούθηση του αποθηκευμένου υδρογόνου. Στρατηγικές βελτιστοποίησης της διαχείρισης λειτουργίας παρουσιάστηκαν στα [6, 7], με αντικειμενικό σκοπό την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής όλης της μονάδας καθώς και τη μείωση του κόστους λειτουργίας.

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται μία συνολική διαδικασία βέλτιστου σχεδιασμού και λειτουργίας του ολοκληρωμένου συστήματος παραγωγής ενέργειας από Α.Π.Ε. με ταυτόχρονη αποθήκευση και χρήση υδρογόνου. Αρχικά, παρουσιάζονται δύο βασικοί αλγόριθμοι λειτουργίας (στρατηγική διαχείρισης ενέργειας, ΣΔΕ) που επιλέγουν τη λειτουργία του ηλεκτρολυτικού κελιού και της κυψέλης καυσίμου με βάση την παρακολούθηση του SOC του συσσωρευτή. Το κάτω όριο, SOC_{min} , υπαγορεύει τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου σε περίπτωση ελλείμματος ενέργειας από τις Α.Π.Ε., ενώ το άνω όριο, SOC_{max} , τη λειτουργία της συσκευής ηλεκτρόλυσης σε περίπτωση περίσσειας ενέργειας από Α.Π.Ε.. Μία ζώνη υστέρησης εφαρμόζεται σε αυτά τα όρια με στόχο την προστασία των συσκευών από υπερβολική και διακοπτόμενη χρήση. Στη συνέχεια ο σχεδιασμός του συστήματος καθορίζεται με τον προσδιορισμό των βέλτιστων μεγεθών των επιμέρους βασικών υποσυστημάτων με στόχο την ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης κόστους του συνολικού συστήματος [8]. Η αντικειμενική συνάρτηση κόστους περιλαμβάνει την απόσβεση του κόστους αγοράς των συσκευών, το κόστος αντικατάστασης και λειτουργίας του ολοκληρωμένου συστήματος αναγώμενα σε ετήσια βάση. Ο χρόνος προσομοίωσης του συστήματος ορίζεται το ένα έτος χρησιμοποιώντας τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής που προορίζεται η εφαρμογή. Παράλληλα, εφαρμόζονται οι επιλεγμένες ΣΔΕ που υπολογίζουν τις λειτουργικές παραμέτρους (ώρες λειτουργίας, κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης κ.ο.κ.) που έχουν άμεσο ή έμμεσο αντίκτυπο στην αντικειμενική συνάρτηση. Για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης που περιέχει συνεχείς και διακριτές σχεδιαστικές μεταβλητές εφαρμόζεται η τεχνική προσομοιωμένης απόπτησης (simulated annealing).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΑΡΧΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ

Μέρος της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και τις ανεμογεννήτριες οδηγείται για την κάλυψη των αναγκών του σταθερού φορτίου, ενώ η περίσσεια ενέργειας οδηγείται σε συσκευή ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή υδρογόνου (Σχήμα 1). Το υδρογόνο αποθηκεύεται σε κυλίνδρους υπό πίεση, από όπου τροφοδοτείται σε κυψέλη καυσίμου πολυμερικής ηλεκτρολυτικής μεμβράνης (PEM) για την παραγωγή ενέργειας σε περίπτωση ελλείμματος ενέργειας από τις Α.Π.Ε.



Σχήμα 1: Διάγραμμα του ολοκληρωμένου συστήματος παραγωγής ενέργειας με ταυτόχρονη παραγωγή, αποθήκευση και χρήση υδρογόνου.

Λόγω της μεγάλης μεταβλητότητας των μετεωρολογικών φαινομένων η όλη μονάδα συνδέεται με συσσωρευτή μολύβδου-οξέος που εξομαλύνει τις διακυμάνσεις στην παραγωγή

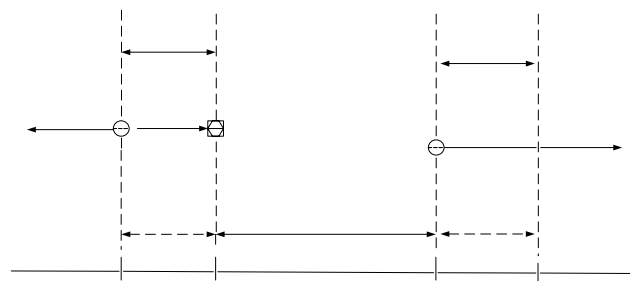
ενέργειας από τις Α.Π.Ε. Η φόρτιση του συσσωρευτή πραγματοποιείται από τις Α.Π.Ε. ή την κυψέλη καυσίμου ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των Α.Π.Ε. και την κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ο κύριος στόχος μίας στρατηγικής διαχείρισης ενέργειας (ΣΔΕ) σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα εκμετάλλευσης Α.Π.Ε., αφορά την πλήρη κάλυψη του φορτίου χρησιμοποιώντας κατάλληλα τα διάφορα υποσυστήματα παραγωγής ενέργειας. Η κύρια μεταβλητή λειτουργίας της ολοκληρωμένης μονάδας, είναι η κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή, SOC. Σε περίπτωση περίσσεια ενέργειας των Α.Π.Ε. με ταυτόχρονη υψηλή κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή (SOC_{max}) παράγεται υδρογόνο με το ηλεκτρολυτικό κελί. Αντίθετα σε περίπτωση ελλείμματος ενέργειας από τις Α.Π.Ε. και χαμηλής κατάστασης φόρτισης του συσσωρευτή (SOC_{min}) η κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιεί το αποθηκευμένο υδρογόνο για την κάλυψη του φορτίου. Οι κύκλοι λειτουργίας του συσσωρευτή καθώς και το βάθος εκφόρτισής του επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής του και επομένως τα λειτουργικά κόστη της μονάδας (π.χ. κόστος αντικατάστασης συσσωρευτή). Για το λόγο αυτό, οι εφαρμοζόμενες ΣΔΕ πρέπει να ικανοποιούν τις ηλεκτρικές ανάγκες της μονάδας κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα λειτουργικά κόστη της μονάδας να ελαχιστοποιούνται. Για το ολοκληρωμένο σύστημα έχουν επιλεχθεί κατόπιν μελέτης προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος οι ακόλουθες τιμές [1,2]: ισχύς φορτίου: 1kW, ισχύς κυψέλης καυσίμου: 1kW, αρχική χωρητικότητα συσσωρευτή: 2700Ah ($SOC=90\%$), ελάχιστη ισχύς συσκευής ηλεκτρόλυσης ($P_{min,elec}$): 1.05kW, μέγιστη ισχύς συσκευής ηλεκτρόλυσης ($P_{max,elec}$): 4.2kW, αρχική χωρητικότητα αποθηκευτικού χώρου για το υδρογόνο: 60.5 Nm³ (55% της μέγιστης χωρητικότητας (περίπου 110kWh), SOC_{min} : 84%, και SOC_{max} : 91%.

3.1 Στρατηγική Διαχείρισης Ενέργειας 1, ΣΔΕ1

Το διάγραμμα εφαρμογής της ΣΔΕ1 παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Συγκεκριμένα, εάν υπάρχει έλλειμμα ισχύος ($P \leq 0$), για τις μέσες τιμές ισχύος ανά ώρα, η απαραίτητη ισχύς δίδεται από τον συσσωρευτή ή την κυψέλη καυσίμου. Εάν $SOC \leq SOC_{min}$, τότε η κυψέλη καυσίμου αποδίδει την απαραίτητη ισχύ για την κάλυψη του ελλείμματος. Σε περίπτωση που η ισχύς της κυψέλης είναι μεγαλύτερη από το έλλειμμα ισχύος, τότε παράλληλα φορτίζεται ο συσσωρευτής. Εάν $SOC_{min} < SOC < SOC_{fc}$ και στο προηγούμενο χρονικό σημείο λειτουργούσε η κυψέλη καυσίμου και υπάρχει ακόμα έλλειμμα ($P \leq 0$), τότε η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί μέχρι το SOC αγγίζει την τιμή SOC_{fc} ή μέχρι οι Α.Π.Ε. να καλύψουν τις ηλεκτρικές ανάγκες. Για $SOC_{fc} \leq SOC \leq SOC_{max}$ ο συσσωρευτής φορτίζει ή εκφορτίζει για $P > 0$ και $P \leq 0$ αντίστοιχα.

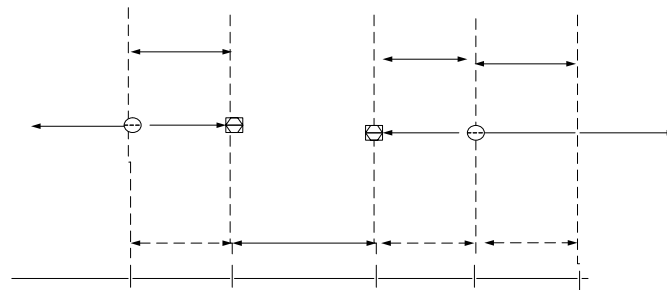


Σχήμα 2: Σημεία αποφάσεων σύμφωνα με τη ΣΔΕ1 [2]

Εάν $SOC_{max} < SOC < SOC_{max_charge}$ και $P < P_{min,elec}$ τότε η ισχύς P χρησιμοποιείται για φόρτιση του συσσωρευτή μέχρι το όριο SOC_{max_charge} . Άνω αυτού του ορίου ο συσσωρευτής δεν μπορεί να φορτισθεί και η επιπλέον ενέργεια χρησιμοποιείται από τα βοηθητικά στοιχεία του συστήματος (π.χ. συμπιεστής). Ομοίως, για $P > P_{max,elec}$ η συσκευή ηλεκτρόλυσης χρησιμοποιεί την μέγιστη δυνατή ισχύ για την λειτουργία της και η επιπλέον ποσότητα $P - P_{max,elec}$ φορτίζει τον συσσωρευτή ως το SOC_{max_charge} . Τονίζεται ότι, για $SOC > SOC_{max}$ και $P_{min,elec} \leq P \leq P_{max,elec}$ οι Α.Π.Ε. καλύπτουν πλήρως την λειτουργία της συσκευής ηλεκτρόλυσης.

3.2 Στρατηγική Διαχείρισης Ενέργειας 1, ΣΔΕ2

Το διάγραμμα εφαρμογής της ΣΔΕ1 παρουσιάζεται στο Σχήμα 3. Η κυριότερη διαφορά μεταξύ ΣΔΕ1 και ΣΔΕ2 αφορά την χρήση του συσσωρευτή για να καλύπτει μέρος της λειτουργίας της συσκευής ηλεκτρόλυσης, και επομένως ο συσσωρευτής υπόκειται σε μεγαλύτερη χρήση. Για $P \leq 0$, η ΣΔΕ2 είναι όμοια με ΣΔΕ1. Στην ζώνη λειτουργίας $SOC_{fc} \leq SOC \leq SOC_{elec}$ ο συσσωρευτής φορτίζει ($P > 0$) ή εκφορτίζει ($P < 0$) ανάλογα των Α.Π.Ε.. Για $SOC_{max} < SOC < SOC_{max_charge}$ και $0 \leq P \leq P_{min,elec}$ τότε ο συσσωρευτής εκφορτίζει για να καλύψει την λειτουργία της ηλεκτρόλυσης με ισχύ ίση με $P_{min,elec}$. Για $P \geq P_{max,elec}$ η συσκευή ηλεκτρόλυσης χρησιμοποιεί ισχύ ίση με $P_{max,elec}$ και η επιπλέον ποσότητα $P - P_{max,elec}$ φορτίζει τον συσσωρευτή ως το SOC_{max_charge} . Για $SOC > SOC_{max_charge}$, μόνο η συσκευή ηλεκτρόλυσης (εφόσον $P_{min,elec} \leq P$) και τα βοηθητικά στοιχεία χρησιμοποιούν τυχόν περίσσεια ενέργειας. Για $SOC_{elec} \leq SOC \leq SOC_{max}$ και στο προηγούμενο χρονικό σημείο λειτουργούσε η συσκευή ηλεκτρόλυσης και υπάρχει ακόμα περίσσεια ($P > 0$), τότε η ηλεκτρόλυση πραγματοποιείται μέχρι το όριο SOC_{elec} .



Σχήμα 3: Σημεία αποφάσεων σύμφωνα με τη ΣΔΕ2 [2]

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τα σενάρια κατά την προσομοίωση αφορούν τις εξής περιπτώσεις:

$$\begin{aligned}
 SOC_{max_charge} &= SOC_{max} + \alpha\% \cdot SOC_{nom} \\
 SOC_{fc} &= SOC_{min} + \alpha\% \cdot SOC_{nom} \\
 SOC_{elec} &= SOC_{max} - \alpha\% \cdot SOC_{nom} \text{ (μόνο σε ΣΔΕ2)}
 \end{aligned}$$

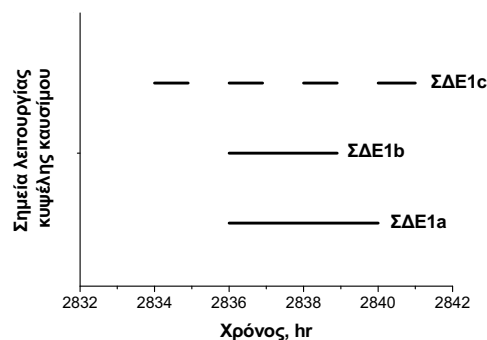
Όπου $\alpha=2$ για ΣΔΕ1a και ΣΔΕ2a, $\alpha=1$ για ΣΔΕ1b και ΣΔΕ2b και $\alpha=0$ για ΣΔΕ1c και ΣΔΕ2c (Χωρίς ζώνη υστέρησης). Ο πίνακας 1 παραθέτει τις ονομαστικές τιμές των διαφόρων υποσυστημάτων που απαρτίζουν τη μονάδα για την οποία μελετήθηκαν οι ΣΔΕ1 και ΣΔΕ2:

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά υποσυστημάτων [1, 2]					
Φ/Β	Α/Γ	Συσσωρευτής	Συσκευή Ηλεκτρόλυσης	Κυψέλη Καυσίμου	Αποθήκευση Υδρογόνου
5kW _p	3kW _p	144kWh	4.2kW _p	4kW _p	6m ³ /190kWh

Όπως παρατηρείται και στον πίνακα 2, η παρουσία της ζώνης υστέρησης στους αλγόριθμους λειτουργίας (a και b) συντελεί στην μείωση του χρόνου λειτουργίας του συσσωρευτή καθώς και στην μείωση των κύκλων (%). Κύκλοι λειτουργίας ονομάζονται ο συνολικός αριθμός φορτίσεων που ακολουθούν εκφορτίσεις. Το πηλίκο αυτής της τιμής με τον αριθμό των ονομαστικών κύκλων, δίνει το % ποσοστό του πίνακα 2 [2]. Οι χρόνοι λειτουργίας της συσκευής ηλεκτρόλυσης και της κυψέλης καυσίμου δεν επηρεάζονται σημαντικά εκτός από μία μικρή αύξηση στην ΣΔΕ2. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι η μείωση του μέσου αποθηκευμένου υδρογόνου σε όλες τις περιπτώσεις για χρήση ζώνης υστέρησης. Η μείωση του υδρογόνου είναι λογική καθώς περιορίζεται η χρονική διάρκεια της συσκευής ηλεκτρόλυσης στην ΣΔΕ1 ενώ στην ΣΔΕ2 η κυψέλη καυσίμου καταναλώνει περισσότερο υδρογόνο. Παράλληλα, παρατηρείται ένα σημαντικό ποσό ενέργειας προς απόρριψη στην ΣΔΕb, γεγονός που φανερώνει πως στενά όρια θα πρέπει να αποφεύγονται.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα προσομοίωσης για λειτουργικές παραμέτρους [2]						
	%T _{συσ.}	%T _{ηλεκ.}	%T _{FC}	Κύκλοι, %	Μέσο Αποθ. H ₂ , m ³	E _{Loss} , kWh
ΣΔΕ1a	92.99	7.08	5.83	3.56	45.74	0
ΣΔΕ1b	91.67	6.88	5.96	3.56	42.73	20.20
ΣΔΕ1c	92.99	7.08	5.96	3.70	45.84	0
ΣΔΕ2a	93.46	10.70	9.08	3.56	29.59	0
ΣΔΕ2b	93.46	10.70	9.08	3.56	29.59	0
ΣΔΕ2c	93.66	10.40	8.43	4.08	32.21	0

Στο σχήμα 4, παρουσιάζονται τα σημεία λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου για την ΣΔΕ1. Όπως παρατηρείται, η παρουσία της ζώνης υστέρησης στον βασικό αλγόριθμο, εξαλείφει τις συνεχείς παύσεις/ενάρξεις κατά την λειτουργία της κυψέλης καυσίμου σε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα κατά την χρονική διάρκεια της προσομοίωσης.



Σχήμα 4. Απεικόνιση λειτουργικής συμπεριφοράς της κυψέλης καυσίμου σε ένα τμήμα της χρονικής διάρκειας της προσομοίωσης για την ΣΔΕ1.

5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στην συγκεκριμένη ενότητα θα παρουσιασθούν τα βασικά βήματα για το βέλτιστο σχεδιασμό του ολοκληρωμένου συστήματος για μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή [8]. Ως σχεδιαστικές μεταβλητές επιλέγονται οι ακόλουθες: α) επιφάνεια φωτοβολταϊκών στοιχείων, β) δυναμικότητα ανεμογεννητριών, γ) χωρητικότητα συσσωρευτή, δ) μέγιστη ισχύς συσκευής ηλεκτρόλυσης, ε) χωρητικότητα δεξαμενών αποθήκευσης υδρογόνου και στ) μέγιστη παραγόμενη ισχύς κυψέλης καυσίμου. Για το βέλτιστο σχεδιασμό του συστήματος καταstrωνεται μια αντικειμενική συνάρτηση που περιλαμβάνει τα κόστη των συσκευών (απόσβεση κόστους επένδυσης, κόστος λειτουργίας και συντήρησης, κόστος αντικατάστασης, κόστος εγκατάστασης) καθώς και κόστη που μπορεί να προκύψουν από τη λειτουργία του συστήματος (αγορά ενέργειας σε περίπτωση ελλείμματος υδρογόνου) σε συνδυασμό με λειτουργικές παραμέτρους που προκύπτουν από την ΣΔΕ2c [8]. Η τελική αντικειμενική συνάρτηση, της οποίας η βελτιστοποίηση θα υποδείξει τις συσκευές που πρέπει να αγοραστούν για την καλύτερη λειτουργία του συστήματος, είναι το άθροισμα όλων των παραπάνω κοστών. Η μορφή της έχει ως εξής:

$$f = C_{\text{επένδυσης}} + C_{\text{Λειτουργίας\&Συντήρησης}} + C_{\text{αντικατάστασης}} + C_{\text{ελλείμματος}} \quad (1)$$

όπου:

f : συνολικό κόστος, €/ετος, $C_{\text{επένδυσης}}$: κόστος επένδυσης (περιλαμβάνει την απόσβεση του κόστους αγοράς και εγκατάστασης του κάθε υποσυστήματος – γραμμική απόσβεση μονάδας σε 5 έτη), €/ετος, $C_{\text{Λειτουργίας\&Συντήρησης}}$: κόστος λειτουργίας και συντήρησης, €/ετος, $C_{\text{αντικατάστασης}}$: κόστος αντικατάστασης, €/ετος, $C_{\text{ελλείμματος}}$: κόστος ελλείμματος υδρογόνου, για κάλυψη του ελλείμματος με αγορά ηλεκτρικού ρεύματος από το δίκτυο ή για κάλυψη του ελλείμματος με αγορά, €/ετος. Σημειώνεται, ότι για τον προσδιορισμό του κόστους αντικατάστασης, λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος λειτουργίας του κάθε υποσυστήματος εντός του χρόνου ζωής της μονάδας μέσω των ΣΔΕ.

Η μέθοδος της προσομοιωμένης ανόπτησης αποτελεί μια τεχνική ελεγχόμενης τυχαίας αναζήτησης της βέλτιστης λύσης [8, 9]. Σε κάθε βήμα της μεθόδου, μια νέα τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης βρίσκεται με τυχαία αλλαγή των σχεδιαστικών μεταβλητών. Η νέα αυτή τιμή γίνεται άμεσα αποδεκτή αν βελτιώνει την προηγούμενη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ή γίνεται αποδεκτή με κάποια πιθανότητα αν χειροτερεύει την προηγούμενη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Η αλγοριθμική αυτή λειτουργία αποτελεί ένα μηχανισμό αποφυγής των τοπικά βέλτιστων λύσεων, επιτρέποντας την αλγοριθμική έρευνα σε πολλές περιοχές του πολυδιάστατου χώρου των σχεδιαστικών μεταβλητών που πιθανόν να κρύβουν τη συνολικά βέλτιστη λύση του προβλήματος. Η πιθανότητα αυτή εξαρτάται από τις τιμές της αντίστοιχης συνάρτησης (E_i) και από μία γενικευμένη αλγοριθμική παράμετρο, την θερμοκρασία T . Η πιθανότητα αυτή είναι ίση με :

$$P_{E_1 \rightarrow E_2} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{T}} \quad (2)$$

όπου, E_1 είναι η ενέργεια της προηγούμενης λύσης, E_2 η ενέργεια της νέας λύσης και T η θερμοκρασία του συστήματος. Ο όρος $P_{E_1 \rightarrow E_2}$ εκφράζει την πιθανότητα επιλογής μίας από τις νέες λύσεις, η οποία αντιστοιχεί σε ενέργεια E_2 . Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται, η επόμενη λύση επιλέγεται με βάση την προηγούμενη καλύτερη λύση. Με βάση την εξίσωση (2), σε υψηλότερες θερμοκρασίες γίνονται αποδεκτές περισσότερες βέλτιστες ή πιθανόν βέλτιστες λύσεις, ενώ σε χαμηλότερες θερμοκρασίες η αλγοριθμική έρευνα εντατικοποιείται κοντά σε σημεία που βελτιώνουν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, απορρίπτοντας

περισσότερες πιθανόν βέλτιστες λύσεις. Σκοπός της μεθόδου αυτής δεν είναι η ανεύρεση του αυστηρώς μαθηματικά βέλτιστου σημείου, αλλά η σύγκλιση σε μια κατανομή από κατά προσέγγιση βέλτιστες σχεδιαστικές επιλογές [8,9]. Έτσι, ανευρίσκονται ορισμένοι συνδυασμοί τιμών των σχεδιαστικών μεταβλητών που οδηγούν σε υψηλή οικονομική απόδοση και προτείνονται σχεδιαστικές λύσεις που εμπλουτίζουν την απαραίτητη γνώση σχετικά με την οικονομική συμπεριφορά του συστήματος που μελετάται.

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ Α.Π.Ε.

Κατά την προσομοίωση της μονάδας (δεδομένα Πίνακας 2) προκύπτει πως το έλλειμμα σε υδρογόνο ανέρχεται σε 1.924 Nm^3 (5000 kWh) [8]. Ο λόγος αυτού του ελλείμματος οφείλεται στην κακή κατανομή των συσκευών ως προς την παραγωγή της ηλεκτρικής ισχύος. Το πρόβλημα συγκεκριμένα, εντοπίζεται στις ώρες λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου και στις ώρες λειτουργίας της δεξαμενής ηλεκτρόλυσης. Η δεξαμενή ηλεκτρόλυσης, όπως προκύπτει, λειτουργεί μόλις 190 ώρες το χρόνο τη στιγμή που η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί 3000 ώρες το χρόνο [8]. Αυτή η διαφορά έγκειται στις δυναμικότητες των υποσυστημάτων εκμετάλλευσης Α.Π.Ε. και συγκεκριμένα στις ανεμογεννήτριες. Η ταχύτητα του ανέμου είναι πολύ μικρή στην περιοχή εγκατάστασης του συστήματος και η ονομαστική ισχύς των ανεμογεννητριών πολύ μεγάλη. Έτσι, η παραγόμενη ισχύς από τις ανεμογεννήτριες είναι πολύ μικρή ενώ και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία από μόνα τους αδυνατούν να καλύψουν ικανοποιητικά το ζητούμενο φορτίο. Αποτέλεσμα αυτού είναι να χρειάζεται να λειτουργήσει περισσότερο η κυψέλη καυσίμου με αποτέλεσμα την αυξημένη κατανάλωση υδρογόνου. Ο βέλτιστος σχεδιασμός καλείται να συμβιβάσει το έλλειμμα ισχύος ή και να το μηδενίσει. Ο συνδυασμός που θα προκύψει θα είναι και η βέλτιστη λύση της αντικειμενικής συνάρτησης. Η όλη διαδικασία θα επικεντρωθεί στην εξέταση 2 σεναρίων [8]:

1^ο Σενάριο → Εύρεση βέλτιστης λύσης για ελαχιστοποίηση κόστους (σύστημα συνδεδεμένο με το δίκτυο)

2^ο Σενάριο → Εύρεση βέλτιστης λύσης για πλήρη αυτονομία συστήματος (χωρίς έλλειμμα ενέργειας)

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της τεχνικής ανόπτησης δίνουν, στην αντικειμενική συνάρτηση μία τιμή κόστους της τάξης των $18,924 \text{ €}$ για το πρώτο σενάριο και $25,847 \text{ €}$ ανά έτος για το δεύτερο σενάριο. Οι μεταβλητές απόφασης των προτεινόμενων λύσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 3 σε σύγκριση με τις αρχικές μεταβλητές [8].

Πίνακας 3. Μεταβλητές απόφασης υπολογιζόμενης βέλτιστης λύσης σε σύγκριση με την αρχική [8]			
ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	ΜΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟ-ΠΟΙΗΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	1 ^ο ΣΕΝΑΡΙΟ	2 ^ο ΣΕΝΑΡΙΟ
Αριθμός ανεμογεννητριών	3	2	2
Επιφάνεια ΦΒ, m^2	44.6	63.24	104.2
Αριθμός συσσωρευτών	4	7	5
Όγκος Δεξαμενών, Nm^3	4.6	4.5	4.6
Μέγιστη ισχύς ηλεκτρολυτικού κελιού, kW	4.2	4	4.8
Ισχύς λειτουργίας κυψέλης καυσίμου, kW	2	1.5	1.5
Ετήσιο κόστος λειτουργίας €	22,221	18,924	25,847

Δεδομένου ότι το έλλειμμα υδρογόνου πρέπει να είναι μηδενικό το κόστος αυξάνεται στο 2^ο σενάριο. Σε αυτήν την περίπτωση, προκειμένου να εξασφαλισθεί η πλήρης αυτονομία του συστήματος, επιλέγεται μονάδα παραγωγής υδρογόνου με μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ. Αυτός είναι και ο λόγος που το κόστος αυξάνεται κατά ένα ποσοστό της τάξης του 14% από την αρχική λύση και κατά 26% από την λύση του πρώτου σεναρίου.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μία συνδυασμένη μελέτη σχεδιασμού και βελτιστοποίησης μονάδων εκμετάλλευσης Α.Π.Ε. Όπως διαπιστώθηκε, η κατάλληλη επιλογή ΣΔΕ είναι απαραίτητη για την επιτυχή σύνδεση των υποσυστημάτων και την ομαλή λειτουργία τους. Η ΣΔΕ2 παρότι εμφανίζει χαμηλότερες τιμές αποθηκευμένου υδρογόνου προτείνεται καθώς το σύστημα αντιμετωπίζει καλύτερα περιπτώσεις χαμηλής παραγωγής από Α.Π.Ε. Ο βέλτιστος σχεδιασμός του συστήματος επιβάλλει αύξηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων για αντιστάθμιση του χαμηλού αιολικού δυναμικού ώστε να μειωθεί το έλλειμμα υδρογόνου και φυσικά το ετήσιο κόστος λειτουργία του συστήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ipsakis, D., Voutetakis, S., Seferlis, P., Stergiopoulos, F., Elmasides, C., ‘Power Management Strategies on a Stand-Alone Power System Using Renewable Energy Sources and Hydrogen Storage’, International Journal of Hydrogen Energy, In Press, Corrected Proof, Available Online September 4 2008.
- [2] Ipsakis, D., Voutetakis, S., Seferlis, P., Stergiopoulos, F., Papadopoulou, S., Elmasides, C., ‘The Effect of the Hysteresis Band on Power Management Strategies in a Stand-Alone Power System’, Energy 33, pp. 1537-1550, 2008.
- [3] Ulleberg, Ø., ‘Stand-Alone Power Systems for the Future: Optimal Design, Operation & Control of Solar-Hydrogen Energy Systems’, PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 1998.
- [4] Dufo-López, R., Bernal-Aguistin, J.L., Contreras, J., ‘Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage’. Renewable Energy 32, pp. 1102-1126, 2007.
- [5] Ghosh, P.C., ‘Cost optimization of a self-sufficient hydrogen based energy supply system’ PhD thesis, Forschungszentrum Julich in der Helmholtz-Gemeinschaft, Institut für Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik Institut 3: Energieverfahrenstechnik, (Diss. Aachen, RTWH, 2003).
- [6] Vosen, S.R., Keller, J.O., ‘Hybrid energy storage systems for stand-alone electric power systems: optimization of system performance and cost through control strategies’, International Journal of Hydrogen Energy 24, pp. 1139–1156, 1999
- [7] Santrelli, M., Cali, M., Macagno, S., ‘Design and analysis of stand-alone hydrogen energy systems with different renewable sources’, International Journal of Hydrogen Energy 29, pp. 1571–1586, 2004.
- [8] Βεζυράκης, Γ., Κωνσταντίνου, Κ., ‘Ανάπτυξη αλγορίθμου διαχείρισης λειτουργίας ολοκληρωμένου συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με ταυτόχρονη παραγωγή, αποθήκευση και χρήση υδρογόνου’, Διπλωματική εργασία Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Α.Π.Θ., 2008.
- [9] Papadopoulos, A.I., Linke P., ‘On the synthesis and optimization of liquid–liquid extraction processes using stochastic search methods’, Computers & Chemical Engineering 28, pp. 2391-2406, 2004.

ΦΩΤΟΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΦΩΤΟΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Μαρία Αντωνιάδου, Νικολέτα Στρατάκη και Παναγιώτης Λιανός

Πανεπιστήμιο Πατρών, Γενικό Τμήμα, 26500 Πάτρα, lianos@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

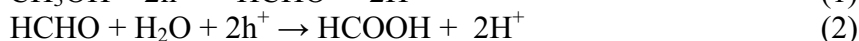
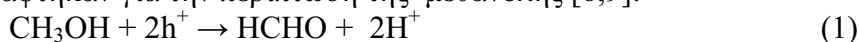
Λεπτά υμένα από εμπορική νανοκρυσταλλική τιτάνια παρασκευάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την οξειδωτική φωτοαποικοδόμηση διαφόρων οργανικών ουσιών μέσω φωτοκαταλυτικής ή φωτοηλεκτροχημικής διεργασίας. Και στις δύο περιπτώσεις εκλύεται υδρογόνο κατά τη φωτοηλεκτροχημική διεργασία παράγεται επί πλέον και ηλεκτρικό ρεύμα. Και οι δύο διεργασίες έχουν μελετηθεί σαν χαρακτηριστικά παραδείγματα των προσπαθειών που γίνονται στις μέρες μας, για την παραγωγή χρησιμοποιήσιμων μορφών ενέργειας με φωτοαποικοδόμηση οργανικών ρύπων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

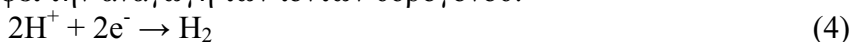
Η νανοκρυσταλλική τιτάνια (titanium dioxide, TiO_2) είναι ένας από τους δημοφιλέστερους φωτοκαταλύτες και μελετάται από ένα πολύ μεγάλο αριθμό ερευνητών σε όλο τον κόσμο. Η προτίμηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η τιτάνια θεωρείται μη τοξικό υλικό, είναι πολύ εύκολο να παρασκευασθεί σε νανοκρυσταλλική μορφή με ήπιες μεθόδους χημικής σύνθεσης ή μπορεί να αγορασθεί σε φθηνή τιμή και, κυρίως, είναι πολύ αποτελεσματικός φωτοκαταλύτης. Άλλωστε το τιτάνιο είναι στοιχείο που υπάρχει σε μεγάλη επάρκεια (είναι ένα από τα δέκα στοιχεία μεγαλύτερης επάρκειας στον πλανήτη μας). Ο αριθμός των δημοσιευμένων εργασιών που αναφέρονται στις φωτοκαταλυτικές ιδιότητες της τιτάνιας είναι τεράστιος και αυξάνεται κατακόρυφα. Χαρακτηριστικά πεδία εφαρμογής της φωτοκαταλυτικής τιτάνιας είναι ο φωτοκαταλυτικός καθαρισμός των υδάτων από οργανικούς ρύπους [1-3] και η παρασκευή των λεγόμενων φωτοηλεκτροχημικών ηλιακών στοιχείων [4]. Στην πραγματικότητα, η τιτάνια προκάλεσε κατ' αρχήν την προσοχή μέσω των αρχικών προσπαθειών για τη φωτοηλεκτροχημική διάσπαση του νερού με σκοπό την παραγωγή υδρογόνου [5]. Το θέμα αυτό συνεχίζει να έλκει την προσοχή των ερευνητών, αν και η φωτοκαταλυτική διάσπαση του νερού δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτική διεργασία. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος, καθώς η Οικονομία του Υδρογόνου γίνεται ολοένα και πιο σπουδαίο ζήτημα. Αν και η φωτοκαταλυτική διάσπαση του νερού είναι δύσκολη, εν τούτοις, η φωτοκαταλυτική επεξεργασία οργανικών ουσιών που υπάρχουν σε μεγάλη περίσσεια, τόσοση όση να θεωρούνται άχρηστα και δύσκολο να αποθηκευθούν υλικά, παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της γλυκερόλης που αποτελεί παραπροϊόν της παρασκευής του βιοντήζελ και ήδη θεωρείται άχρηστο υλικό σε υπερεπάρκεια. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία μικρή περίληψη της έρευνας για την φωτο-επεξεργασία τέτοιων υλικών και παρουσιάζονται ορισμένα αντιπροσωπευτικά ερευνητικά αποτελέσματα.

Η παραγωγή υδρογόνου με φωτοκαταλυτική αποικοδόμηση οργανικών ουσιών μπορεί να διακριθεί σε δύο κατηγορίες, γνωστές ως η Φωτοκαταλυτική (ΦΚ) διεργασία [6,7] και η Φωτοηλεκτροχημική (ΦΗΧ) διεργασία [8]. Κατά τη ΦΚ διεργασία, ένας νανοκρυσταλλικός ημιαγωγός διεγείρεται με απορρόφηση φωτονίων δημιουργώντας ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών (e^-h^+). Οι οπές οξειδώνουν την οργανική ουσία-στόχο ελευθερώνοντας ιόντα υδρογόνου. Τα ιόντα υδρογόνου ανάγονται από τα διεγερμένα ηλεκτρόνια παράγοντας μοριακό υδρογόνο. Η

διαδικασία φαίνεται εύκολη και άμεση και πράγματι είναι. Έχει όμως να ανταγωνιστεί μία άλλη διεργασία, η οποία ευνοείται έναντι της παραγωγής υδρογόνου, και αυτή είναι η επανασύνδεση ηλεκτρονίων και οπών και η απώλεια της ενέργειας των φωτονίων. Με σκοπό την παρεμπόδιση της επανασύνδεσης ηλεκτρονίων και οπών, η συνήθης πρακτική είναι η εναπόθεση νανοσωματιδίων μετάλλων με πολύ μεγάλο έργο εξόδου, π.χ., Pt ή Pd, πάνω στους νανοκρυστάλλους του φωτοκαταλύτη. Τα νανοσωματίδια μετάλλου δρουν σαν επαφές Schottky που έλκουν και παρακρατούν τα ηλεκτρόνια, εμποδίζοντάς τα έτσι να επανασυνδεθούν με τις οπές και διαθέτοντάς τα για την αναγωγή των ιόντων υδρογόνου. Η διαδικασία της οξειδωσης και της αναγωγής κατά τη ΦΚ διεργασία μπορεί να παρασταθεί από τις ακόλουθες αντιδράσεις, που γράφτηκαν για την περίπτωση της μεθανόλης [6,9]:



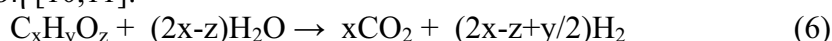
Οι αντιδράσεις 1-3 περιγράφουν τη διαδικασία οξειδωσης, η οποία γίνεται βαθμιαία, ενώ η επόμενη αντίδραση περιγράφει την αναγωγή των ιόντων υδρογόνου:



Συνολικά, η διεργασία παρίσταται από την ακόλουθη αντίδραση:



Η Αντ.5 είναι ισοδύναμη με τη αντίδραση Αναμόρφωσης της μεθανόλης. Η Αναμόρφωση γίνεται πάντοτε παρουσία ύδατος και είναι κυρίως γνωστή ως διεργασία που πραγματοποιείται σε υψηλή θερμοκρασία [10]. Εν τούτοις, οι παραπάνω αντιδράσεις δείχνουν ότι Αναμόρφωση μπορεί να επιτευχθεί φωτοκαταλυτικά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος [11]. Η Αντ.5, μας δείχνει ότι κατά την φωτοκαταλυτική αναμόρφωση καταναλώνεται και οργανική ουσία και νερό, ελευθερώνοντας διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο, οδηγώντας στην ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας και στον καθαρισμό του ύδατος από το οργανικό φορτίο. Η διεργασία που περιγράφεται από τη Αντ.5, μπορεί να υλοποιηθεί με οποιαδήποτε οργανική ουσία υπακούοντας την επόμενη εξίσωση [10,11]:



Όπως είπαμε, η ΦΚ διεργασία απαιτεί την παρουσία ενός μεταλλικού νανοσωματιδίου μεγάλου έργου εξόδου, όπως συμβαίνει στα ευγενή μέταλλα [12,13]. Μερικές εναλλακτικές δυνατότητες (προς αποφυγή των δαπανηρών ευγενών μετάλλων) έχουν δοκιμασθεί με τη χρήση οργανικών δεκτών ηλεκτρονίων, όπως το ιόν MV^{2+} [9], και ο συνδυασμός ημιαγωγών, όπως TiO_2 και RuO_2 [9,14], πλην όμως το σύστημα Pt/ TiO_2 φαίνεται να δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα [13].

Η δεύτερη διεργασία, δηλαδή, η ΦΗΧ διεργασία [8], είναι η αρχαιότερη από τις δύο [5]. Στην περίπτωση αυτή, ο ημιαγωγός-φωτοκαταλύτης εναποτίθεται σε ένα ηλεκτρόδιο, την άνοδο, ενώ η κάθοδος αποτελείται από ηλεκτρόδιο που περιέχει μέταλλο μεγάλου έργου εξόδου, όπως τα ευγενή μέταλλα. Η άνοδος και η κάθοδος βρίσκονται σε ηλεκτρική σύνδεση, εξωτερικά με ένα καλώδιο και εσωτερικά με ένα ηλεκτρολύτη ή συνδυασμό ηλεκτρολυτών. Όταν ο ημιαγωγός διεγείρεται με απορρόφηση φωτονίων, δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών. Οι οπές οξειδώνουν τις οργανικές ουσίες-στόχους, απελευθερώνοντας ιόντα υδρογόνου, όπως στις Αντ.1-3. Τα ιόντα υδρογόνου κινούνται μέσα στον ηλεκτρολύτη και μπορούν να φθάσουν στην κάθοδο όπου ανάγονται από ηλεκτρόνια που οδηγούνται στην κάθοδο μέσω του εξωτερικού κυκλώματος. Κάτω από αναερόβιες συνθήκες, θα ισχύσει η Αντ.4, θα παραχθεί, δηλαδή, μοριακό υδρογόνο. Παρουσία οξυγόνου, η αναγωγή των ιόντων υδρογόνου οδηγεί απλά στο σχηματισμό ύδατος. Μία ΦΗΧ κυψελίδα μπορεί να αποτελείται από ένα μόνο θάλαμο [8,15] ή από δύο θαλάμους [16,17]. Στη δεύτερη αυτή περίπτωση, η επικοινωνία γίνεται μέσω μεμβράνης μεταφοράς ιόντων υδρογόνου, όπως είναι η μεμβράνη Nafion. Οι κυψελίδες δύο θαλάμων δίδουν τη δυνατότητα χρησιμοποίησης διαφορετικού ηλεκτρολύτη (βασικού) στο θάλαμο ανόδου, διευκολύνοντας την οξείδωση, και δια-

φορετικού ηλεκτρολύτη (όξινου) στο θάλαμο καθόδου, διευκολύνοντας την αναγωγή των ιόντων υδρογόνου. Οι ΦΗΧ κυψελίδες δεν λειτουργούν χωρίς ηλεκτρική πόλωση [8,18] όταν η άνοδος περιέχει τιτάνια και η κάθοδος λευκόχρυσος. Η αιτία είναι ότι το δυναμικό αναγωγής H_2/H_2O (επίπεδο μηδέν) είναι πιο πάνω από τη στάθμη Fermi του ηλεκτροδίου λευκοχρύσου [8]. Σε μονοθαλάμιες κυψελίδες, η ηλεκτρική πόλωση επιτυγχάνεται με την εφαρμογή εξωτερικής τάσης [19]. Στις κυψελίδες διπλού θαλάμου, η πόλωση μπορεί να επιτευχθεί με τη βοήθεια δύο διαφορετικών ηλεκτρολυτών [16,17,20]. Στην παρούσα εργασία, θα παρουσιαστούν αποτελέσματα που έχουν καταγραφεί με τη βοήθεια ΦΗΧ κυψελίδας δύο θαλάμων με χημική πόλωση.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1. Αντιδραστήρια

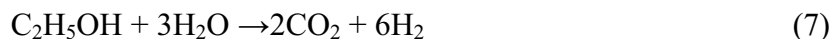
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η εμπορική τιτάνια Degussa P25 που περιέχει νανοκρυστάλλους μεγέθους 25-30 nm. Όλα τα υπόλοιπα υλικά ήταν από την Aldrich και Merck ενώ νερό Millipore χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα πειράματα. Τα διαφανή ηλεκτρόδια $SnO_2:F$ (επιφανειακής αντίστασης 8Ω) αγοράστηκαν από τη Hartford, USA.

2.2 Εναπόθεση υμενίων τιτάνιας. Για την εναπόθεση λεπτών υμενίων νανοκρυσταλλικής τιτάνιας, χρησιμοποιήθηκε Degussa P25 μέσω διασποράς σε υδατικό διάλυμα Carbowax [22], όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη εργασία [20]. Τα υμένια εναποτέθηκαν πάνω σε γυαλιά μικροσκοπίου ή πάνω σε διαφανή ηλεκτρόδια $SnO_2:F$. Τα γυαλιά μικροσκοπίου χρησιμοποιήθηκαν σε ΦΚ εφαρμογές και τα ηλεκτρόδια $SnO_2:F$ σε ΦΗΧ εφαρμογές. Μετά την εναπόθεση, το υμένιο μαζί με το υπόστρωμα θερμαίνεται στους $550^{\circ}C$, ώστε να επιτευχθεί η καύση όλων των οργανικών ουσιών. Η συνολική ποσότητα της τιτάνιας πάνω στο υπόστρωμα ήταν 25mg ενώ η επιφάνεια που καλύφθηκε από το υμένιο τιτάνιας ήταν $4 \times 2.5 = 10 cm^2$. Τα υμένια αυτά προσκολλούνται σταθερά πάνω στο υπόστρωμα, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και αντέχουν στις συνθήκες ισχυρού αλκαλικού περιβάλλοντος, στην περίπτωση των ΦΗΧ στοιχείων.

2.3 Προετοιμασία του καταλύτη Μετάλλου / TiO_2 για φωτοκαταλυτικά πειράματα. Τα μέταλλα εναποτίθενται στην επιφάνεια των υμενίων τιτάνιας, όπως έχει προηγουμένως αναφερθεί [13,23] μετά από προσρόφηση από υδατικά διαλύματα διαφόρων ενώσεων μετάλλων, όπως $Na_2PCl_4 \cdot xH_2O$, $Na_2AuCl_4 \cdot 2H_2O$, $RuCl_3 \cdot xH_2O$, $RhCl_3 \cdot xH_2O$, $AgNO_3$, $Na_2PdCl_4 \cdot xH_2O$ και $NiC_2H_4O_2 \cdot 4H_2O$, σε συγκέντρωση 5×10^{-4} M. Μετά την εναπόθεση της τιτάνιας και αμέσως μετά τη θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία, τα υμένια βυθίζονται στα παραπάνω διαλύματα και μένουν εκεί για μισή ώρα σε σκοτεινό περιβάλλον. Στη συνέχεια, τα υμένια ξεπλένονται, στεγνώνουν και φωτοβολούνται με ακτινοβολία UV για 15 min σε κάθε πλευρά του υμενίου. Η επεξεργασία με UV γίνεται για να επιτευχθεί η αναγωγή των κατιονικών ειδών σε ουδέτερα μεταλλικά νανοσωματίδια.

2.4 Περιγραφή του αντιδραστήρα που χρησιμοποιήθηκε στα φωτοκαταλυτικά πειράματα. Ο αντιδραστήρας που χρησιμοποιήθηκε σε ΦΚ διεργασίες είναι φτιαγμένος από πυρέξ, κυλινδρικής γεωμετρίας με διάμετρο 4.4 cm και μήκος 10 cm με υποδοχές για είσοδο και έξοδο του αερίου [23]. Μέσα στον κύλινδρο αυτό τοποθετούνται 4 γυαλιά μικροσκοπίου με εναποτεθειμένο φωτοκαταλύτη Μετάλλου/τιτάνιας και από τις δυο μεριές. Ο αντιδραστήρας ακτινοβολείται από φωτεινή πηγή, η οποία περιλαμβάνει 4 λάμπες τύπου black light, οι οποίες τοποθετούνται περιμετρικά γύρω από τον αντιδραστήρα και έχουν μήκος 10cm και ηλεκτρική ισχύ 4W η κάθε μια. Η ένταση του φωτός που φτάνει σε ένα υμένιο, το οποίο βρίσκεται ακριβώς μπροστά στη λάμπα είναι $0.40 mW/cm^2$. Μέσα στον αντιδραστήρα τοποθετή-

θηκε ένα μίγμα αιθανόλης – νερού, συνολικού όγκου 85-90ml. Στην παρούσα ΦΚ διεργασία χρησιμοποιήθηκε συγκέντρωση 50% κ.ο. σε αιθανόλη, το οποίο αντιστοιχεί σε μοριακή αναλογία 1:3, όπως φαίνεται και στην Αντ.7, η οποία είναι η Αντ.6, γραμμένη για την περίπτωση της αιθανόλης, δηλαδή για $m=2$:



Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με ροή αερίου Ar ίση με 20cc/min. Το αέριο Ar αποτελεί ένα μέσο για τη συλλογή και τη μεταφορά του παραγόμενου αερίου H_2 στο σύστημα ανάλυσης.

2.5 Περιγραφή του αντιδραστήρα που χρησιμοποιήθηκε σε φωτοηλεκτροχημικά πειράματα. Η ΦΗΧ κυψελίδα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι ένας αντιδραστήρας που αποτελείται από δύο θαλάμους, φτιαγμένος από πυρέξ. Οι δύο θάλαμοι διαχωρίζονται με μια μεμβράνη Nafion. Η άνοδος αποτελείται από ένα ηλεκτρόδιο $\text{SnO}_2:\text{F}$ με τιτάνια και η κάθοδος από ένα πανομοιότυπο ηλεκτρόδιο $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2:\text{F}$ με εναποτεθημένα νανοσωματίδια Pt [24,25]. Για την παρασκευή του ηλεκτροδίου της καθόδου, απλώνεται μια ποσότητα υδατικού διαλύματος τετραχλωροπλατινικού νατρίου πάνω στο ηλεκτρόδιο $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2:\text{F}$. Στη συνέχεια, αυτό θερμαίνεται σε θερμοκρασία 500°C για να επιτευχθεί η αναγωγή των ιόντων PtCl_4^{2-} σε μεταλλικό Pt και η μόνιμη προσκόλληση του μετάλλου πάνω στο ηλεκτρόδιο. Στο κελί που βρίσκεται η άνοδος προστίθεται ηλεκτρολύτης 1.0 mol/L NaOH ενώ στο κελί της καθόδου ο ηλεκτρολύτης είναι 1.0 mol/L H_2SO_4 . Οι διαφορετικοί αυτοί ηλεκτρολύτες χρησιμοποιήθηκαν για να εφαρμοστεί μια χημική πόλωση μεταξύ της ανόδου και της καθόδου. Η ακτινοβολία του αντιδραστήρα πραγματοποιείται από φωτεινή πηγή αποτελούμενη από λάμπες τύπου black light, όπως και στην περίπτωση των φωτοκαταλυτικών πειραμάτων.

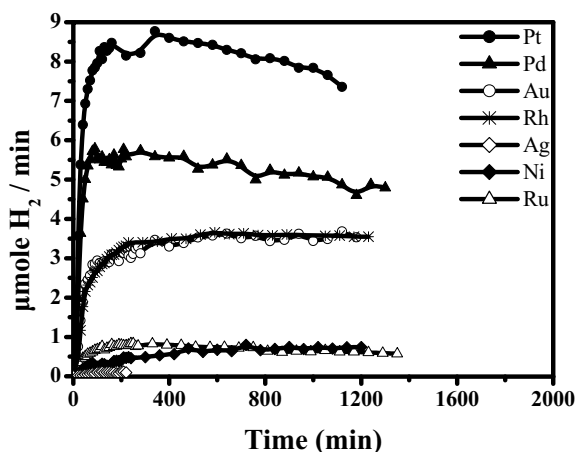
2.6 Μετρήσεις. Η ένταση της ακτινοβολίας στη θέση που έχει τοποθετηθεί ο καταλύτης μετρήθηκε με Ακτινόμετρο (Oriel Radiant Power Meter). Οι ηλεκτρικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση πολυμέτρου Keithley 196. Η ανίχνευση του παραγόμενου αερίου H_2 έγινε μέσω ενός αερίου χρωματογράφου SRI 8610C και Ar σαν φέρον αέριο.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ

Οργανικές ουσίες που θεωρούνται άχρηστα υπολείμματα δύνανται να φωτοαποικοδομηθούν με σκοπό την παραγωγή υδρογόνου ή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ουσίες αυτές ποικίλλουν σε σύσταση και προέλευση [21,26,27]. Είναι προφανές ότι οι μεγαλύτερες ποσότητες υδρογόνου μπορούν να παραχθούν από τη διάσπαση, αλκοολών, πολυολών και υδατανθράκων. Οι περισσότερες μέχρι τώρα δημοσιευμένες εργασίες έχουν δείξει ότι οι αλκοόλες με μικρή αλειφατική αλυσίδα παράγουν μεγάλο ποσοστό υδρογόνου μέσω ΦΚ διεργασιών [7,13,14,23,28]. Ως εκ τούτου, είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται μεθανόλη ή αιθανόλη για τη μελέτη της ΦΚ διεργασίας. Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζουμε ορισμένα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν χρησιμοποιώντας μείγματα αιθανόλης-ύδατος σε ποσοστό 50-50 % κατ' όγκον, το οποίο, όπως είπαμε, αποτελεί περίπου τη μοριακή αναλογία 1:3, όπως στην αντίδραση 7.

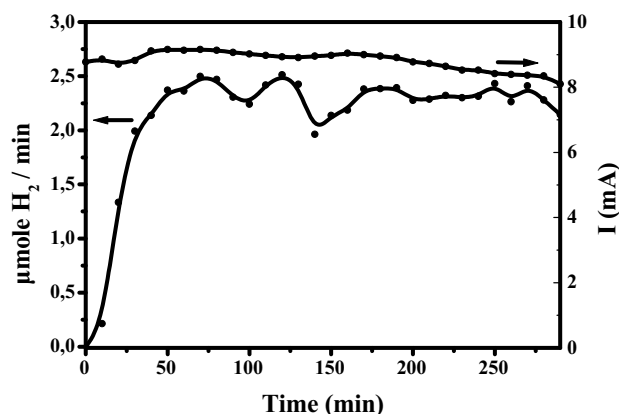
3.1 Παραγωγή υδρογόνου με οξείδωση αιθανόλης μέσω ΦΚ διεργασίας. Ο αντιδραστήρας που περιγράψαμε παραπάνω, περιέχοντας το παραπάνω μείγμα αιθανόλης-ύδατος και καταλύτη Μέταλλο/Τιτάνια, παρήγε υδρογόνο υπό την επίδραση ακτινοβολίας UVA, δηλαδή με το φως λαμπτήρων Black Light.. Το Σχ.1, παρουσιάζει τους ρυθμούς παραγωγής υδρογόνου, για διάφορες περιπτώσεις μετάλλου [23]. Οι μεγαλύτεροι ρυθμοί παρατηρήθηκαν στην περίπτωση καταλύτη Pt/ TiO_2 [13] και Pd/ TiO_2 . Πρέπει να υπογραμμισθεί ότι απουσία μετάλλου, η παραγωγή υδρογόνου είναι μηδενική, προφανώς, λόγω του ότι, όπως προείπαμε, στην περίπτωση αυτή έχουμε έντονη επανασύνδεση ηλεκτρονίων-οπών και απώλεια ενέργειας.

Έγιναν επίσης μετρήσεις με καταλύτη Pt/TiO₂, αλλά απουσία αιθανόλης. Και σ' αυτή την περίπτωση η παραγωγή υδρογόνου ήταν αμελητέα, αναδεικνύοντας έτσι τη σημασία της παρουσίας της οξειδούμενης ουσίας για την πραγματοποίηση της διεργασίας. Το Σχ.1 μας δείχνει πόσο απαραίτητη είναι η παρουσία ευγενών μετάλλων. Όμως τα μέταλλα αυτά είναι δυσεύρετα και δαπανηρά. Για το λόγο αυτό, έχει τεθεί ως πρωταρχικής σημασίας στόχος της έρευνας, η εξεύρεση φωτοκαταλυτικών συστημάτων που θα αποτελούσαν εναλλακτική λύση στη χρήση ευγενών μετάλλων. Το θέμα αυτό μελετάται και στο εργαστήριό μας.



Σχήμα 1. Ρυθμοί παραγωγής υδρογόνου από μείγματα αιθανόλης-ύδατος με φωτοκαταλυτική διεργασία παρουσία καταλύτη μετάλλου/τιτάνιας

3.2 Παραγωγή υδρογόνου και ηλεκτρικού ρεύματος μέσω ΦΗΧ διεργασίας. Αλκοόλες, πολυόλες (π.χ., γλυκερόλη), υδατάνθρακες και άλλα υλικά οξειδώθηκαν μέσω ΦΗΧ διεργασίας χρησιμοποιώντας την κυψελίδα δύο θαλάμων που περιγράψαμε παραπάνω. Όπως είπαμε, παραγωγή υδρογόνου παρατηρείται στο θάλαμο της καθόδου [20] υπό αναερόβιες συνθήκες (δηλ., απουσία οξυγόνου), με σύγχρονη ροή ηλεκτρονίων στο εξωτερικό κύκλωμα από την άνοδο στην κάθοδο. Επομένως, ροή ρεύματος και παραγωγή υδρογόνου πρέπει να εξελίσσονται παράλληλα. Πράγματι, έτσι συνέβη, όπως φαίνεται στο Σχ.2. Η παραγωγή υδρογόνου ήταν μικρότερη μέσω ΦΗΧ διεργασίας από εκείνη μέσω ΦΚ διεργασίας. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο, καθώς στην περίπτωση ΦΗΧ διεργασίας, η ροή ρεύματος, επομένως και η παραγωγή υδρογόνου, περιορίζεται από την αγωγιμότητα της κυψελίδας. Οι τιμές του ρεύματος που μετρήθηκαν παρουσία διαφόρων θυσιαστήριων οργανικών ενώσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Η αιθανόλη, η μεθανόλη και η γλυκερόλη έδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα, όμως και άλλες ουσίες, που αποτελούν μοντέλα αστικών λυμάτων, προσέφεραν επίσης ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Παρατηρούμε ότι τα ιοντικά τασιενεργά έδωσαν μεγαλύτερα ρεύματα από τα μη ιοντικά, προφανώς, διότι τα ιοντικά αυξάνουν την ιοντική αγωγιμότητα. Πάντως η παρουσία μιας θυσιαστήριας οργανικής ένωσης είναι απολύτως απαραίτητη για την παραγωγή σημαντικών τιμών ρεύματος. Έτσι, στην περίπτωση σκέτου νερού, οι τιμές του ρεύματος ήταν πολύ χαμηλές. Ο Πίνακας 1, μας λέει ότι είναι δυνατόν να παραχθεί σημαντικό ηλεκτρικό ρεύμα και, συνεπώς, σημαντική ποσότητα υδρογόνου, με κατανάλωση ουσιών που μπορούμε να βρούμε σε λύματα. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της συμπεριφοράς της κυψελίδας παρουσία ενός κοινού υγρού απορρυπαντικού, όπως το εμπορικό απορρυπαντικό του Πίνακα 1. Βεβαίως, το βασικό ερώτημα που τίθεται στην προκειμένη περίπτωση είναι, ποιά είναι τα προϊόντα της οξείδωσης αυτών των υλικών; Είναι εφικτή η συνολική μετατροπή τους σε αδρανή ύλη και χημική ενέργεια; Το ζήτημα αυτό είναι υπό μελέτη στο εργαστήριό μας.



Σχήμα 2. Ρεύμα (άνω καμπύλη) και ρυθμός παραγωγής υδρογόνου (κάτω καμπύλη) από κυψελίδα δύο θαλάμων με χημική πόλωση: 1.0 mol/L NaOH +20% κ.ο. Αιθανόλη στο θάλαμο ανόδου και 1.0 mol/L H₂SO₄ στο θάλαμο καθόδου

Πίνακας 1. Τιμές ρεύματος παρουσία διαφόρων θυσιαστήριων ενώσεων.

Θυσιαστήρια ένωση	Ρεύμα (mA)
Σκέτο νερό	1.1
MeOH(20%v.)	11.2
EtOH (20% v.)	10.3
PrOH(20%v.)	10.0
Glycerol (20% v.)	11.2
Ammonia (1% v.) ¹	4.4
Urea (0.83 mole/L)	2.0
Triton X-100(2% v.) ²	1.9
SDS (0.033 mole/L) ³	4.9
CTAB (0.033 mole/L) ⁴	2.4
Υγρό σαπούνι πιάτων (1%v.) ⁵	3.5

¹αραιωμένο διάλυμα αμμωνίας 25%

²μη ιοντικό τασιενεργό: Polyoxyethylene-(10) isooctylphenyl ether

³ανιοντικό τασιενεργό: Sodium Dodecylsulfate

⁴κατιοντικό τασιενεργό: Cetyltrimethylammonium Bromide

⁵εμπορικό υγρό σαπούνι με το όνομα AVA

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Υδρογόνο και ηλεκτρική ενέργεια μπορούν να παραχθούν μέσω φωτοκαταλυτικών και φωτοηλεκτροχημικών διεργασιών με φωτοκαταλυτική αποικοδόμηση διαφόρων οργανικών ουσιών. Αλκοόλες μικρής αλειφατικής αλυσίδας και γλυκερόλη δίνουν τις μεγαλύτερες αποδόσεις, όμως ακόμη και υδάτινοι οργανικοί ρύποι θα μπορούσαν να παρουσιάσουν σχετικό ενδιαφέρον. Οι ανωτέρω διεργασίες είναι, ούτως ή άλλως, εφαρμόσιμες στην επεξεργασία της γλυκερόλης, η οποία, ως παραπροϊόν της παρασκευής βιοντήζελ, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε τη Γενική Γραμματεία Ερευνάς και Τεχνολογίας για οικονομική ενίσχυση μέσω του προγράμματος ΠΕΝΕΔ (03ΕΔ607)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Herrmann, J.M., Guillard, C., Disdier, J., Lehaut, C., Malato, S., Blanco, J., Appl. Catal., B 35, pp.281-294, 2002.
2. Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W., Bahnemann, D. W., Chem. Rev. 95, pp.69-96, 1995.
3. Choi, H., Stathatos, E., Dionysiou, D. D., Desalination 202, pp.199-206, 2007.
4. O'Regan, B., Gratzel, M., Nature 353, pp.737-740, 1991.
5. Fujishima, A., Honda, K., Nature 238, pp.37-38, 1972.
6. Sakata, T., Kawai, T., Chem. Phys. Lett. 80, pp.341-344, 1981.
7. Ni, M., Leung, M. K. H., Leung, D. Y. C., Sumathy, K., Renew. Sustain. Energy Rev. 11, pp.401-425, 2007.
8. Bak, T., Nowotny, J., Rekas, M., Sorrell, C. C., Int. J. Hydrogen Energy 27, pp.991-1022, 2002.
9. Nada, A. A., Hamed, H. A., Barakat, M. H., Mohamed, N. R., Veziroglu, T. N., Int. J. Hydrogen Energy 33, pp.3264-3269, 2008.
10. Dauenhauer, P. J., Salge, J. R., Schmidt, L. D., J. Catal. 244, pp.238-247, 2006.
11. Kondarides, D. I., Daskalaki, V. M., Patsoura, A., Verykios, X. E., Catal. Lett. 122, pp.26-32, 2008.
12. Mizukoshi, Y., Makise, Y., Shuto, T., Hu, J., Tominaga, A., Shironita, S., Tanabe, S., Ultrason. Sonochem. 14, pp.387-392, 2007.
13. Strataki, N., Bekiari, V., Kondarides, D. I., Lianos, P., Appl. Catal., B 77, pp.184-189, 2007.
14. Nada, A. A., Barakat, M. H., Hamed, H. A., Mohamed, N. R., Veziroglu, T. N., Int. J. Hydrogen Energy 30, pp.687-691, 2005.
15. Mohapatra, S. K., Misra, M., Mahajan, V. K., Raja, K. S., J. Phys. Chem. C 111, pp.8677-8685, 2007.
16. Milczarek, G., Kasuya, A., Mamykin, S., Arai, T., Shinoda, K., Tohji, K., Int. J. Hydrogen Energy 28, pp.919-926, 2003.
17. Matsuoka, M., Kitano, M., Takeuchi, M., Tsujimaru, K., Anpo, M., Thomas, J. M., Catal. Today 122, pp.51-61, 2007.
18. Kelly, N. A., Gibson, T. L., Int. J. Hydrogen Energy 31, pp.1658-1673, 2006.
19. Mishra, P. R., Shukla, P. K., Srivastava, O. N., Int. J. Hydrogen Energy 32, pp.1680-1685, 2007.
20. Antoniadou, M., Bouras, P., Strataki, N., Lianos, P., Int. J. Hydrogen Energy 33, pp.5045-5051, 2008.
21. Kaneko, M., Nemoto, J., Ueno, H., Gokan, N., Ohnuki, K., Horikawa, M., Saito, R., Shibata, T., Electrochem. Commun. 8, pp.336-340, 2006.
22. Mills, A., Elliott, N., Hill, G., Durrant, J. R., Willis, R. L., Photochem. Photobiol. Sci. 2, pp.591-596, 2003.
23. Strataki, N., Lianos, P., J. Adv. Oxid. Technol. 11, p.111-115, 2008.
24. Mohapatra, S. K., Misra, M., Mahajan, V. K., Raja, K.S., J. Phys. Chem. C 111, pp.8677-8685, 2007.
25. Hayden, B. E., Malevich, D. V., Pletcher, D., Electrochem. Commun. 3, pp.395-399, 2001.
26. Patsoura, A., Kondarides, D. I., Verykios, X. E., Applied Catal., B 64, pp.171-179, 2006.
27. Patsoura, A., Kondarides, D. I., Verykios, X. E., Catal. Today 124, pp.94-102, 2007.
28. Ashokkumar, M., Int. J. Hydrogen Energy 23, pp.427-438, 1998.

ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC)

Ι. Χάσικος, Χ. Σαρίμβεης, Π.Α. Ζέρβας και Ν.Χ. Μαρκάτος

Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 157 80 Αθήνα, e-mail:

hsarimv@central.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα κελιά καυσίμου (fuel cells) αποτελούν τα τελευταία χρόνια μία ραγδαίως εξελισσόμενη τεχνολογία με πληθώρα επίγειων και κινητών εφαρμογών. Η βιωσιμότητα, η αποδοτικότητα και η ευρωστία των συστημάτων κελιών καυσίμου εξαρτάται έντονα από τη βελτιστοποίηση και τη ρύθμιση της λειτουργίας τους. Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα ολοκληρωμένο μοντέλο βελτιστοποίησης και ρύθμισης μιας συστοιχίας κελιών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC). Αρχικά μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης, δημιουργείται μία βάση δεδομένων, που αποτελείται από τιμές σε μόνιμη κατάσταση των ρυθμιζόμενων μεταβλητών και των μεταβλητών εκ χειρισμού για όλο το εύρος λειτουργίας της συστοιχίας. Στη συνέχεια, επιδιώκεται ο προσδιορισμός συσχετίσεων μεταξύ των παραμέτρων εισόδου-εξόδου του συστήματος (μεταμοντελοποίηση) με χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ). Στο επόμενο στάδιο, διαμορφώνεται και επιλύεται ένα πρόβλημα Μη-Γραμμικού Προγραμματισμού (Non Linear Programming Problem, NLP) όπου ως αντικειμενική συνάρτηση θέτουμε το παρεχόμενο προς κατανάλωση υδρογόνο του οποίου αποσκοπούμε την ελαχιστοποίηση για μια δεδομένη απαίτηση ισχύος. Με βάση τη διαμόρφωση και επίλυση του προβλήματος NLP, διαμορφώνεται ένας πίνακας (look-up table), ο οποίος περιέχει τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών της συστοιχίας για κάθε πιθανή απαίτηση ισχύος. Τελευταίο βήμα αποτελεί ο σχεδιασμός ενός ρυθμιστή με τη χρήση της μεθοδολογίας του μοντέλου προβλεπτικής ρύθμισης (Model Predictive Control, MPC) για τη βέλτιστη ρύθμιση της απόκρισης της συστοιχίας των κελιών καυσίμου σε διάφορες επιθυμητές τιμές της απαίτησης ισχύος. Η αποδοτικότητα του ρυθμιστή MPC που σχεδιάστηκε απεικονίζεται μέσα από μια σειρά προσομοιώσεων, που δείχνουν ότι μπορούν να επιτευχθούν ταυτόχρονα τόσο η καλή δυναμική συμπεριφορά της συστοιχίας, όσο και η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης του υδρογόνου.

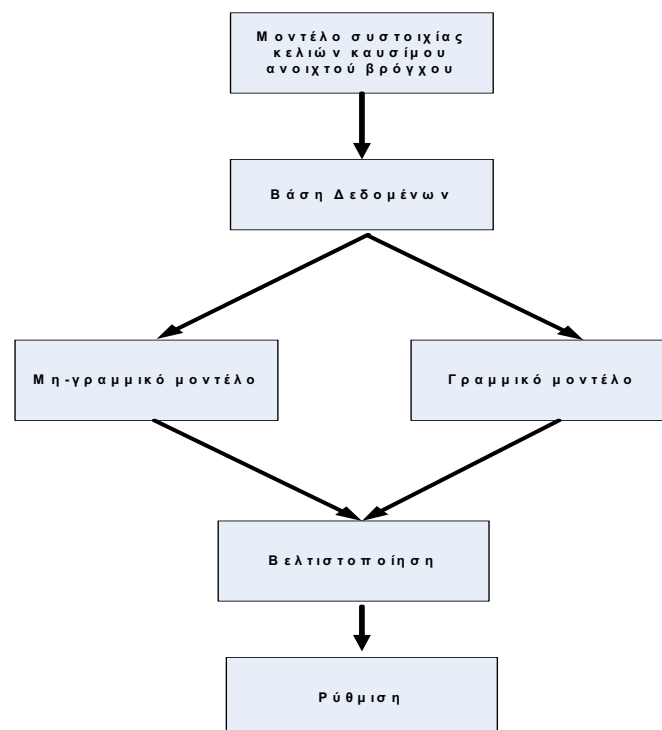
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα κελιά καυσίμου είναι διατάξεις οι οποίες μετατρέπουν τη χημική ενέργεια που περιέχεται σε ένα καύσιμο, όπως το υδρογόνο, σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, χωρίς καύση. Τα κελιά καυσίμου λειτουργούν σε χαμηλά επίπεδα θορύβου και δεν εκλύουν ρυπογόνα καυσαέρια. Η χρήση της τεχνολογίας των κελιών καυσίμου έχει πολλά οικονομικά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα έναντι των μηχανών εσωτερικής καύσης αλλά και των μπαταριών. Εξαιτίας αυτών των πλεονεκτημάτων, η τεχνολογία των κελιών καυσίμου χρησιμοποιείται ευρέως πλέον τόσο σε επίγειες, όσο και σε κινητές εφαρμογές. Συγκεκριμένα, τα κελιά καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) έχουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι άλλων τύπων κελιών καυσίμου κάτι που τους δίνει την δυναμική να αποτελέσουν μία από τις κύριες ενεργειακές τεχνολογίες του μέλλοντος.

Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη τεχνολογία θα πρέπει να ξεπεράσει μια σειρά από σημαντικά προβλήματα ούτως ώστε να καταστεί πιο ανταγωνιστική και αποδοτική σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας. Συγκεκριμένα, πολλές ερευνητικές προκλήσεις προκύπτουν όσον αφορά στη βέλτιστη λειτουργία και ρύθμιση κελιών καυσίμου εξαιτίας της πολύπλοκης δομής των κύριων και βοηθητικών διατάξεων που συνιστούν το σύστημα.

Στην βιβλιογραφία προτείνεται ένας αρκετά μεγάλος αριθμός μεθοδολογιών ρύθμισης για συστήματα κελιών καυσίμου. Τέτοιες μεθοδολογίες μπορεί να είναι απλές, όπως αυτή των αναλογικών – ολοκληρωτικών – διαφορικών (Proportional – Integral – Derivative, PID) ρυθμιστών αλλά και πιο σύνθετες, όπως αυτές των ασαφών ρυθμιστών και των ρυθμιστών προβλεπτικού μοντέλου (Model Predictive Control, MPC) [1-5].

Σε αυτή την εργασία, παρουσιάζεται μια νέα μεθοδολογία για την βέλτιστη ρύθμιση μιας συστοιχίας κελιών καυσίμου PEM. Αρχικά, με τη βοήθεια ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης, κατασκευάζεται μια βάση δεδομένων η οποία περιέχει τις μεταβλητές εισόδου και εξόδου του συστήματος. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται η μεθοδολογία των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ) για να αναπτυχθούν μη γραμμικές συσχετίσεις ανάμεσα στις μεταβλητές εισόδου και εξόδου. Η βάση δεδομένων που κατασκευάστηκε χρησιμοποιείται και για την επαλήθευση της ακρίβειας των μοντέλων που αναπτύχθηκαν. Ακολούθως, διαμορφώνεται ένα πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού, η λύση του οποίου είναι οι βέλτιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης. Στο τελευταίο στάδιο, σχεδιάζεται ένας ρυθμιστής με βάση την μεθοδολογία της ρύθμισης προβλεπτικού μοντέλου (MPC) [6] για τη βέλτιστη ρύθμιση της απόκρισης της συστοιχίας των κελιών καυσίμου σε διάφορες επιθυμητές τιμές της απαίτησης ισχύος. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται διαγραμματικά η προτεινόμενη μεθοδολογία.



Σχήμα 1: Διάγραμμα ροής της προτεινόμενης μεθοδολογίας μοντελοποίησης, βελτιστοποίησης και ρύθμισης των κελιών καυσίμου PEM

2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ PEMFC

Η μεθοδολογία των τεσσάρων βημάτων που περιγράφεται στην παρούσα εργασία βασίζεται σε ένα λεπτομερές δυναμικό μοντέλο μιας συστοιχίας PEMFC, το οποίο αναπτύχθηκε από τους Pukrushpan et al [1]. Το μοντέλο αποτελείται από το κυρίως μέρος (κελιά καυσίμου) και από τα βοηθητικά μέρη (συμπιεστής, σύστημα ψύξης, σύστημα ύγρανσης, σωληνώσεις ανάμεσα στη συστοιχία και τους χώρους αποθήκευσης των αντιδρώντων συστατικών). Οι εισοδοί του μοντέλου είναι το δυναμικό του συμπιεστή, U_{cm} , και η ένταση ρεύματος της συστοιχίας I_{st} , ενώ μεταβλητές εξόδου είναι η καθαρή ισχύς, P_{net} , το δυναμικό που παράγεται στη συστοιχία, U_{st} και ο λόγος λ_{O_2} της εισαγόμενης μαζικής παροχής του οξυγόνου στη συστοιχία προς την αντίστοιχη ποσότητα που καταναλώνεται. Όλες οι εξισώσεις του μοντέλου παρουσιάζονται αναλυτικά στην παραπάνω εργασία.

2.1 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΤΑΜΟΝΤΕΛΩΝ

Το μοντέλο που αναφέρθηκε προηγουμένως χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των μεταβλητών εξόδου σε μόνιμη κατάσταση που αντιστοιχούν σε τιμές των μεταβλητών εισόδου, οι οποίες καλύπτουν όλη την περιοχή λειτουργίας της συστοιχίας. Πιο συγκεκριμένα, το εύρος τιμών για το ρεύμα της συστοιχίας είναι (20-350A), ενώ το εύρος τιμών για το δυναμικό του συμπιεστή είναι (20-250V). Ο υπολογιστικός χρόνος που χρειάζεται για κάθε προσομοίωση, όταν χρησιμοποιείται ηλεκτρονικός υπολογιστής με επεξεργαστή 1.87GHz Intel Pentium Core 2 είναι περίπου 1s. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν διαμορφώνουν μια βάση δεδομένων, η οποία αποτελείται από 524 ζεύγη μεταβλητών εισόδου-εξόδου. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται η δομή της βάσης δεδομένων καθώς επίσης και κάποια ενδεικτικά ζεύγη τιμών.

Πίνακας 1: Δομή της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη και επαλήθευση των μεταμοντέλων

Αριθμός δεδομένων	Μεταβλητές εισόδου		Μεταβλητές εξόδου	
	I_{st} (A)	U_{cm} (V)	P_{net} (W)	λ_{O_2}
1	60	50	14580	1.312
2	100	65	21640	1.176
3	150	90	29750	1.235
.....
.....
.....	75	60	17600	1.369
.....
524

Η βάση δεδομένων χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη συσχετίσεων ανάμεσα στις μεταβλητές εξόδου, P_{net} και λ_{O_2} και τις μεταβλητές εισόδου, I_{st} και U_{cm} της συστοιχίας. Πιο συγκεκριμένα, για την ανάπτυξη των μεταμοντέλων χρησιμοποιήθηκε η αρχιτεκτονική των νευρωνικών δικτύων ακτινικής συνάρτησης βάσης (Radial Basis Function, RBF). Ο λόγος

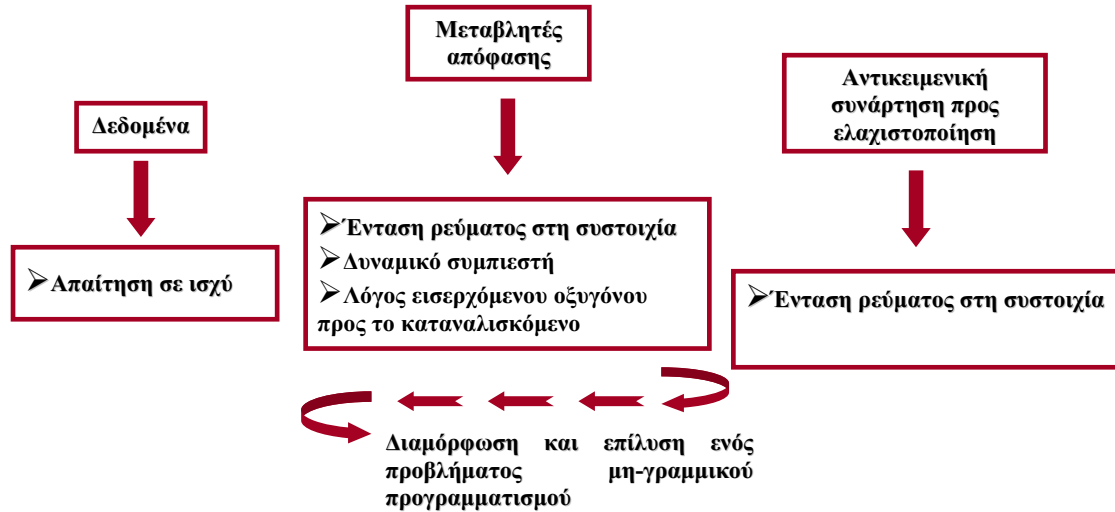
που προτιμήθηκε ο συγκεκριμένος τύπος νευρωνικών δικτύων είναι η απλή τοπολογία του αλλά και οι γρήγοροι και εύρωστοι αλγόριθμοι εκπαίδευσης του, που είναι διαθέσιμοι στην βιβλιογραφία. Η μέθοδος εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία βασίζεται στον ασαφή διαμερισμό του χώρου των μεταβλητών εισόδου, ο οποίος παράγεται με τον καθορισμό τριγωνικών ασαφών συνόλων [7]. Η διαδικασία εκπαίδευσης έγινε αρκετές φορές μεταβάλλοντας κάθε φορά τον ασαφή διαμερισμό του χώρου εισόδου (αριθμός ασαφών σημείων που προσδιορίζεται σε κάθε διάσταση εισόδου), που είναι ουσιαστικά και η μόνη μεταβλητή σχεδιασμού του αλγορίθμου που θα πρέπει να προσδιοριστεί από τον χρήστη. Ο μέσος χρόνος που απαιτείται ώστε να γίνει η εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου RBF με χρήση ενός επεξεργαστή Intel Core 2.2GHz είναι 18sec. Τα πιο καλά αποτελέσματα προέκυψαν τελικά για αριθμό ασαφών συνόλων ίσο με 16, που αντιστοιχούν σε 57 κρυμμένους νευρώνες. Οι στατιστικοί δείκτες που προκύπτουν από το μοντέλο παρουσιάζονται στον Πίνακα 2:

Πίνακας 2: Στατιστικοί δείκτες για τις μεταβλητές εξόδου του μοντέλου τεχνητών νευρωνικών δικτύων RBF

	Στατιστικοί δείκτες που συνδέονται με το μοντέλο νευρωνικών δικτύων RBF για 57 κρυφούς νευρώνες	
	P_{net}	λ_{O_2}
$RMSE$	52.9235	0.0426
R^2	0.9999	0.9997
$F\text{-statistic}$	2604739.5	867812.4
R_{cv}^2	0.9998	0.9996
S_{PRESS}	98.2385	0.0513

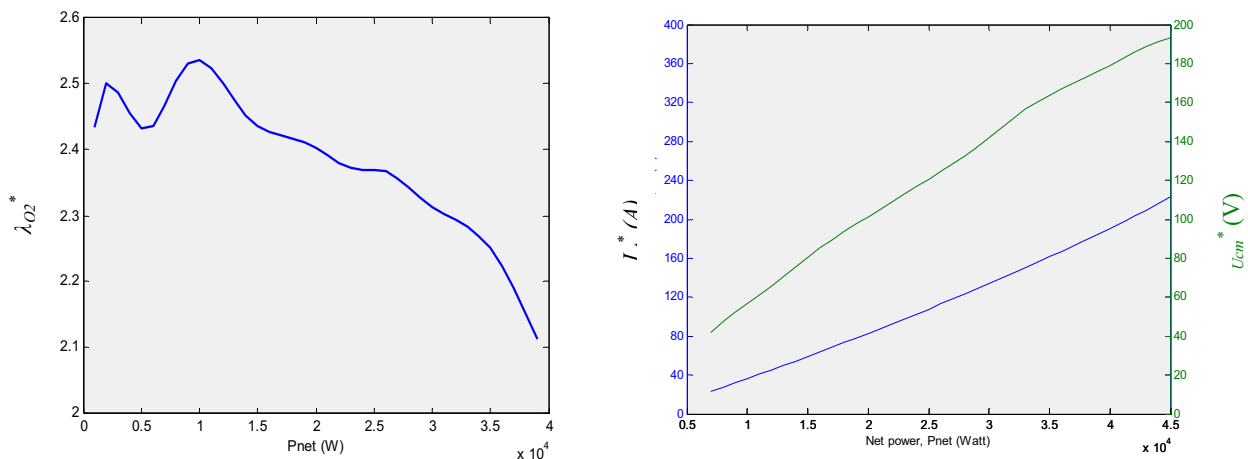
3. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ PEMFC

Η λειτουργία μιας συστοιχίας κελιών καυσίμου μπορεί να βελτιστοποιηθεί αν επιλεγθούν οι κατάλληλες τιμές της έντασης του ρεύματος της συστοιχίας και του δυναμικού του συμπιεστή. Αυτές οι τιμές δεν παραμένουν σταθερές, αλλά εξαρτώνται από την ισχύ που χρειάζεται να παράξει η συστοιχία. Σε αυτό το σημείο της εργασίας, τα μεταμοντέλα που κατασκευάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των βέλτιστων τιμών των μεταβλητών εισόδου της συστοιχίας για διάφορες τιμές απαίτησης ισχύος. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης διαμορφώνεται πλήρως από τους περιορισμούς που θα πρέπει να ικανοποιούνται από τη λύση του προβλήματος και από το κριτήριο λειτουργίας, το οποίο είναι η ελαχιστοποίηση του ρεύματος της συστοιχίας για ένα δεδομένο φορτίο ισχύος. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται γραφικά η διαμόρφωση του προβλήματος βελτιστοποίησης:



Σχήμα 2: Διαμόρφωση του προβλήματος μη γραμμικού προγραμματισμού (NLP)

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο είναι ένα πρόβλημα μη-γραμμικού προγραμματισμού (Non Linear Programming, NLP). Το ολικό ελάχιστο του προβλήματος μπορεί να βρεθεί με τη χρήση του GAMS [8]. Η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης περιέχει τις βέλτιστες τιμές όλων των μεταβλητών απόφασης (τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών εκ χειρισμού, I_{st}^* , U_{cm}^* καθώς επίσης και της μεταβλητής εξόδου $\lambda_{O_2}^*$):



Σχήμα 3: Βέλτιστες τιμές των μεταβλητών I_{st}^* , U_{cm}^* , $\lambda_{O_2}^*$ για διάφορες τιμές απαίτησης σε ισχύ

4. ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ PEMFC

Τελευταίο βήμα για την ανάπτυξη του προτεινόμενου πλαισίου είναι ο σχεδιασμός μιας βέλτιστης μεθοδολογίας ρύθμισης του συστήματος κελιών καυσίμου. Η ρύθμιση των κελιών καυσίμου αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα λόγω των πολλών και αντικρουόμενων κριτηρίων που καθορίζουν την απόδοση των συστημάτων κελιών καυσίμου. Ο στόχος της ρύθμισης ενός συστήματος κελιών καυσίμου είναι κατά πρώτον η βελτίωση της δυναμικής του συμπεριφοράς, δηλαδή η μείωση του χρόνου που χρειάζεται το σύστημα ώστε να φτάσει σε

μόνιμες συνθήκες λειτουργίας όταν αλλάξει η απαίτηση σε ισχύ. Αυτό αποκτά ακόμα μεγαλύτερη σημασία όταν ένα σύστημα κελιών καυσίμου χρησιμοποιείται σε εφαρμογές στις οποίες οι αλλαγές σε απαίτηση ισχύος είναι συχνές, όπως για παράδειγμα τα αυτοκίνητα. Κατά δεύτερον, η ρύθμιση έχει ως στόχο την μείωση της πιθανότητας να σταματήσει απότομα η λειτουργία του συστήματος κελιών καυσίμου την χρονική στιγμή κατά την οποία αλλάζει η απαίτηση σε ισχύ λόγω στιγμιαίας έλλειψης σε οξυγόνο (η οποία με τη σειρά της μπορεί να προκαλέσει βλάβη στις μεμβράνες), δηλαδή ουσιαστικά επιδιώκεται η ομαλότερη μετάβαση του συστήματος σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης.

Η μέθοδος που υιοθετήθηκε στην παρούσα εργασία είναι αυτή της ρύθμισης δυναμικού μητρώου (Direct Matrix Control, DMC) [9], η οποία απεικονίζει με σαφήνεια την επιρροή κάθε μεταβλητής εκ χειρισμού στο σήμα εξόδου. Με τη χρήση της μεθοδολογία DMC, υπολογίζεται η αλληλουχία των τιμών των μεταβλητών εκ χειρισμού για ένα συγκεκριμένο ορίζοντα ρύθμισης σε κάθε χρονική στιγμή δειγματοληψίας. Αυτό γίνεται με την επίλυση ενός προβλήματος ελαχιστοποίησης, το οποίο ελαχιστοποιεί την απόκλιση των μεταβλητών ρύθμισης και των επιθυμητών τιμών για ένα μελλοντικό ορίζοντα ρύθμισης. Η διαταραχή κατά τη διάρκεια του ορίζοντα πρόβλεψης θεωρείται σταθερή και ίση με τη διαφορά μεταξύ της παράγωγης διαδικασίας και της πρότυπης περίπτωσης πρόβλεψης αυτή τη στιγμή.

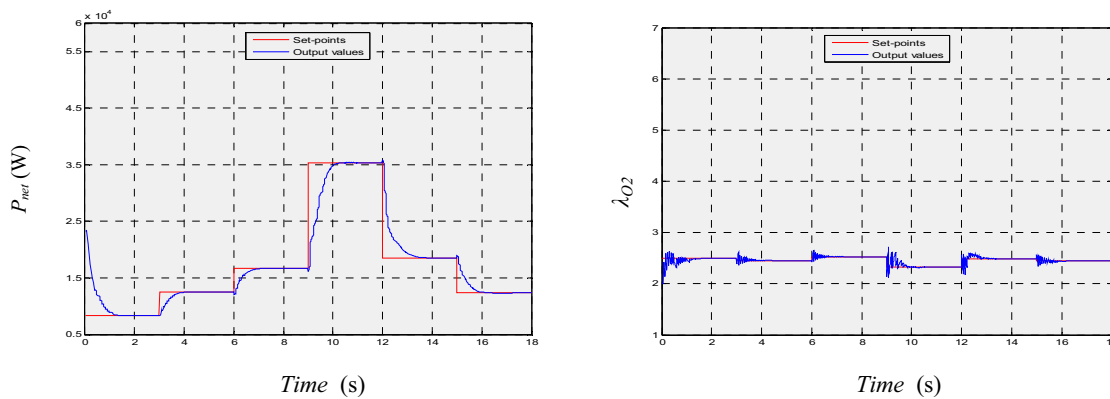
4.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ DMC ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΣΤΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ PEMFC

Το σενάριο που χρησιμοποιήθηκε για την δοκιμή της προτεινόμενης μεθοδολογίας DMC παρουσιάζεται στον Πίνακα 3:

Πίνακας 3: Σενάριο για την δοκιμή της προτεινόμενης μεθοδολογίας ρύθμισης που αποτελείται από διάφορες επιθυμητές τιμές της απαίτησης σε καθαρή ισχύ P_{net}

Time instance (s)	P_{net} (W)	λ_{O_2}
0	8350	2.496
3	12540	2.452
6	16730	2.527
9	35360	2.323
12	18500	2.488
15	12350	2.447

Οι γρήγορες αποκρίσεις τόσο της καθαρής ισχύος, P_{net} , όσο και της μεταβλητής λ_{O_2} που φαίνονται στο Σχήμα 4, φανερώνουν την απόδοση και αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου.



Σχήμα 4: Απόκριση των μεταβλητών P_{net} , λ_{O_2} για τα βήματα που φαίνονται στον Πίνακα 3

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτήν την εργασία αναπτύσσεται ένα υπολογιστικό εργαλείο για τη βέλτιστη ρύθμιση συστημάτων κελιών καυσίμων συνδυάζοντας διάφορες τεχνικές μοντελοποίησης, βελτιστοποίησης και ρύθμισης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία χωρίζεται σε τέσσερα βήματα, τα οποία μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Κατ' αρχήν, μέσω ενός μοντέλου προσομοίωσης, παράγεται μια βάση δεδομένων η οποία περιλαμβάνει τις τιμές των μεταβλητών εισόδου και μεταβλητών εξόδου
- Δεύτερο βήμα αποτελεί η ανάπτυξη των μεταμοντέλων εισόδου-εξόδου, τα οποία βασίζονται στην αρχιτεκτονική των νευρωνικών δικτύων τύπου RBF
- Στο τρίτο βήμα αναπτύσσεται ένα look-up table , που βασίζεται στη διαμόρφωση και στην επίλυση ενός προβλήματος μη γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο περιέχει τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών του συστήματος για οποιαδήποτε πιθανή απαίτηση ισχύος στο λειτουργικό εύρος λειτουργίας του συστήματος.
- Τέλος, σχεδιάζεται ένας ρυθμιστής με βάση τις αρχές της ρύθμισης προβλεπτικού μοντέλου (MPC) για τη βέλτιστη ρύθμιση της απόκρισης του συστήματος για διάφορες επιθυμητές τιμές της απαίτησης σε ισχύ. Η βέλτιστη τιμή της μεταβλητής λ_{O_2} (η οποία προσδιορίζεται από τη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης όπως περιγράφεται πιο πάνω) χρησιμοποιείται ως επιπλέον μεταβλητή ρύθμισης. Η απόδοση του ρυθμιζόμενου συστήματος MPC που σχεδιάστηκε, αξιολογείται με μια σειρά προσομοιώσεων, οι οποίες δείχνουν ότι επιτυγχάνεται καλή δυναμική συμπεριφορά του συστήματος κλειστού βρόγχου, ενώ συγχρόνως η κατανάλωση υδρογόνου ελαχιστοποιείται.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J.T. Pukrushpan, A.G. Stefanopoulou, H. Peng, Control of Fuel Cell Power Systems, Springer, 2004
- [2] Rodatz, P., Paganelli, G., Guzzella, L., 2003, "Optimizing air supply control of a PEM fuel cell system ", Proceedings of the American Control Conference 3, pp. 2043-2048

- [3] Cheng Wang, Hsuan-Tsung Chen, Yee-Pien Yang, Jia-Yush Yen, 2007, "Multivariable robust control of a proton exchange membrane fuel cell system", *Journal of Power Sources* 177 (2008) 393–403
- [4] J.O. Schumacher, P. Gemmar, M. Denne, M. Zedda, M. Stueber, Control of proton exchange membrane fuel cells based on fuzzy logic, *Journal of Power Sources*, 129 (2004) 143-151
- [5] F. Zenith, S. Skogestad, Control of fuel cell power output, *Journal of Process Control*, 17 (2007), 333-347
- [6] Morari M, Lee J, *Model predictive control: Past, present and future*, *Computers and Chemical Engineering*, 1999, 23, 667-682.
- [7] Sarimveis H, Alexandridis A, Tsekouras G, Bafas G., A Fast and Efficient Algorithm for Training Radial Basis Function Neural Networks Based on a Fuzzy Partition of the Input Space, *Industrial and Engineering Chemical Research*, 2002, 41, 751-59
- [8] A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus, R. Raman, GAMS, User Guide. Available with the GAMS system or from <http://www.gams.com>; 1998.
- [9] Cutler, C. R., Ramaker, B.C., 1980, "Dynamic Matrix Control – A Computer Control Algorithm", Paper WP5-B, AIChE National Meeting, Houston, USA

ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ «ΠΡΑΣΙΝΟΥ» ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΠΕ) ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ/ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Χ. Χ. Χριστοδούλου¹, Γ. Ν. Καραγιώργης¹, Α. Πουλλικκάς² και Ν. Καραγιώργης³

¹ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Frederick, T.K 24729, 1303 Λευκωσία, Κύπρος, e-mail: eng.cc@fit.ac.cy

² Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου, T.K. 24506, 1399 Λευκωσία, Κύπρος, e-mail: apoullik@eac.com.cy

³ Hystore Technologies Ltd, Βιομηχανική Περιοχή Εργατών, 2643 Εργάτες, Λευκωσία, Κύπρος, e-mail: info@hystoretechnologies.com, www.hystoretechnologies.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα έρευνα αφορά την αυτόνομη παραγωγή, καθαρισμό και αποθήκευση «πράσινου» υδρογόνου με τη χρήση ενός υβριδικού συστήματος αποτελούμενου από Φωτοβολταϊκά (940Watt) και Ανεμογεννήτρια (1300Watt). Ο ηλεκτρισμός που παράγεται στιγμιαία από τα Φωτοβολταϊκά/Ανεμογεννήτρια διοχετεύεται μέσω μπαταριών (12DCV) και μετατροπέα τάσης (inverter) προς τη συσκευή ηλεκτρόλυσης νερού (7200Watt). Σε μια τυπική ημερήσια λειτουργία της μονάδας, παράγονται 7313Wh ηλεκτρισμού, η συσκευή ηλεκτρόλυσης λειτουργεί μόνο τρεις φορές (start-ups) για σύνολο περίπου μιας ώρας και παράγει συνολικά 1330 λίτρα H₂ σε πίεση 2barg, τα οποία αποθηκεύονται σε δεξαμενή μεταλλοϋδριδίων δυναμικότητας 5000 λίτρων H₂. Το παραγόμενο υδρογόνο, μετά την ηλεκτρόλυση, είναι κορεσμένο (30°C) με υγρασία, έχει καθαρότητα 99.4% H₂ και περιέχει 0.5% O₂ και 0.1% N₂, Ar, CO₂. Το O₂ μετατρέπεται, μέσω αντιδραστήρα καταλυτικής οξειδωσης με υδρογόνο, σε υγρασία που μαζί με την προ-υπάρχουσα υγρασία απομακρύνονται μέσω στηλών που περιέχουν υλικά (molecular sieves, CaCl₂, κλπ) απορρόφησης υγρασίας. Το ξηρό ρεύμα υδρογόνου που περιέχει 0.1% N₂, Ar, CO₂ αποθηκεύεται σε δεξαμενή μεταλλοϋδριδίων, όπου τα μη-απορροφούμενα και μη-συμπυκνούμενα N₂, Ar, CO₂ αέρια, ως τα μόνα που παραμένουν εξολοκλήρου στην αέρια φάση μέσα στη δεξαμενή, απομακρύνονται με στιγμιαία εκτόνωση. Το τελικά παραγόμενο «πράσινο» υδρογόνο έχει καθαρότητα μεγαλύτερη από 99.999%.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το υδρογόνο προωθείται από πολλές χώρες, συμπεριλαμβανομένων των χωρών της Ευρώπης και της Αμερικής, για να αποτελέσει την καθαρή, αιεφόρο λύση καυσίμου ιδιαίτερα στον τομέα των μεταφορών [1]. Η μερική αντικατάσταση του πετρελαίου στις μεταφορές από το υδρογόνο, θα έχει μεγαλύτερη αξία να πραγματοποιηθεί εάν το υδρογόνο που θα παράγεται είναι «πράσινο», δηλαδή, όταν παράγεται χωρίς να προκαλείται ρύπανση του περιβάλλοντος, όπως με εκπομπές CO₂ και άλλων ρύπων. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), όπως η Ηλιακή (Φωτοβολταϊκά) και Αιολική (Ανεμογεννήτριες) μπορούν να διαδραματίσουν σπουδαίο ρόλο για την παραγωγή «πράσινου» υδρογόνου με ηλεκτρολυτική διάσπαση του νερού [2-16]. Το υδρογόνο είναι το μόνο καύσιμο που δεν περιέχει άνθρακα και καιγόμενο παράγει μόνο νερό (H₂+½O₂↔H₂O). Άλλα καύσιμα περιέχουν άνθρακα/θείο που παράγουν ρύπους

όπως, CO₂, CO, SO₂ και άλλα. Πέραν από τη φιλικότητα προς το περιβάλλον, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Ιδιαίτερα με τη χρήση «Κυψελών Υδρογόνου» (H₂/Fuel Cells) και «πράσινου» υδρογόνου μπορεί να παραχθεί «πράσινος» ηλεκτρισμός, θερμική ενέργεια (θερμό νερό) και καθαρό νερό. Οι κυψέλες υδρογόνου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πληθώρα στατικών και κινητών εφαρμογών όπως, ως βοηθητικές γεννήτριες ηλεκτρισμού για υπολογιστές και για σταθμούς τηλεπικοινωνιών, καθώς και για Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα «Κυψελών Υδρογόνου» (Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles, ιδιωτικά αυτοκίνητα, λεωφορεία, golf-cars, μοτοσικλέτες, αναπηρικά τροχοκαθίσματα, κλπ). Επίσης, «πράσινος» ηλεκτρισμός από Κυψέλες Υδρογόνου μπορεί να διοχετευθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο για διασπαρμένη παραγωγή ηλεκτρισμού (DER technologies).

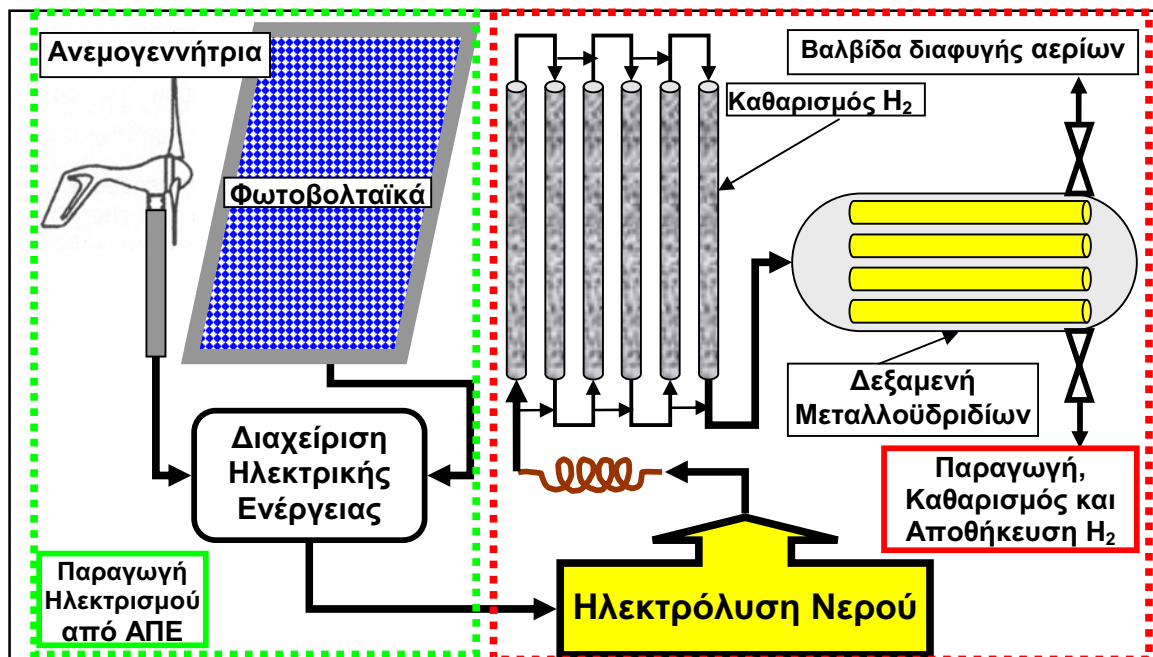
Συνήθως, οι «Κυψέλες Υδρογόνου» απαιτούν καθαρό υδρογόνο που θα βρίσκεται αποθηκευμένο σε μια δεξαμενή υδρογόνου. Στην παρούσα ερευνητική εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραγωγής, αποθήκευσης και καθαρισμού «πράσινου» υδρογόνου με τη μέθοδο της αλκαλικής ηλεκτρόλυσης νερού και τη χρήση «πράσινου» ηλεκτρισμού που παράγεται από ένα υβριδικό, αυτόνομο σύστημα Φωτοβολταϊκών/Ανεμογεννήτριας. Η πιλοτική μονάδα σχεδιάστηκε για παραγωγή 40000 λίτρων Υδρογόνου (99.999%) ανά μήνα. Παρόμοια αυτόνομα, υβριδικά συστήματα (Φωτοβολταϊκών/Ανεμογεννητριών) με μεγαλύτερη δυναμικότητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή «πράσινου» υδρογόνου, για διάφορες εφαρμογές όπως για σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου (Hydrogen Filling Stations).

2. ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ

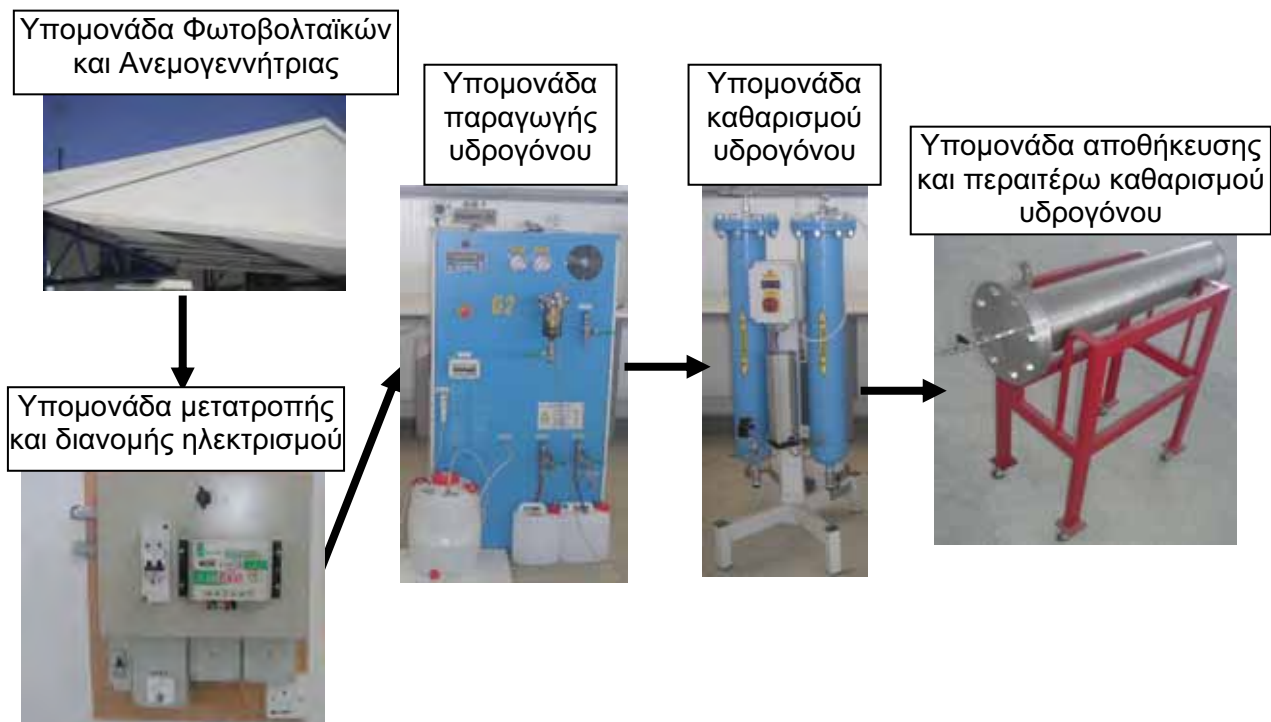
Ο συνολικός σχεδιασμός της πιλοτικής μονάδας φαίνεται στην Εικόνα 1, όπου διακρίνονται σχηματικά τα δύο κύρια συστήματα και οι υπομονάδες που αποτελούνται. Η πιλοτική μονάδα με τις φωτογραφίες των συσκευών που αποτελούνται οι διάφορες υπομονάδες φαίνεται στην Εικόνα 2. Τα δύο κύρια συστήματα της πιλοτικής μονάδας με τις υπομονάδες που αποτελούνται είναι τα ακόλουθα:

- a) Σύστημα παραγωγής/διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας με Φωτοβολταϊκά (Ηλιακή Ενέργεια) και Ανεμογεννήτρια (Αιολική Ενέργεια)**
 - Υπομονάδα Φωτοβολταϊκών και Ανεμογεννήτριας
 - Υπομονάδα μετατροπής τάσης (220ACVolts/50Hz) της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας
 - b) Σύστημα παραγωγής, καθαρισμού και αποθήκευσης υδρογόνου**
 - Υπομονάδα παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση νερού
 - Υπομονάδα καθαρισμού υδρογόνου (hydrogen purifier)
 - Υπομονάδα αποθήκευσης και περαιτέρω καθαρισμού υδρογόνου σε μεταλλικά υδρίδια
- Τα δύο κύρια συστήματα καθώς και οι αντίστοιχες υπομονάδες συνδέθηκαν ηλεκτρικά/ηλεκτρονικά ή/και μηχανικά για να αποτελέσουν τη συνολική πιλοτική μονάδα, η οποία αξιολογήθηκε ποσοτικά και ποιοτικά. Για παραγωγή 40000 λίτρων H₂ ανά μήνα, τα τεχνικά χαρακτηριστικά, όπως η ισχύς και δυναμικότητα κάθε υπομονάδας, ήταν η ακόλουθη:
- Υπομονάδα Φωτοβολταϊκών: 940Watt
 - Υπομονάδα Ανεμογεννήτριας: 1300Watt
 - Υπομονάδα μετατροπής (Inverter) και διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας (220ACVolts/50Hz): max1300Watt

- Υπομονάδα αλκαλικής ηλεκτρόλυσης νερού: $1.33\text{Nm}^3\text{H}_2/\text{h}$ (99.4% H_2 , 0.5% O_2 , 0.1%(N_2 , Ar, CO_2), 8451ppm H_2O (30°C)), πίεση λειτουργίας 2barg, μέγιστη πίεση λειτουργίας 4barg
- Υπομονάδα καθαρισμού υδρογόνου (αφυγραντήρες και αντιδραστήρας οξείδωσης): $1.33\text{Nm}^3\text{H}_2/\text{h}$, (99.9% H_2)
- Υπομονάδα αποθήκευσης υδρογόνου (Δεξαμενή μεταλλοϋδριδίων): 5000 λίτρων H_2 , (>99.999% H_2)



Εικόνα 1: Σχηματική παράσταση του συνολικού σχεδιασμού της πιλοτικής μονάδας, όπου διακρίνονται σχηματικά τα δύο κύρια συστήματα και οι υπομονάδες που αποτελούνται



Εικόνα 2: Φωτογραφίες των συσκευών που αποτελούνται οι διάφορες υπομονάδες του πιλοτικού συστήματος

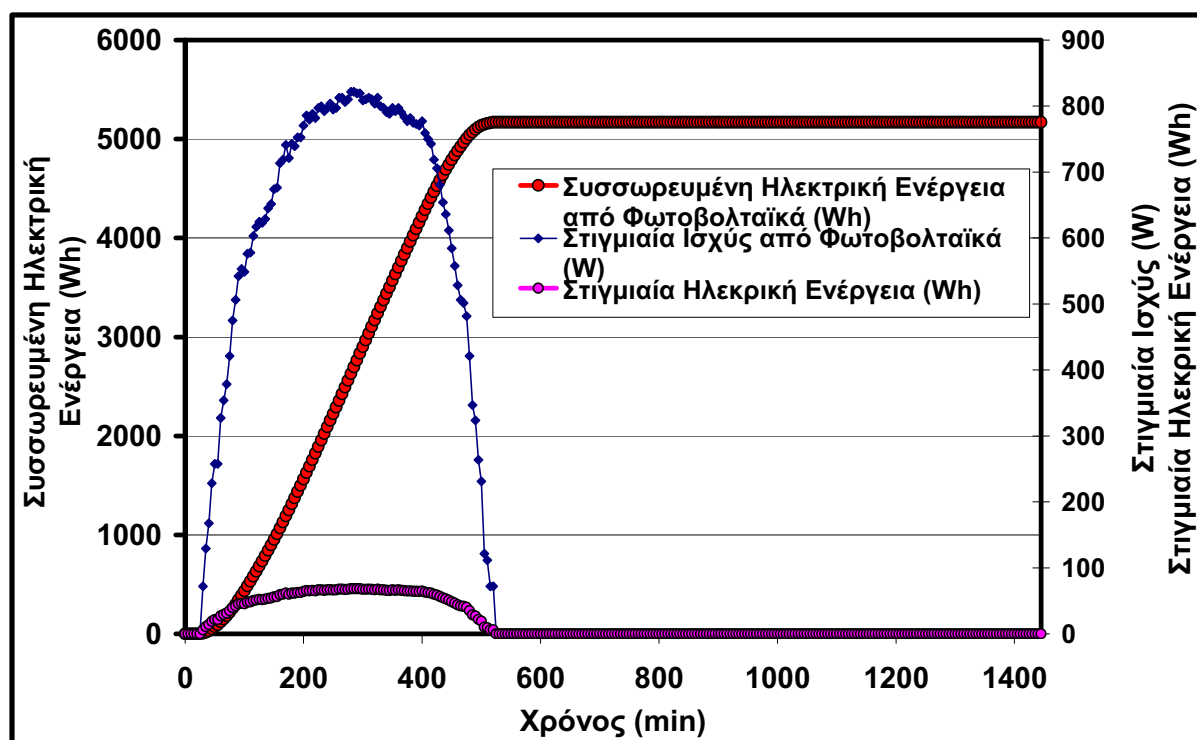
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

3.1 Υβριδική παραγωγή ηλεκτρισμού από Φωτοβολταϊκά και Ανεμογεννήτρια

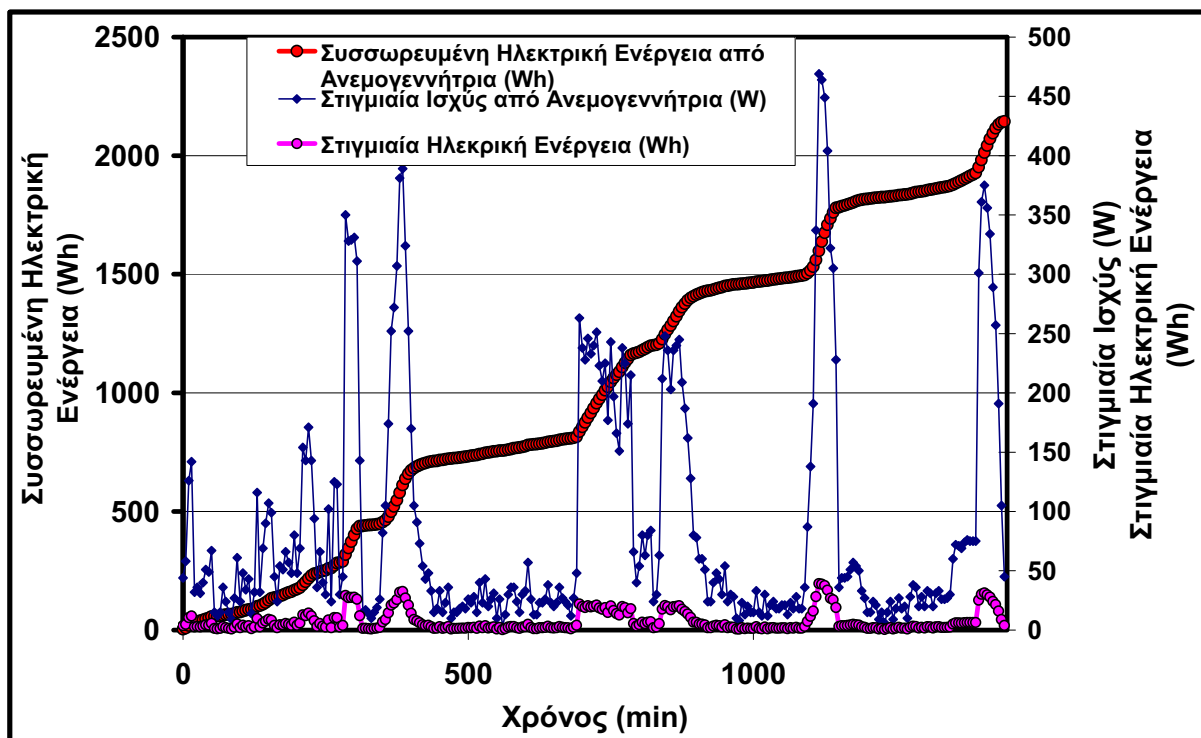
Ένα τυπικό διάγραμμα παραγωγής ηλεκτρισμού από τα Φωτοβολταϊκά εγκαταστημένης ισχύος 940W, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, φαίνεται στην Εικόνα 3. Βάσει του διαγράμματος αυτού υπολογίζεται ότι η υπομονάδα Φωτοβολταϊκών παράγει, κατά μέσο όρο, 5170Wh ηλεκτρική ενέργεια ανά ημέρα. Αυτό αντιστοιχεί με περίπου με 5.5 ώρες ανά ημέρα συνεχούς παραγωγής ηλεκτρισμού στη μέγιστη ισχύ (940W).

Παρόμοια, ένα τυπικό διάγραμμα παραγωγής ηλεκτρισμού από την Ανεμογεννήτρια εγκαταστημένης ισχύος 1300W, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, φαίνεται στην Εικόνα 4. Βάσει του διαγράμματος αυτού υπολογίζεται ότι η υπομονάδα Ανεμογεννήτριας παράγει, κατά μέσο όρο, 2145Wh ηλεκτρική ενέργεια ανά ημέρα. Αυτό αντιστοιχεί με περίπου με 1.65 ώρες ανά ημέρα συνεχούς παραγωγής ηλεκτρισμού στη μέγιστη ισχύ (1300W).

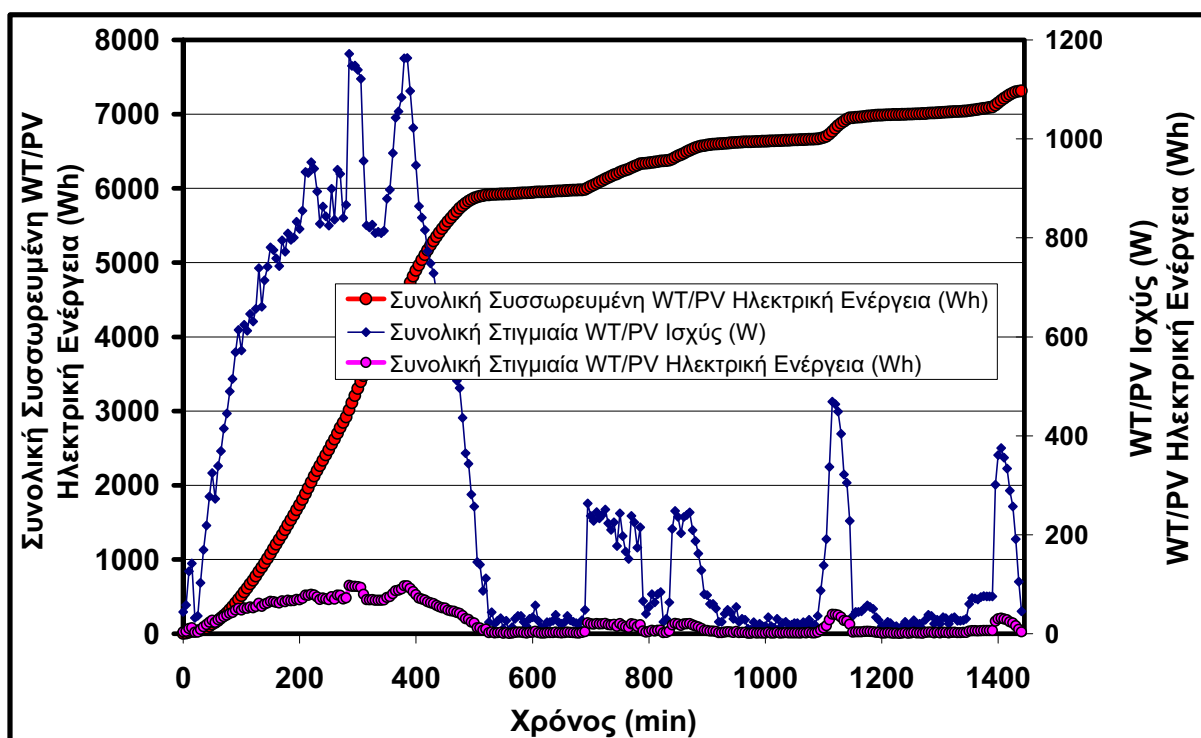
Η στιγμιαία και συνδυασμένη ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το υβριδικό σύστημα Φωτοβολταϊκών/Ανεμογεννήτριας φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 5. Βάσει του διαγράμματος αυτού υπολογίζεται ότι το υβριδικό σύστημα παράγει, κατά μέσο όρο, 7315Wh ηλεκτρικής ενέργειας ανά ημέρα. Αυτό αντιστοιχεί με περίπου με 3.27 ώρες ανά ημέρα συνεχούς παραγωγής ηλεκτρισμού στη μέγιστη συνδυασμένη ισχύ ($940+1300=2240W$).



Εικόνα 3: Διάγραμμα παραγωγής ηλεκτρισμού από τα Φωτοβολταϊκά εγκαταστημένης ισχύος 940W κατά τη διάρκεια μιας ημέρας



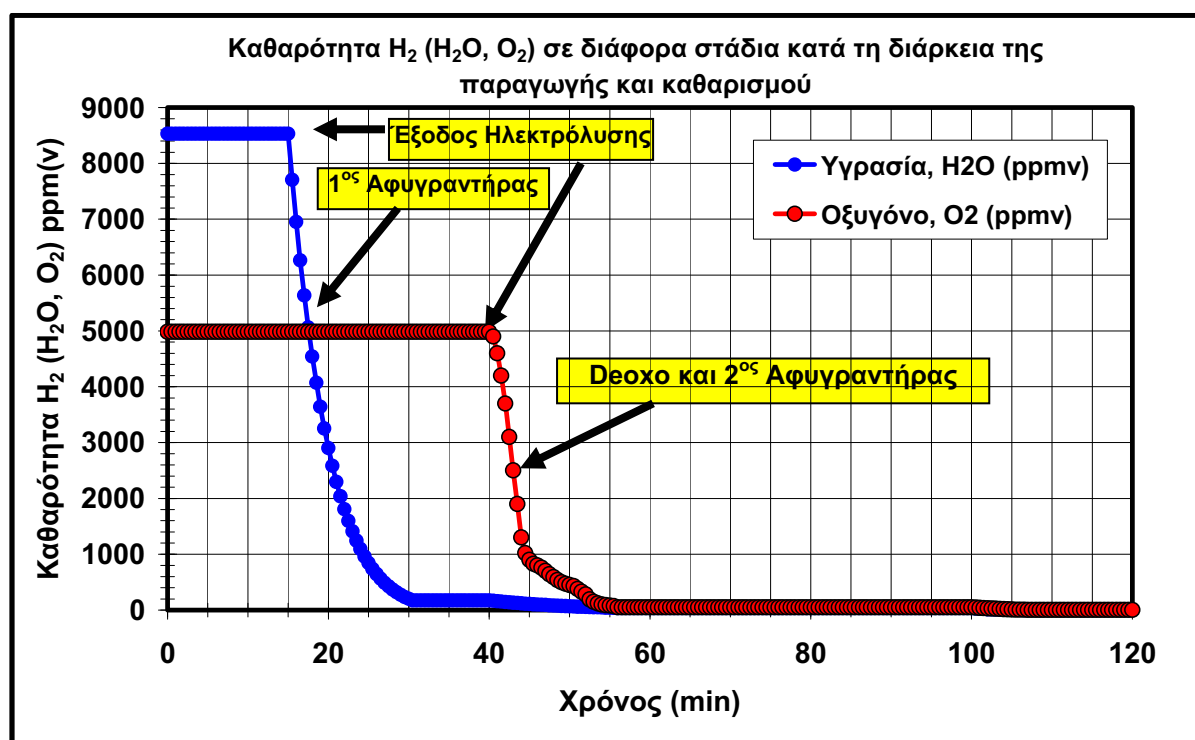
Εικόνα 4: Διάγραμμα παραγωγής ηλεκτρισμού από την Ανεμογεννήτρια εγκαταστημένης ισχύος 1300W κατά τη διάρκεια μιας ημέρας



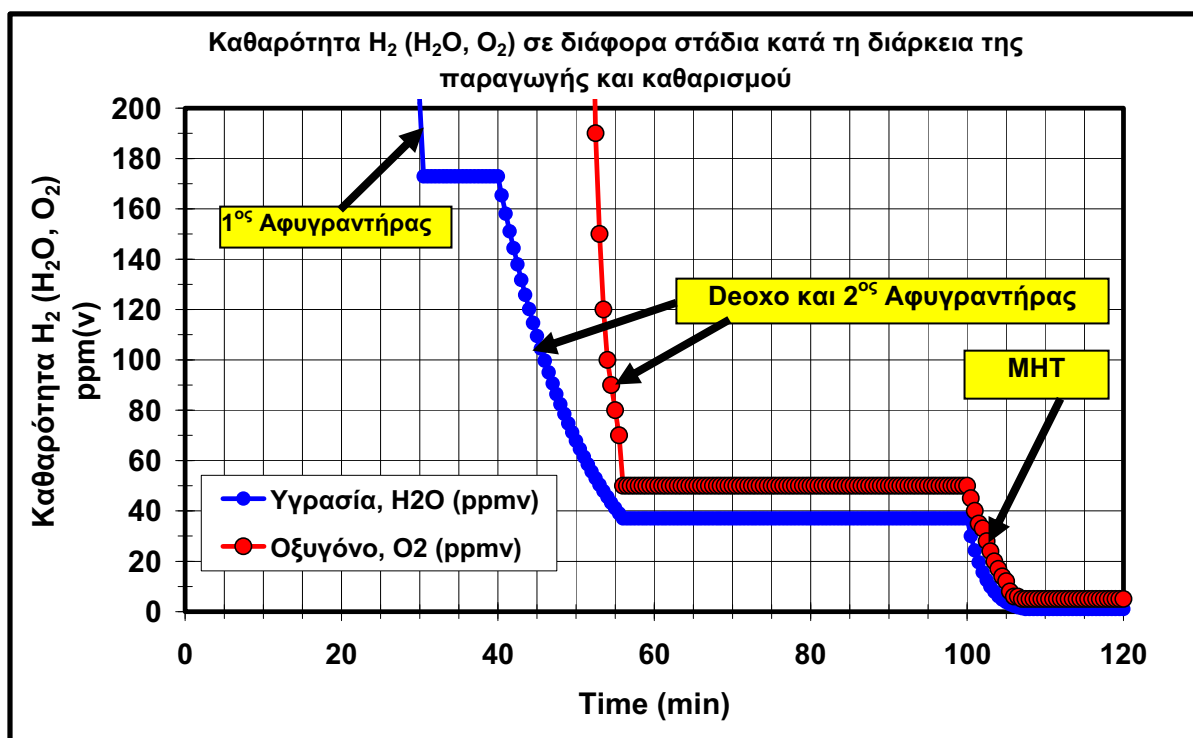
Εικόνα 5: Διάγραμμα παραγωγής ηλεκτρισμού από το υβριδικό σύστημα Φωτοβολταϊκών/Ανεμογεννήτριας συνδυασμένης εγκαταστημένης ισχύος 2240W κατά τη διάρκεια μιας ημέρας

3.2 Υπομονάδα ηλεκτρόλυσης και καθαρισμού υδρογόνου

Η αλκαλική ηλεκτρόλυση παράγει 1330 λίτρα H_2/h κορεσμένο με υδρατμό (στους $30^\circ C$ και 5bar) αέριο υδρογόνο καθαρότητας 90.4% H_2 , 0.5% O_2 και 0.1% N_2 , Ar, CO_2 , καταναλώνοντας ηλεκτρική ενέργεια ίση με 7200Wh. Το κορεσμένο με υδρατμό ρεύμα υδρογόνου οδηγήθηκε μέσα από στήλη αφυγραντήρα για απομάκρυνση της περισσότερης ποσότητας υγρασίας. Το ρεύμα οδηγήθηκε μέσα από ένα αντιδραστήρα καταλυτικής οξείδωσης του υδρογόνου (de-oxidizer reactor), όπου το οξυγόνο αντιδρά με μια μικρή ποσότητα υδρογόνου παράγοντας υγρασία. Μετά το ρεύμα υδρογόνου οδηγήθηκε σε μια δεύτερη στήλη αφυγραντήρα για απομάκρυνση της παραχθείσας υγρασίας. Το τελικό ρεύμα υδρογόνου, περιέχοντας μόνο «μη συμπυκνούμενα» αέρια (N_2 , Ar, CO_2) αποθηκεύτηκε στη δεξαμενή υδρογόνου, μέσα σε μεταλλοϋδρίδια σε πίεση 2barg. Τα μεταλλοϋδρίδια απορρόφησαν σχεδόν όλο το υδρογόνο αφήνοντας τα «μη συμπυκνούμενα» αέρια (N_2 , Ar, CO_2) στην αέρια φάση. Ανοίγοντας μια βαλβίδα διαφυγής αερίων, η αέρια φάση που περιείχε όλα τα ανεπιθύμητα αέρια απομακρύνθηκε στιγμιαία στην ατμόσφαιρα. Με τη μέθοδο αυτή η δεξαμενή απαλλάχτηκε της παρουσίας των ανεπιθύμητων αερίων (N_2 , Ar, CO_2) και παρέμεινε να περιέχει μόνο καθαρό υδρογόνο. Η ποιοτική ανάλυση σε περιεχόμενο H_2O και O_2 κατά τη διάρκεια των διαφόρων σταδίων καθαρισμού του υδρογόνου φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 6 και 7. Το αρχικό ρεύμα υδρογόνου (μετά από την ηλεκτρόλυση) περιείχε περίπου 8600 ppm H_2O και 5000ppm O_2 . Μετά τον τελικό καθαρισμό στην δεξαμενή μεταλλοϋδρίδιων περιέχει 99.999% H_2 με λιγότερο 5ppm H_2O και O_2 .



Εικόνα 6: Ποιοτική ανάλυση σε περιεχόμενο H_2O και O_2 κατά τη διάρκεια των διαφόρων σταδίων καθαρισμού του υδρογόνου



Εικόνα 7: Ποιοτική ανάλυση σε περιεχόμενο H₂O και O₂ κατά τη διάρκεια των διαφόρων σταδίων καθαρισμού του υδρογόνου

3.3 Λειτουργία πιλοτικής μονάδας

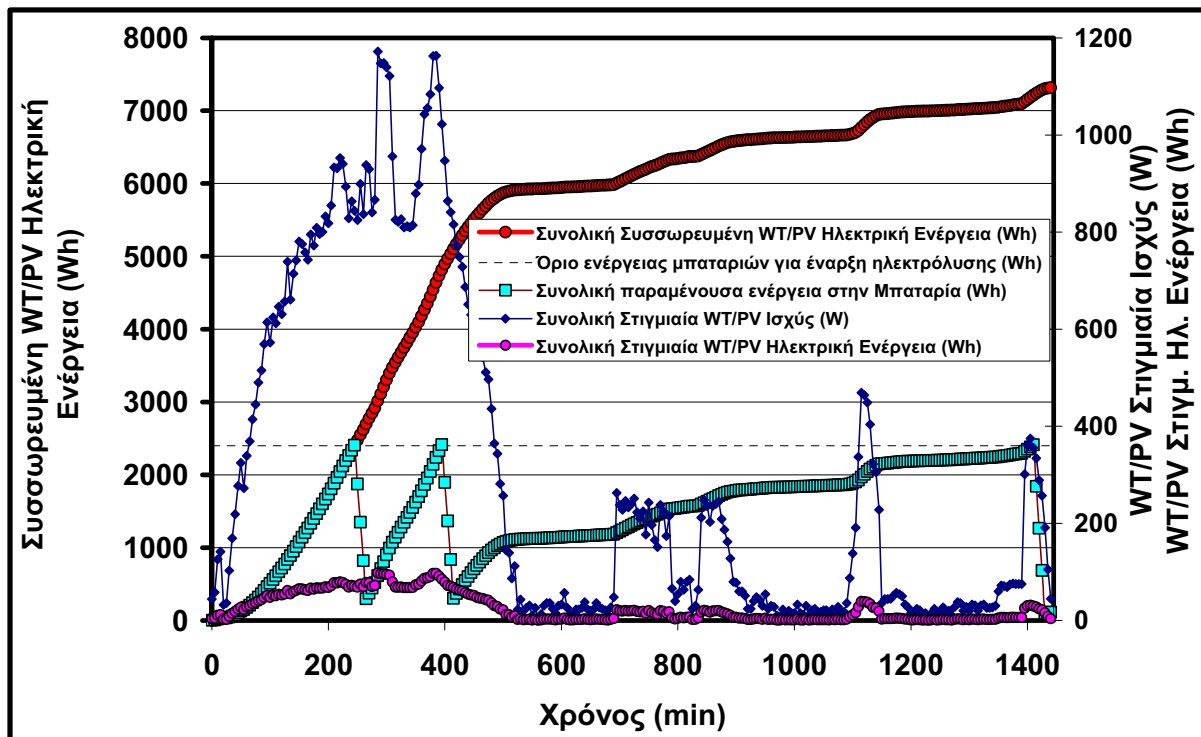
Η λειτουργία της πιλοτικής μονάδας πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το ακόλουθο σενάριο:

- Η λειτουργία άρχισε στις 7:00 π.μ με τις μπαταρίες άδειες
- Τα Φωτοβολταϊκά και η Ανεμογεννήτρια άρχισαν να φορτίζουν τις μπαταρίες μέχρι που η συνολική φόρτιση έφθανε το 80% της μέγιστης ενέργειας των μπαταριών (3000Wh), δηλαδή τα 2400Wh.
- Κατά τη στιγμή εκείνη, η συσκευή ηλεκτρόλυσης αρχίζει να λειτουργεί παράγοντας υδρογόνο, καταναλώνοντας ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από τη στιγμιαία παραγωγή των Φωτοβολταϊκών και της Ανεμογεννήτριας, καθώς και από την αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια των μπαταριών
- Καθ' όσο χρόνο οι μπαταρίες συνεχίζουν να διαθέτουν αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια ίση με το 20% της μέγιστης ενέργειας (3000Wh), δηλαδή 600Wh, η ηλεκτρολυτική συσκευή συνεχίζει να παράγει υδρογόνο. Τη στιγμή που το επίπεδο των 600Wh πέφτει, τότε η ηλεκτρολυτική συσκευή μεταπίπτει σε κατάσταση αναμονής (stand-by) μέχρι που το επίπεδο των 2400Wh (80%) θα έχει επιτευχθεί ξανά

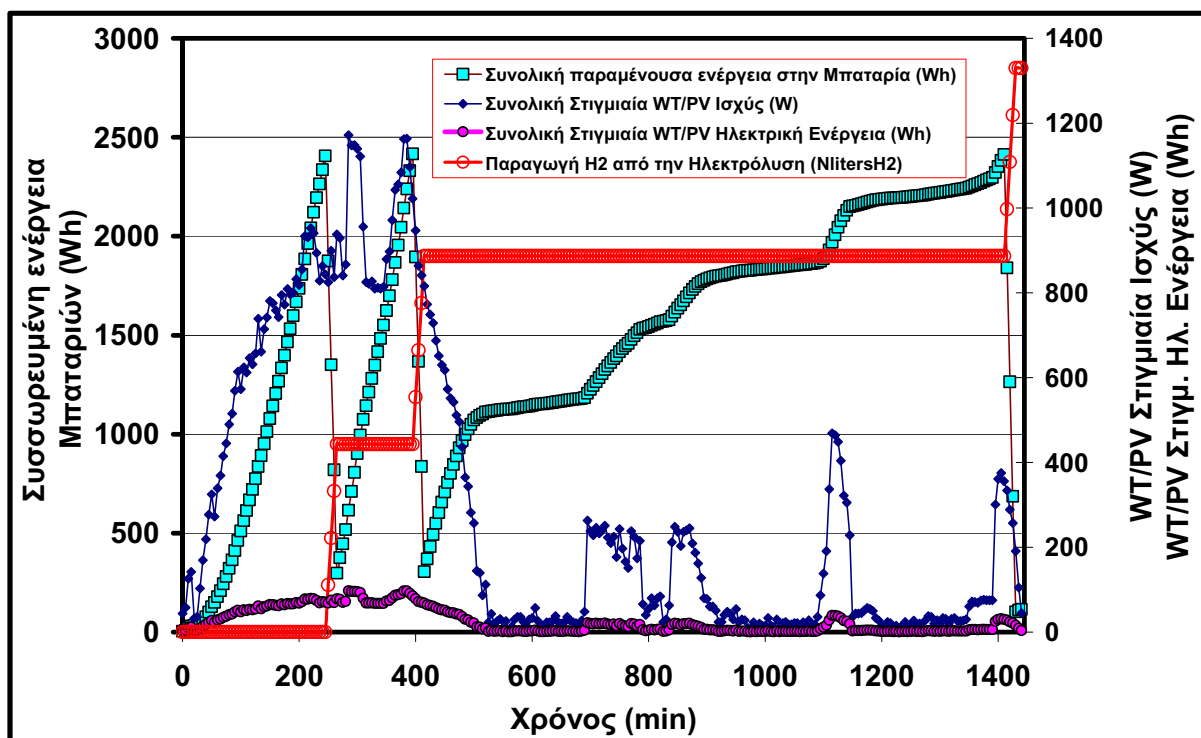
Τα αποτελέσματα μιας 24-ώρου πιλοτικής λειτουργίας φαίνονται στα διαγράμματα των Εικόνων 8-9. Η συνολική συνδυασμένη (Φωτοβολταϊκά και Ανεμογεννήτρια) παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι 7315Wh. Οι μπαταρίες φορτίζονται τρεις φορές στο επίπεδο των 80%. Μετά από κάθε φόρτιση, υπάρχει η αντίστοιχη περίοδος εκφόρτισης, όπου λειτουργεί η ηλεκτρολυτική συσκευή παράγοντας υδρογόνο. Υπάρχουν, στο σύνολο, τρεις περίοδοι εκφόρτισης κατά την διάρκεια των οποίων παράγονται συνολικά 1330 λίτρων υδρογόνου καταναλώνοντας 7200Wh ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό αποτελεί μια συνολική παραγωγή 40000 λίτρων υδρογόνου ανά μήνα.

Ακολουθώντας το πιο πάνω σενάριο λειτουργίας της πιλοτικής μονάδας, επιτυγχάνεται η

στοχευμένη παραγωγή 40000 λίτρων υδρογόνου ανά μήνα με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των περιόδων έναρξης λειτουργίας της ηλεκτρολυτικής συσκευής, έτσι ώστε να αυξάνεται η συνολική ζωή της ηλεκτρολυτικής συσκευής και ταυτόχρονα η ζωή των μπαταριών.



Εικόνα 8: Συνδυασμένη (PV/WT) παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και κατάσταση φόρτισης μπαταριών για 24 ώρες λειτουργίας της πιλοτικής μονάδας



Εικόνα 9: Συνδυασμένη (PV/WT) παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, κατάσταση φόρτισης μπαταριών και παραγωγή υδρογόνου για 24 ώρες λειτουργίας της πιλοτικής μονάδας

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη εγκαταστάθηκε ένα αυτόνομο, υβριδικό (Φωτοβολταϊκά/940W-Ανεμογεννήτρια/1300W) σύστημα παραγωγής «πράσινης» ηλεκτρικής ενέργειας μαζί με μια ηλεκτρολυτική συσκευή παραγωγής, αποθήκευσης και καθαρισμού «πράσινου» υδρογόνου. Το παρόν υβριδικό σύστημα λειτούργησε χωρίς προβλήματα παράγοντας περίπου 7315Wh «πράσινης» ηλεκτρικής ενέργειας ανά ημέρα, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή περίπου 1330 λίτρων καθαρού (>99.999%) «πράσινου» υδρογόνου ανά ημέρα. Η χρήση της δεξαμενής μεταλλοϋδριδίων ήταν σημαντική όχι μόνο για τη δυνατότητα της απευθείας αποθήκευσης (χωρίς την χρήση συμπιεστή) του παραγόμενου υδρογόνου κάτω από τη χαμηλή πίεση των 2barg, αλλά και για την επίτευξη αποθήκευσης με μεγάλη ογκομετρική πυκνότητα υδρογόνου, με ταυτόχρονο καθαρισμό του υδρογόνου σε εξαιρετικά υψηλά επίπεδα καθαρότητας (>99.999%). Αν και η συμπεριφορά των μεταλλοϋδριδίων εμφανίζεται να είναι πολύ σταθερή, εντούτοις χρειάζονται περισσότερες έρευνες στο να προσδιοριστεί επακριβώς η μακροχρόνια συμπεριφορά αυτών καθ' όσο αφορά την σταθερότητά τους κατά τον καθαρισμό του υδρογόνου σε επανειλημμένες φορτίσεις/εκφορτίσεις. Τα αποτελέσματα της παρούσα μελέτης δείχνουν την προοπτική ότι παρόμοια αυτόνομα, υβριδικά συστήματα (Φωτοβολταϊκών/Ανεμογεννητριών) με μεγαλύτερη δυναμικότητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή «πράσινου» υδρογόνου, για διάφορες εφαρμογές όπως για σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου (Hydrogen Filling Stations) στα Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα Κυψελών Υδρογόνου, που αποτελούν το μέλλον στον τομέα των μεταφορών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θέλουν να εκφράσουν τις ευχαριστίες τους προς τους Μηχανολόγους Μηχανικούς Α. Δημητρίου και Ι. Παπασοφόκλη για την υποστηρικτική πειραματική τους εργασία στα εργαστήρια της Hystore Technologies Ltd, κατά τη διάρκεια διεκπεραίωσης της παρούσας εφαρμοσμένης έρευνας. Η παρούσα έρευνα χρηματοδοτήθηκε μερικώς από το Ίδρυμα Προώθησης Έρευνας της Κύπρου, υπό τα Συμβόλαια: ΙΠΕ/ΝΕΠΡΟ/0603/02/ΥΔΡΟΓΟΝΟ και ΙΠΕ/ΝΕΠΡΟ/0204/09/ΗΛΙΟΣ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Office of the Press Secretary, U.S-EU Summit, Cooperation on the Development of a Hydrogen Economy, June 25, 2003, The United States (G. Bush) and the European Union (R. Prodi) agreed to collaborate on the acceleration of the development of the hydrogen economy, <http://www.whitehouse.gov/news/releases/2003/06/20030625-6.html>
2. Chris N. Christodoulou, G. N. Karagiorgis, A. Poullikkas and N. Karagiorgis, "Renewable Energy Sources (RES) electricity storage in the form of "green" hydrogen", *International Conference on Deregulated Electricity Market Issues in South-Eastern Europe (DEMSEE2008)*, September 22-23 2008, Nicosia, Cyprus
3. Chris N. Christodoulou, G. N. Karagiorgis, N. Karagiorgis, A. Poullikkas and N. Hadjiarygiou, "Green" electricity production by a grid-connected H₂/fuel cell in Cyprus", *Proceedings of the Renewable Energy Sources & Energy Efficiency Conference*, September 28-30, 2007, Hilton Park, Nicosia-Cyprus

4. Mark Paster, "Technologies, Challenges, Infrastructure Costs and Materials Needs", *Proceedings of the International Symposium on Materials Issues in a Hydrogen Economy*, November 12-15, 2007, Richmond, Virginia, USA
5. E. Varkaraki, N. Lymberopoulos, E. Zoulas, E. Kalyvas, Chris N. Christodoulou, G. Karagiorgis, and K. Stolzenburg, "Experiences from the operation of a wind-hydrogen pilot unit", *Proceedings of the 16th World Hydrogen Energy Conference*, Lyon, France, June 13-16, 2006
6. E. Varkaraki, N. Lymberopoulos, E. Zoulas, E. Kalyvas, Chris N. Christodoulou, P. Vionis and P. Chaviaropoulos, "Integrated wind-hydrogen systems for wind parks", *Proceedings of the EWEC*, Athens, Greece, February 27 - March 2, 2006
7. N. Lymberopoulos, E. Varkaraki, M. Zoulas, E. Kalyvas, Chris N. Christodoulou, G. Karagiorgis, K. Stolzenburg, A. Poullikkas, "Hydrogen: an alternative product for wind park developers", *EHEC 2005 '2nd European Hydrogen Energy Conference'*, Zaragoza, Spain, 22-25 November 2005
8. E. Varkaraki, E. Zoulas, N. Lymberopoulos, G. Karagiorgis, Chris N. Christodoulou and E. Kalyvas, "First results on the production of hydrogen from wind energy", *Proceedings of the 2st National Conference on Hydrogen Technologies*, October 20-22, 2005, EKETA, Themi, Thessaloniki-Greece
9. Chris N. Christodoulou, G. Karagiorgis, M. Menikou, N. Karagiorgis and A. Poullikkas, "Metal Hydrides and Hydrogen Storage Systems: On-going activities in the island of Cyprus", *Proceedings of the Workshop on "Mapping European Knowledge on Hydrogen Storage"*, October 28-29, 2004, Petten, The Netherlands
10. Chris N. Christodoulou, G. Karagiorgis, M. Menikou, A. Poullikas and N. Karagiorgis, "Green hydrogen production, storage and H₂/fuel cell electricity production: On-going projects in the island of Cyprus", *Proceedings of the International conference on (RES) Renewable Energy Resources for islands*, Larnaca, Cyprus, 30-31 August. 2004
11. M. Ball, M. Wietschel, O. Rentz, "Integration of a hydrogen economy into the German energy system: an optimising modelling approach", *International Journal of Hydrogen Energy*, **32** (2007) 1355-1368
12. E. Tzimas., P. Castello, S. Peteves, "The evolution of size and cost of a hydrogen delivery infrastructure in Europe in the medium and long term", *International Journal of Hydrogen Energy*, **32** (2007) 1369-1380
13. A. Poullikkas, Chris N. Christodoulou and G. Karagiorgis, "Overview of Wind Energy and Available Technologies", *The Cyprus Journal of Science & Technology*, **4(4)** (2005) 13-27
14. Chris N. Christodoulou, G. Karagiorgis, A. Poullikkas, N. Lymberopoulos and E. Varkaraki, "A Review on Hydrogen Storage Technologies", *The Cyprus Journal of Science & Technology*, **4(3)** (2005) 72-144
15. E. Zoulas, E. Varkaraki, N. Lymberopoulos, Chris N. Christodoulou, George N. Karagiorgis, "A Review on Water Electrolysis", *The Cyprus Journal of Science & Technology*, **4(2)** (2004) 41-71
16. C. Stiller, P. Seyde, U. Bunger and M. Wietsche, "Assessment of the Regional Hydrogen Demand and Infrastructure Build-up for 10 European Countries", on behalf of the Hy-Ways Consortium; published by *Fuel Cell Today*, 7 August 2007, www.fuelcelltoday.com

ΘΕΡΜΟ-ΧΗΜΙΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΥΔΡΑΤΜΩΝ ΑΠΟ ΟΞΕΙΔΟΑΝΑΓΩΓΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΗΛΙΑΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Σ. Λορέντζου¹, Α. Ζυγογιάννη¹, Χ. Παγκούρα¹, Χ. Αγραφιώτης¹,
Α.Γ. Κωνσταντόπουλος^{1,2}

¹ Εργαστήριο Τεχνολογίας Σωματιδίων και Αερολυμάτων (ΕΤΕΣΑ), Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διεργασιών (ΕΚΕΤΑ/ΙΤΧΗΔ), 6^ο χλμ. Χαριλάου-Θέρμης, 57001, Θεσσαλονίκη

² Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τ.Θ. 517, Πανεπιστημιούπολη, 54006, Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μία νέα προσέγγιση για την παραγωγή υδρογόνου από ηλιακή ενέργεια και νερό, μέσω θερμοχημικών κύκλων σε καινοτομικό ηλιακό αντιδραστήρα με βάση κεραμικά υλικά κυψελοειδούς μορφής (μονολίθους). Η παραγωγή υδρογόνου από την διάσπαση υδρατμών με χρήση ηλιακής ενέργειας μέσω θερμοχημικών κύκλων δύο σταδίων επιτυγχάνεται με τη χρήση μικτών οξειδίων του σιδήρου που λειτουργούν ως οξειδοαναγωγικά υλικά τα οποία εναποτίθενται στα τοιχώματα των καναλιών των μονολιθικών υποστρωμάτων. Στο πρώτο στάδιο η διάσπαση των υδρατμών και η παραγωγή υδρογόνου γίνεται με απομάκρυνση του οξυγόνου του νερού μέσω ενός «ανηγμένου» οξειδίου μετάλλου, το οποίο κατά συνέπεια οξειδώνεται. Στο δεύτερο στάδιο το δεσμευμένο στο οξείδιο οξυγόνο απελευθερώνεται προκαλώντας την αναγωγή του οξειδίου (αναγέννηση) το οποίο μπορεί κατόπιν να επαναχρησιμοποιηθεί. Η σύνθεση τέτοιων οξειδοαναγωγικών υλικών (μικτών οξειδίων του σιδήρου με Zn, Ni, Mn) πραγματοποιήθηκε με δύο μεθόδους, την πυρόλυση νέφους αερολυμάτων και την αυτο-προωθούμενη σύνθεση υψηλών θερμοκρασιών. Τα οξειδοαναγωγικά υλικά που συντέθηκαν με τις παραπάνω μεθόδους αξιολογήθηκαν σε εργαστηριακή διάταξη ως προς την ικανότητα διάσπασης του νερού σαν συνάρτηση της σύστασής τους και της θερμοκρασίας της αντίδρασης διάσπασης. Και οι δύο οικογένειες υλικών επέδειξαν ικανότητα διάσπασης του νερού και παραγωγής υδρογόνου, με την δραστηριότητά τους να εξαρτάται από το είδος και τη στοιχειομετρία των μεταλλικών προσθέτων αλλά και από τη μέθοδο σύνθεσης. Αύξηση του ποσοστού Zn βελτίωσε την απόδοση σε υδρογόνο ενώ υλικά συντεθειμένα με την πυρόλυση νέφους αερολυμάτων εμφάνισαν υψηλότερη δραστηριότητα από υλικά της ίδιας σύστασης συντεθειμένα με άλλες μεθόδους. Τα πιο ενεργά οξειδοαναγωγικά υλικά που παρασκευάστηκαν, χρησιμοποιήθηκαν για την επικάλυψη κεραμικών πορωδών μονολίθων, οι οποίοι κατόπιν αξιολογήθηκαν σε ηλιακό αντιδραστήρα, όπου και επέδειξαν όχι μόνο ικανότητα συνεχούς κυκλικής λειτουργίας στη θερμοκρασιακή περιοχή 800-1200°C αλλά και σημαντική παραγωγή υδρογόνου ανά μονάδα μάζας οξειδοαναγωγικού υλικού.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα της προσφοράς επαρκούς ενέργειας απαλλαγμένης από τον άνθρακα στον όλο και αυξανόμενο πληθυσμό του πλανήτη περιγράφηκε από το Νομπελίστα Χημικό R. Smalley, με τον όρο ‘Terawatt Challenge’ [1]. Ενώ ανανεώσιμη ενέργεια θα μπορούσε να προσφερθεί από πηγές όπως η βιομάζα, η αιολική, η υδροηλεκτρική και η ηλιακή ενέργεια, μόνο η τελευταία έχει το δυναμικό για να καλύψει επαρκώς τις απαιτήσεις του σύγχρονου κόσμου. Ένας αποτελεσματικός τρόπος εκμετάλλευσης του τεράστιου δυναμικού του Ήλιου

είναι μέσω της δημιουργίας ‘ενεργειακών φορέων’ που επιτρέπουν την αποθήκευση και διανομή της ηλιακής ενέργειας. Τέτοιος ‘ενεργειακός φορέας’ είναι το H_2 .

‘Ηλιακό’ H_2 μπορεί να παραχθεί από την απευθείας θερμική διάσπαση του νερού (θερμόλυση) με χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία όμως απαιτεί πολύ υψηλές θερμοκρασίες ($>2000^\circ C$) δημιουργώντας προβλήματα στα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν. Η παραγωγή H_2 σε χαμηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση θερμοχημικών κύκλων. Οι Carty et al. και McQuillan et al. [2,3] μελέτησαν πάνω από 200 πιθανούς τέτοιους κύκλους. Ίσως ο πιο ελκυστικός είναι αυτός της ηλιακής διάσπασης των υδρατμών με τη χρήση οξειδίων μετάλλων [4, 5]. Κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου το ανηγμένο υλικό οξειδώνεται στο οξείδιο του μετάλλου με το υψηλότερο σθένος απομακρύνοντας το O_2 από το νερό και παράγοντας H_2 . Στο επόμενο στάδιο το οξειδωμένο υλικό ανάγεται απελευθερώνοντας το προσροφημένο O_2 . Τέτοια οξειδο-αναγωγικά ζεύγη είναι τα μικτά οξείδια Fe_3O_4/FeO , Mn_3O_4/MnO , ZnO/Zn και συνδυασμοί τους, όπως οι φερρίτες (AFe_2O_4 με $A=Mn, Ni, Zn, Co$, κλπ). Η διάσπαση των υδρατμών (εξώθερμη) μπορεί να πραγματοποιηθεί σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των $700^\circ C$ ενώ η αναγέννηση του υλικού (ενδόθερμη), πραγματοποιείται σε αρκετά υψηλότερες θερμοκρασίες.

Στο ερευνητικό έργο HYDROSOL εισήχθη για πρώτη φορά η ιδέα της παραγωγής H_2 από υδρατμούς για την πραγματοποίηση των οξειδο-αναγωγικών κύκλων με τη χρήση μονολιθικού κυψελοειδούς ηλιακού αντιδραστήρα [6]. Ο αντιδραστήρας βασίζεται στην εκμετάλλευση της επιφάνειας των μονολιθικών κυψελοειδών δομών, που έχουν πολλά παράλληλα κανάλια, και αποτελούνται από υλικό το οποίο έχει την ικανότητα να απορροφά την συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία αναπτύσσοντας υψηλές θερμοκρασίες [7]. Ο μονόλιθος είναι επικαλυμμένος με το οξειδοαναγωγικό υλικό το οποίο στο πρώτο στάδιο διασπά τους υδρατμούς που διέρχονται από τα κανάλια του μονόλιθου δεσμεύοντας το O_2 και απελευθερώνοντας το H_2 . Στο επόμενο στάδιο ο αντιδραστήρας θερμαίνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες με αποτέλεσμα το οξειδο-αναγωγικό υλικό να αναγεννάται. Έτσι ο αντιδραστήρας λειτουργεί σε μια κυκλική διεργασία (θερμοκρασιακή περιοχή π.χ. $800-1200^\circ C$ /θερμοκρασίες διάσπασης υδρατμών-‘αναγέννησης’) [8-10]. Άλλοι τύποι αντιδραστήρων που προτάθηκαν από ερευνητές στην Ιαπωνία [11, 12] και στην Αμερική [13] για να λειτουργήσουν σε θερμο-χημικούς κύκλους δύο σταδίων απαιτούν είτε τη χρήση δύο διαφορετικών αντιδραστήρων –έναν για ‘ηλιακή’ αναγέννηση και έναν για μη-ηλιακή διάσπαση υδρατμών- είτε εμπεριέχουν κινητά μέρη που περιστρέφονται μεταξύ μιας υψηλότερης και μιας χαμηλότερης θερμοκρασιακής περιοχής κάτι που προκαλεί μηχανολογικά προβλήματα και δυσκολία στην επίτευξη στεγανότητας των περιστρεφόμενων κομματιών στις υψηλές θερμοκρασίες. Στην περίπτωση του αντιδραστήρα HYDROSOL η συνεχής ηλιακή παραγωγή H_2 επιτυγχάνεται με έναν ‘αρθρωτό’ (modular) αντιδραστήρα διπλού θαλάμου με ενσωματωμένα τα μονολιθικά συστήματα χωρίς κινούμενα μέρη [14]. Όταν στον ένα θάλαμο γίνεται η διάσπαση των υδρατμών στον άλλο μπορεί να πραγματοποιείται η αναγέννηση. Τα χαρακτηριστικά αυτά επιτρέπουν μεγαλύτερη ευελιξία ως προς την κλιμάκωση μεγέθους της διεργασίας και την εύκολη ενσωμάτωση της τεχνολογίας αυτής σε μεγάλες εγκαταστάσεις συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας (ηλιακές πλατφόρμες).

Στην παρούσα εργασία μελετώνται η σύνθεση και ο χαρακτηρισμός οξειδοαναγωγικών υλικών ως προς τη διάσπαση υδρατμών και η αξιολόγησή τους σε επικαλυμμένες μονολιθικές δομές εργαστηριακού και πιλοτικού μεγέθους σε πραγματικές συνθήκες στον ηλιακό αντιδραστήρα HYDROSOL.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Οξειδοαναγωγικά υλικά με βάση οξείδια του σιδήρου συντέθηκαν με δύο μεθόδους: την Πυρόλυση Νέφους Αερολύματος (Aerosol Spray Pyrolysis, ASP) και την

Αυτοπροωθούμενη Σύνθεση Υψηλών Θερμοκρασιών (Self-Propagating High-Temperature Synthesis, SHS). Και οι δύο τεχνικές χαρακτηρίζονται από μικρούς χρόνους σύνθεσης, ικανότητα για σύνθεση νανο-δομημένων υλικών, ευελιξία στον έλεγχο των κενών πλεγματικών θέσεων οξυγόνου στα προϊόντα και δυνατότητα για κλιμάκωση μεγέθους. Η περιγραφή των διεργασιών αυτών έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενες εργασίες [15,16] όπου και μελετήθηκαν η επίδραση των παραμέτρων σύνθεσης στα χαρακτηριστικά των οξειδοαναγωγικών υλικών και στην δραστηκότητά τους ως προς τη διάσπαση υδρατμών. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά πρόσθετα μέταλλα (Mn, Ni and Zn) για τη σύνθεση μικτών οξειδίων σιδήρου με αναλογίες κατιόντων μετάλλων (Fe:Mn:Zn - 2:0.5:0.5, Fe:Ni:Zn - 2:0.2:0.8 και Fe:Zn - 2:1). Η παρατήρηση της μορφολογίας και του μεγέθους των σωματιδίων των προϊόντων έγινε με Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM, JEOL-6400) και με Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Διέλευσης Υψηλής Ανάλυσης (TEM, JEOL- JEM 2010). Χαρακτηρισμός της κρυσταλλικής δομής και της σύστασης των κόνεων και ο υπολογισμός του μεγέθους των κρυσταλλιτών τους έγινε με περιθλασιμετρία ακτίνων X (Siemens D-500 Kristalloflex diffractometer, CuK α radiation). Η ειδική επιφάνεια των κόνεων μετρήθηκε με ποροσιμετρία αζώτου, με τη μέθοδο BET (Micromeritics ASAP 2000).

Η αξιολόγηση των παραγόμενων κόνεων ως προς την ικανότητα διάσπασης υδρατμών πραγματοποιήθηκε σε εργαστηριακή μονάδα αποτελούμενη από έναν κυλινδρικό αντιδραστήρα από χαλαζιακή ύαλο τοποθετημένο σε θερμο-προγραμματιζόμενο κλίβανο. Συνεχής εισαγωγή δισ-απεσταγμένου νερού στον αντιδραστήρα γίνεται σε επιλεγμένες θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 700 έως 1000°C με τη χρήση εμβολοφόρου αντλίας νερού. Οι υδρατμοί μεταφέρονται διαμέσου της κλίνης της κόνεως με τη βοήθεια φέροντος αερίου N $_2$, μέχρι πλήρους απενεργοποίησης του υλικού. Το παραγόμενο H $_2$ (που εξέρχεται από τον αντιδραστήρα) καταγράφεται από φασματομέτρο μάζας (Pfeiffer Omnistar). Τα υλικά που συντετέθησαν με την SHS και την ASP συγκρίθηκαν με ανάλογα υλικά τα οποία συντετέθησαν με συμβατική μέθοδο στη στερεά κατάσταση (Solid-State Synthesis, SSS), δηλαδή από αντιδράσεις μεταξύ των αντίστοιχων οξειδίων στους 1200°C για 8 h.

Οι συστάσεις που επέδειξαν την καλύτερη απόδοση εναποτέθηκαν σε ‘εργαστηριακής’ κλίμακας πορώδεις μονολιθικές δομές από ανακρυσταλλωμένο καρβίδιο του πυριτίου (ReSiC) (Ø25x50mm) με δύο μεθόδους: (α) εμβάπτιση του μονόλιθου σε αιώρημα της κόνεως και (β) σύγχρονη σύνθεση και εναπόθεση του οξειδοαναγωγικού υλικού πάνω στο πορώδες υπόστρωμα με την πυρόλυση νέφους αερολύματος [17]. Μονόλιθοι πιλοτικού μεγέθους (Ø144x200mm) επικαλύφθηκαν με οξειδοαναγωγικό υλικό με εμβάπτιση σε αιώρημα. Η αξιολόγηση των επικαλυμμένων μονολίθων πραγματοποιήθηκε υπό πραγματικές συνθήκες στον ηλιακό αντιδραστήρα διπλού θαλάμου HYDROSOL (Conti reactor) στις ηλιακές εγκαταστάσεις της DLR, στην Κολωνία της Γερμανίας.

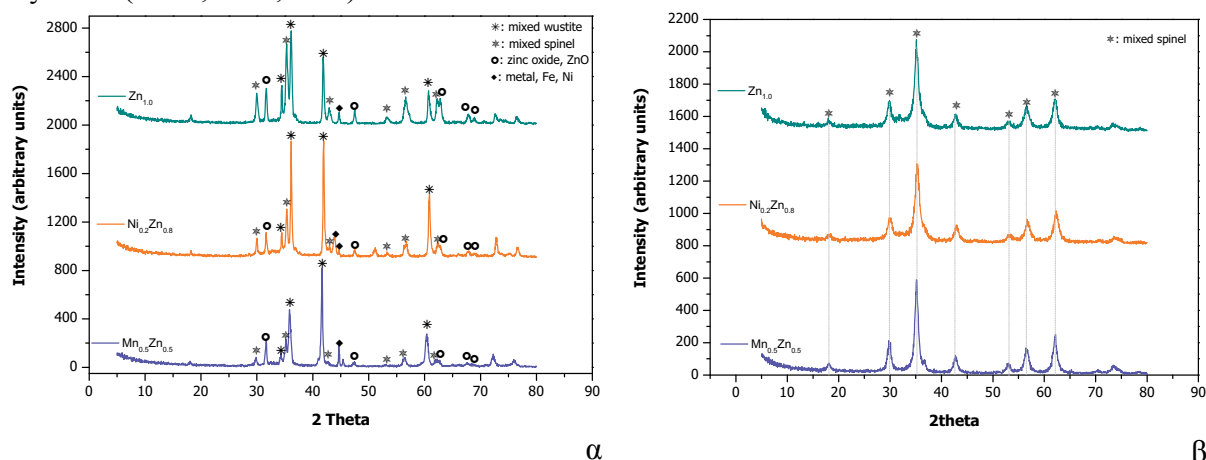
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Κρυσταλλική φάση και μορφολογία

Όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη εργασία [6], στην περίπτωση της SHS παρατηρήθηκε ότι η ‘πτωχότερη’ σε οξυγόνο φάση του βουστίτη (M,Fe)O παρουσιάζει αυξημένη δραστηκότητα ως προς τη διάσπαση των υδρατμών συγκριτικά με την ‘πλουσιότερη’ σε οξυγόνο φάση των σπινελίων (MFe $_2$ O $_4$). Με βάση τα παραπάνω, η σύνθεση των μικτών οξειδίων Fe με Mn, Ni and Zn με SHS πραγματοποιήθηκε σε συγκεκριμένες συνθήκες που ευνοούν το σχηματισμό των ‘πτωχότερων’ σε οξυγόνο φάσεων. Στην Εικόνα 1α απεικονίζονται τα φάσματα XRD των συντεθειμένων υλικών με κύρια φάση εκείνη του βουστίτη και παρουσία δευτερευουσών φάσεων σπινελίου και οξειδίου του ψευδαργύρου.

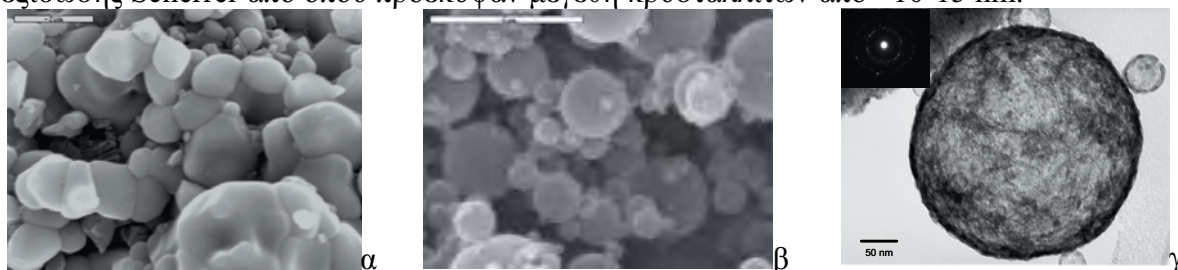
Στην περίπτωση της ASP (Εικόνα 1β) όλες οι κόνεις είναι αποκλειστικά φερρίτες κρυσταλλωμένοι στη φάση του σπινελίου ανεξάρτητα από τα μέταλλα που προστέθηκαν.

Από τα φάσματα XRD διακρίνεται η επιτυχής εισαγωγή των υπολοίπων μετάλλων στο πλέγμα του σπινελίου του σιδήρου καθώς δε σχηματίζεται καμία επιμέρους φάση ‘απλού’ οξειδίου (MnO, ZnO, NiO).



Εικόνα 1: Φάσματα XRD οξειδο-αναγωγικών υλικών συντεθειμένων με α) SHS και β) ASP

Ανάλυση SEM των υλικών από SHS και ASP έδειξε ότι τα υλικά από SHS αποτελούνται από συμπαγείς, πυροσυσσωματωμένους κόκκους (Εικόνα 2α), ενώ οι κόνεις από ASP αποτελούνται από σφαιρικά σωματίδια μεγέθους μερικών εκατοντάδων νανομέτρων (Εικόνα 2β). Ο νανοδομημένος χαρακτήρας των υλικών από την ASP προκύπτει τόσο από την ανάλυση TEM, όπου φαίνονται κρύσταλλοι μικρότεροι από 10 nm (Εικόνα 2γ), όσο και από εκτίμηση του μεγέθους των κρυσταλλιτών από τα φάσματα XRD με εφαρμογή της εξίσωσης Scherrer από όπου προέκυψαν μεγέθη κρυσταλλιτών από ~10-15 nm.



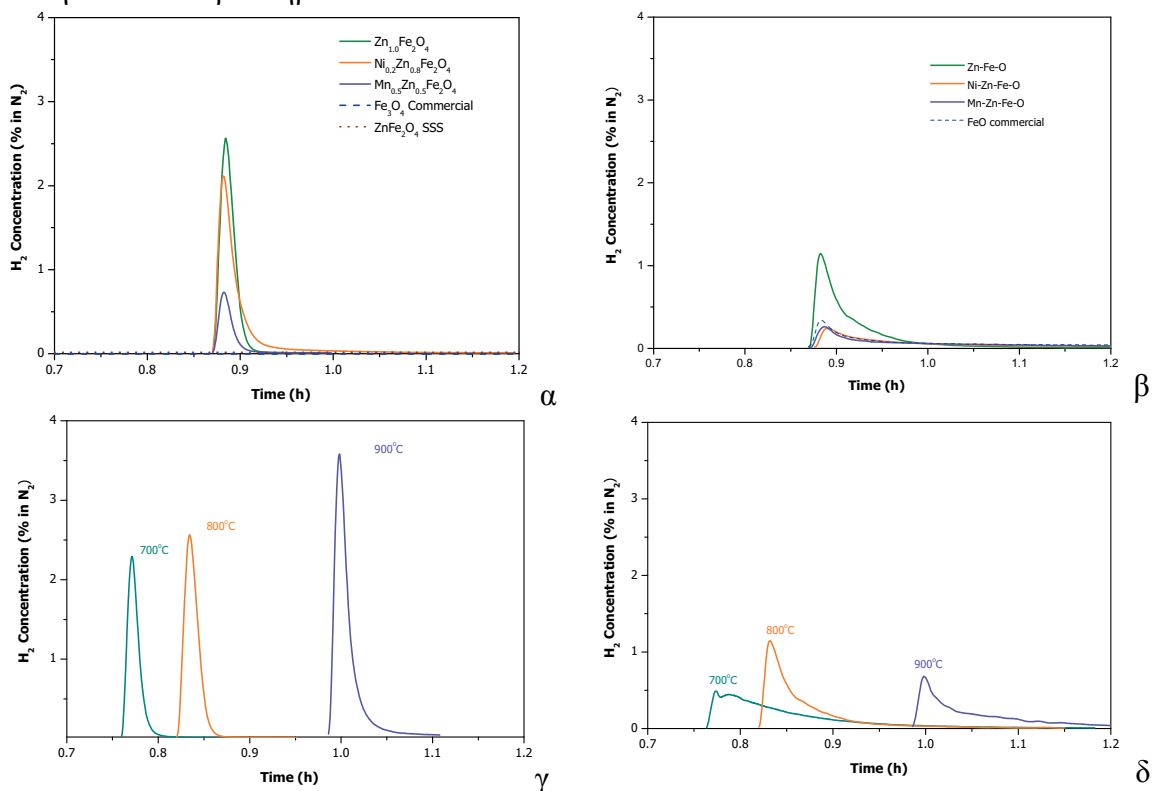
Εικόνα 2: Μορφολογική παρατήρηση με SEM υλικών από (α) SHS, (β) ASP και (γ) εικόνα TEM από ASP υλικό.

Η ειδική επιφάνεια των οξειδοαναγωγικών υλικών από τις δύο μεθόδους εξαρτάται από το είδος και τη στοιχειομετρία των προστιθέμενων μετάλλων και από τη μέθοδο σύνθεσης. Προϊόντα από την SHS έχουν μικρότερη επιφάνεια (~4.5-6 m²/g) συγκριτικά με τα υλικά από την ASP με επιφάνειες που κυμαίνονται από 70-120 m²/g.

3.2 Διάσπαση υδρατμών- Επίπεδο κόνεων

Στις Εικόνα 3α,β απεικονίζονται τυπικά προφίλ διάσπασης υδρατμών στους 800°C των υλικών που συντέθηκαν από την ASP και την SHS, όπου η συγκέντρωση του H₂ παρουσιάζεται ως συνάρτηση του χρόνου για την περίπτωση των διαφορετικών στοιχειομετριών. Φαίνεται ότι αυτές οι ομάδες υλικών διασπούν το νερό σε αντίθεση με ανάλογα (εμπορικά ή συντεθειμένα με συμβατική μέθοδο SSS) υλικά. Η παραγωγή του H₂ εξαρτάται από τη στοιχειομετρία του οξειδοαναγωγικού υλικού και τη μέθοδο σύνθεσης. Προσθήκη Zn, στην περίπτωση και των δύο μεθόδων, οδηγεί σε υλικά με βελτιωμένη δραστηριότητα ως προς τη διάσπαση των υδρατμών (Zn_{1.0}FeO, Zn_{1.0}Fe₂O₄) συγκριτικά με εκείνα τα υλικά στα οποία προστέθηκαν Mn ή Ni. Η διαφορά στο βαθμό κρυσταλλικότητας και στη σύσταση των υλικών από SHS και ASP αντανakλάται και στο προφίλ της καμπύλης παραγωγής H₂. Στην περίπτωση των υλικών από την ASP οι καμπύλες H₂ είναι πιο στενές και

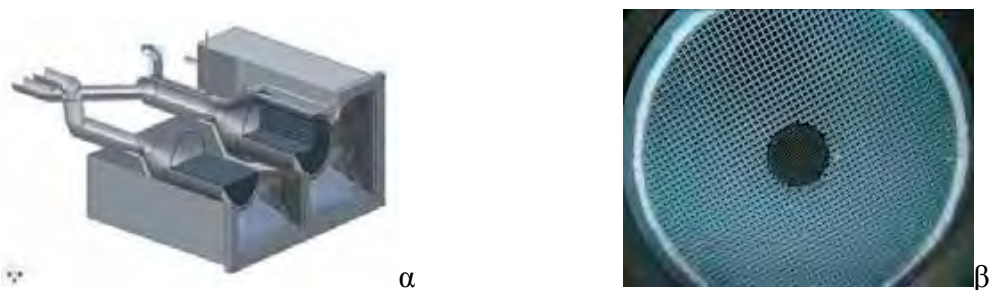
ψηλές με μικρότερη διάρκεια αντίδρασης αλλά υψηλότερη συγκέντρωση παραγόμενου H_2 από εκείνες των υλικών SHS. Αυτά τα προφίλ παραγωγής H_2 είναι χαρακτηριστικά των μεθόδων σύνθεσης και διατηρούν παρόμοια συμπεριφορά ακόμα και με αλλαγή της στοιχειομετρίας των οξειδοαναγωγικών υλικών και της θερμοκρασίας της αντίδρασης (Εικόνα 3γ,δ). Τα υλικά από τις δύο μεθόδους που παρουσίασαν την καλύτερη συμπεριφορά ($Zn_{1.0}FeO$, $Zn_{1.0}Fe_2O_4$) εναποτέθηκαν σε πορώδεις κυψελοειδείς δομές για να αξιολογηθούν στον ηλιακό αντιδραστήρα HYDROSOL.



Εικόνα 3: Προφίλ παραγωγής H_2 σε σχέση με διαφορετικές στοιχειομετρίες οξειδοαναγωγικών υλικών ((α) ASP, (β) SHS) και διαφορετικές θερμοκρασίες διάσπασης υδρατμών ((γ) ASP- $Zn_{1.0}Fe_2O_4$ και (δ) SHS- $ZnFeO$)

3.3 Διάσπαση υδρατμών-Επίπεδο μονολίθων

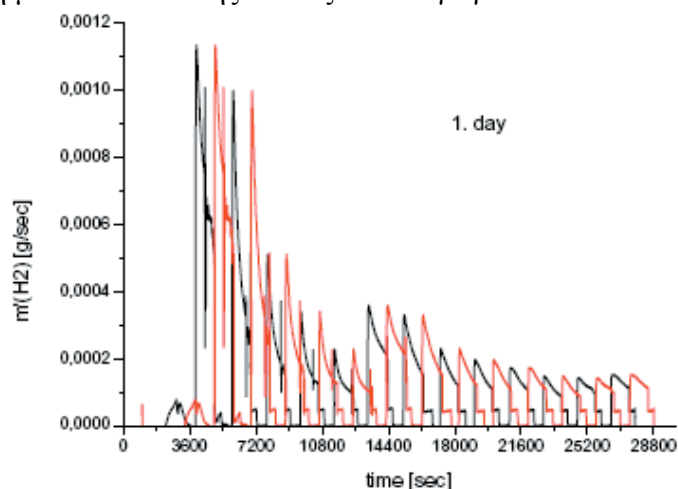
Οι επικαλυμμένοι μονόλιθοι τοποθετήθηκαν στον ηλιακό αντιδραστήρα HYDROSOL διπλού θαλάμου (Εικόνα 4) και αξιολογήθηκαν σχετικά με την ικανότητά τους για διάσπαση των υδρατμών και συνεχή παραγωγή H_2 .



Εικόνα 4: α) Ο αντιδραστήρας διπλού θαλάμου και β) επικαλυμμένος μονόλιθος τοποθετημένος σε ειδική υποδοχή στον αντιδραστήρα [18].

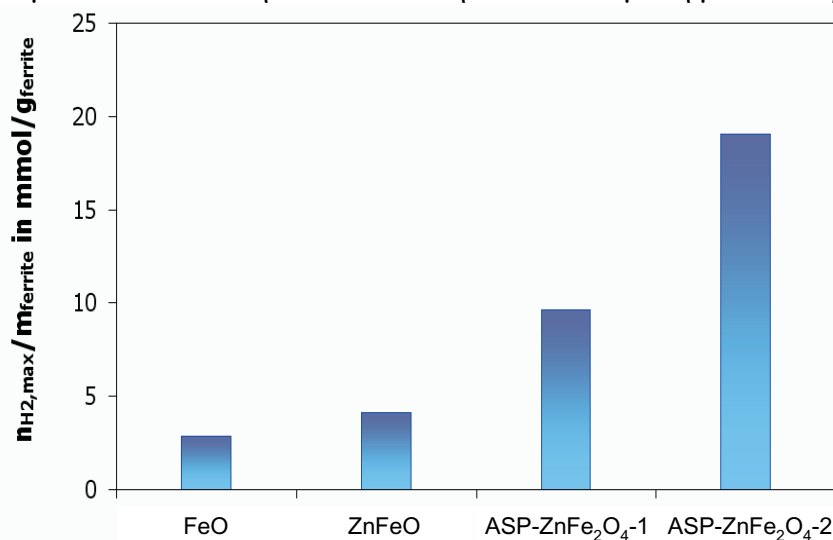
Στην Εικόνα 5 απεικονίζεται το προφίλ παραγωγής H_2 από επικαλυμμένους με SHS- $Zn_{1.0}FeO$ μονόλιθους κατά την παράλληλη λειτουργία των δύο θαλάμων του αντιδραστήρα, όπου όταν ο μονόλιθος στον ένα θάλαμο αναγεννάται ο άλλος διασπά το νερό για την

παραγωγή H_2 . Στους πρώτους κύκλους παρατηρείται αυξημένη παραγωγή H_2 η οποία στη συνέχεια μειώνεται, για να φτάσει μετά από κάποιους κύκλους σε μια σταθερή τιμή. Η συμπεριφορά αυτή είναι τυπική για τις περισσότερες περιπτώσεις των δειγμάτων ανεξάρτητα από τη σύσταση ή τη μέθοδο σύνθεσης των οξειδοαναγωγικών υλικών.



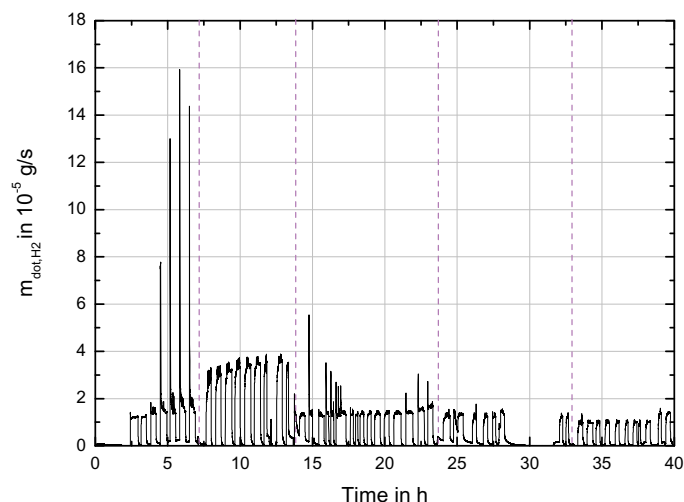
Εικόνα 5: Συνεχής παραγωγή H_2 στον αντιδραστήρα διπλού θαλάμου με μονόλιθους ($\varnothing 25 \times 50 \text{ mm}$), [18].

Τυπική επίδοση μονόλιθων μικρού μεγέθους που επικαλύφθηκαν με διάφορα υλικά φαίνεται στην Εικόνα 6. Η παραγωγή του H_2 υπολογίστηκε ανά μάζα (g) οξειδοαναγωγικού υλικού πάνω στο μονόλιθο ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ μονόλιθων με διαφορετικά φορτία υλικού. Το δείγμα SHS- $Zn_{1.0}FeO$, SHS- FeO και ASP- $Zn_{1.0}Fe_2O_4-2$ ήταν επικαλυμμένο με τη μέθοδο εμβάπτισης σε αιώρημα ενώ το δείγμα ASP- $Zn_{1.0}Fe_2O_4-1$ ήταν επικαλυμμένο με in-situ σύνθεση και εναπόθεση του υλικού με τη μέθοδο αερολύματος.



Εικόνα 6: Μέγιστη ποσότητα H_2 / g οξειδοαναγωγικού υλικού σε έναν κύκλο.

Τέλος, δύο μονόλιθοι πιλοτικού μεγέθους επικαλυμμένοι με SHS- $Zn_{1.0}FeO$ πραγματοποίησαν πενήντα-τέσσερις διαδοχικούς κύκλους μέσα σε πέντε μέρες. Η Εικόνα 7 απεικονίζει την παραγωγή H_2 που μετρήθηκε από τον ένα επικαλυμμένο μονόλιθο κατά τη διάρκεια των πέντε ημερών. Η τάση είναι παρόμοια εκείνης που παρατηρήθηκε στα μικρότερης κλίμακας δείγματα. Το οξειδοαναγωγικό υλικό εξακολουθεί να είναι ενεργό και μετά τον 54^ο κύκλο έχοντας τη δυνατότητα να συνεχίσει να λειτουργεί για περισσότερους κύκλους. Τα πειράματα χρειάστηκε να διακοπούν λόγω περιορισμένης διαθεσιμότητας της ηλιακής εγκατάστασης.



Εικόνα 7: ‘Συνεχής’ ηλιακή παραγωγή H_2 για 54 κύκλους σε επικαλυμμένο μονόλιθο ($\varnothing 144 \times 200 \text{ mm}$) [19].

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια του έργου HYDROSOL πραγματοποιήθηκε η σύνθεση οξειδοαναγωγικών υλικών με δύο εναλλακτικές μεθόδους, την SHS και την ASP. Διαπιστώθηκε ότι η διαφορά στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά (κρυσταλλικότητα, σύσταση φάσεων κτλ.) των κόνεων που συντέθηκαν από τις δύο μεθόδους αντανακλάται και στα χαρακτηριστικά της αντίδρασης διάσπασης υδρατμών και παραγωγής H_2 . Στα ηλιακά πειράματα με μονόλιθους μικρής κλίμακας επικαλυμμένους με διάφορα οξειδοαναγωγικά υλικά παρατηρήθηκε ότι η παραγωγή του H_2 έχει τη μεγαλύτερη τιμή της κατά τους πρώτους κύκλους ενώ μειώνεται στους επόμενους καταλήγοντας σε ένα σταθερό επίπεδο. Τα δείγματα που επικαλύφθηκαν με SHS- $Zn_{1.0}FeO$ και ASP- $Zn_{1.0}Fe_2O_4$ είχαν αρκετά υψηλή παραγωγή H_2 ανά g οξειδοαναγωγικού υλικού. Η αξιολόγηση επικαλυμμένων μονολίθων μεγάλης κλίμακας έδωσε παρόμοια αποτελέσματα με τους μονόλιθους μικρού μεγέθους. Επιτεύχθηκε η παραγωγή H_2 αποκλειστικά από ηλιοθερμοχημική διάσπαση του νερού για πέντε συνεχείς μέρες, καταδεικνύοντας τη δυνατότητα κλιμάκωσης μεγέθους της κυκλικής διεργασίας HYDROSOL. Η τεχνολογία HYDROSOL αναπτύχθηκε σε πιλοτική/επιδεικτική κλίμακα με επίπεδο ισχύος 100 kW/αντιδραστήρα και πρόσφατα τοποθετήθηκε στις ηλιακές εγκαταστάσεις στην Αλμερία της Ισπανίας επιτυγχάνοντας το συνδυασμό εγκαταστάσεων συγκέντρωσης Ηλιακής Ενέργειας και διεργασιών υψηλής θερμοκρασίας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς εκφράζουν τις ευχαριστίες τους προς την Ευρωπαϊκή Ένωση για τη μερική χρηματοδότηση της εργασίας στα πλαίσια των Προγραμμάτων ENERGY ENK6-CT-2002-00629: “Catalytic Monolith Reactor for Hydrogen Generation from Solar Water Splitting (HYDROSOL)” και FP6-2004-Energy-3, 020030 “Solar Hydrogen via Water Splitting in Advanced Monolithic Reactors for Future Solar Power Plants (HYDROSOL-II)” και τους εταίρους τους στα έργα αυτά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Smalley, R.E., ‘Future Global Energy Prosperity: The Terawatt Challenge’, Material Matters Bulletin, 30, p.412-417, 2005.
2. Carty, R. H., Mazumder, M. M., Schreider, J. D., Panborn, J. B., ‘Thermochemical Hydrogen Production’, GRI-80/0023, Gas Research Institute for the Institute of Gas Technology: Chicago, IL, Vol. 1-4, 1981.

3. McQuillan, B.W., Brown, L.C., Besenbruch, G.E., Tolman, R., Cramer, T., Russ, B.E., 'High efficiency generation of hydrogen fuels using solar thermochemical splitting of water', Report GA-A24972, General Atomics, San Diego, CA, 2002.
4. Nakamura, T., 'Hydrogen production from water utilizing solar heat at high temperatures', *Solar Energy*, 19, 467–475, 1977.
5. Kodama, K., Gokon, N., 'Thermochemical cycles for high-temperature solar hydrogen production', *Chemical Reviews*, 107, 4048-4077, 2007.
6. Agrafiotis, C., et al., 'Solar Water Splitting for Hydrogen Production with Monolithic Reactors', *Solar Energy*, 79(4), 409-421, 2005.
7. Agrafiotis, C., et al., 'Evaluation of porous silicon carbide monolithic honeycombs as volumetric receivers/collectors of concentrated solar radiation', *Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91, 474-488, 2007.
8. Roeb, M., et al., 'Solar hydrogen production by a two-step cycle based on mixed iron oxides', *Journal of Solar Energy Engineering - Transactions of the ASME*, 128, 125-133, 2006.
9. Agrafiotis, C., Lorentzou, S., Pagkoura, C., Kostoglou, M., Konstandopoulos, A.G., 'Advanced monolithic reactors for hydrogen generation from solar water splitting', *Proceedings of SolarPACES 13th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies*, Seville, Spain, June 20-23 2006.
10. Agrafiotis, C.C., Pagkoura, C., Lorentzou, S., Kostoglou, M., Konstandopoulos, A.G., 'Hydrogen production in solar reactors', *Catalysis Today*, 127, 265–277, 2007.
11. Kaneko, H., Fuse, A., Miura, T., Ishihara, H., Tamaura, Y., 'Two-step water splitting with concentrated solar heat using rotary-type solar furnace', *Proceedings of SolarPACES 13th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies*, Seville, Spain, June 20-23 2006.
12. Gokon, N., Takahashi, S., Yamamoto, H., Kodama, T., 'Thermochemical two-step water-splitting reactor with internally circulating fluidized bed for thermal reduction of ferrite particles', *International Journal of Hydrogen Energy*, In Press, 2008.
13. Diver, R.B., Miller, J.E., Allendorf, M.D., Siegel, N.P., Hogan, R.E., 'Solar thermochemical water-splitting ferrite-cycle heat engines', *Proceedings of ISEC2006, ASME International Solar Energy Conference*, Denver, U.S.A., Paper No ISEC2006-99147, July 8-13, 2006.
14. Roeb, M., et al., 'Gas-solid phase reaction', World Patent WO 2006/108769 October 19 2006.
15. Lorentzou, S., Karadimitra, K., Agrafiotis, C., Konstandopoulos, A. G., 'New Routes for Ferrite Powders Synthesis', *Proceedings of PARTEC 2004, International Conference for Particle Technology*, Nuremberg, Germany March 16-18, 2004.
16. Lorentzou, S., Agrafiotis, C.C, Konstandopoulos, A.G., 'Aerosol spray pyrolysis synthesis of water-splitting ferrites for solar hydrogen production', *Granular Matter*, 10(2), 113-122, 2008.
17. Karadimitra, K., Lorentzou, S., Agrafiotis, C., Konstandopoulos, A. G., 'Catalytic Particle Synthesis via Spray Pyrolysis & In-Situ Deposition on Porous Materials', *Proceedings of PARTEC 2004, International Conference for Particle Technology*, Nuremberg, Germany, March 16 -18, 2004.
18. Roeb, M., et al., 'Thermo-chemical production of hydrogen from water by metal oxides fixed on ceramic substrates', *Proceedings of the 16th World Hydrogen Energy Conference*, Lyon, France, 13-16 June, 2006.
19. Roeb, M., et al., 'Operational strategy of a two-step thermochemical process for solar hydrogen production', *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΣΤΗΛΗΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΥΠΟΥ PEM 100 W

Γ. Παναγιώτου και Π. Αξαόπουλος

Τμήμα Ενεργειακής Τεχνολογίας ΤΕΙ Αθηνών e-mail:
grepana@yahoo.gr, pax@teiath.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αφορά την πειραματική και θεωρητική μελέτη μίας στήλης κυψελών καυσίμου τύπου PEM (Μεμβράνη Ανταλλαγής Πρωτονίων) ισχύος 100 W εφοδιασμένης με ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου της λειτουργίας της. Τα πειράματα διεξήχθησαν στο εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Τμήματος Ενεργειακής Τεχνολογίας του ΤΕΙ Αθηνών. Για την τροφοδοσία της στήλης κυψελών καυσίμου με Υδρογόνο χρησιμοποιήθηκε μια φιάλη πίεσεως 200 l ενώ ένας μικρός ανεμιστήρας ψύχει την κυψέλη κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της. Η στήλη κυψελών καυσίμου αποτελείται από 21 επιμέρους κεραμικές κυψέλες και η τροφοδοσία της ελέγχεται από την κεντρική μονάδα ελέγχου με δύο ηλεκτροβάνες.

Κατά την πειραματική διαδικασία με τη χρήση κατάλληλων μεταβλητών αντιστάσεων και οργάνων μέτρησης προσδιορίζεται το ρεύμα και η τάση της στήλης κυψελών καυσίμου ενώ παράλληλα καταγράφεται και η θερμοκρασία σε διάφορα σημεία της συσκευής. Μια σειρά από πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για την χάραξη της χαρακτηριστικής καμπύλης της στήλης κυψελών καυσίμου καθώς και για την καμπύλη της ηλεκτρικής της ισχύος έναντι του ρεύματος. Επίσης έχει προσδιορισθεί η συσχέτιση μεταξύ της ενεργού τάσης και του ρεύματος στην στήλη κυψελών καυσίμου.

Με τη βοήθεια της προσομοίωσης υπολογίστηκαν ορισμένα μεγέθη όπως απόδοση, ηλεκτρικό ρεύμα και τάση. Επίσης με τη χρήση της προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε και μία παραμετρική μελέτη της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων στην συνολική απόδοση της κυψέλης καυσίμου. Μια σειρά από διαγράμματα παρουσιάζουν τις μεταβολές αυτές καθώς και την συμπεριφορά των παραπάνω μεγεθών. Η προσομοίωση βασίζεται στην ηλεκτροχημική λειτουργία της συσκευής.

Τα αποτελέσματα από την εργασία αυτή θα βοηθήσουν στην βελτίωση της σχεδίασης και κατασκευής παρόμοιων συσκευών, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε αρκετές εφαρμογές παρέχοντας ηλεκτρικό ρεύμα ημέρα και νύκτα χωρίς κινητά μέρη και περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε απομακρυσμένες από το δίκτυο περιοχές.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά την διάρκεια των τελευταίων 20 χρόνων ένα μεγάλο μέρος της παγκόσμιας ερευνητικής δραστηριότητας ασχολείται με την έρευνα στον τομέα των κυψελών καυσίμου (ΚΚ) αφού σύμφωνα με πολλούς αποτελούν την κύρια μονάδα μετατροπής ενέργειας για το εγγύς μέλλον. Επί του παρόντος η έρευνα στον τομέα των ΚΚ διεξάγεται σε παγκόσμιο επίπεδο κυρίως σε χώρες όπως Καναδάς, ΗΠΑ, Ιαπωνία και σε πολλές άλλες ακόμη.

Ο τομέας των ΚΚ ο οποίος λαμβάνει την περισσότερη προσοχή είναι αυτός των μικρής ισχύος (<1kW) ΚΚ τύπου PEM (Proton Exchange Membrane - Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων) κυρίως λόγω των πολλαπλών πλεονεκτημάτων που τις χαρακτηρίζουν και τις καθι-

στούν ως τις καταλληλότερες για παραγωγή ενέργειας σε κινητές εφαρμογές σε απομονωμένες από το δίκτυο περιοχές.

Όσον αφορά τις ΚΚ, μικρής ισχύος, του συγκεκριμένου τύπου, δεν υπάρχουν πολλά διαθέσιμα δημοσιευμένα στοιχεία ειδικά για τις εμπορικά διαθέσιμες ατμοσφαιρικές ΚΚ που είναι και ο στόχος της παρούσας μελέτης.

Η έρευνα επί του παρόντος αφορά την μελέτη της επίδρασης των επί μέρους στοιχείων της ΚΚ στην συνολική απόδοση της καθώς επίσης και στην μελέτη της επίδρασης των διαφόρων περιβαλλοντικών συνθηκών στην απόδοση της ΚΚ. Πιο συγκεκριμένα οι πιο σημαντικοί υπό μελέτη παράγοντες είναι: τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του υλικού της μεμβράνης το οποίο εξέτασαν εκτενώς οι Wakizoe et al. [2] και προσομοίωσαν οι Cheng et al. [3], οι διεργασίες, απώλειες και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του Membrane-Electrode Assembly (MEA) τα οποία εξετάστηκαν από τους Lee and Lalk [4], η θερμική ισορροπία και η διαχείριση του νερού οι οποίες περιγράφηκαν από τους Picot et al. [5] και τέλος το στρώμα του καταλύτη στην κάθοδο το οποίο αναλύθηκε από τους You and Liu [6] με την χρήση παραμετρικής ανάλυσης. Επίσης η συμπεριφορά και απόδοση μίας ΚΚ τύπου PEM υπο την επίδραση γρήγορης αλλαγής φορτίων συζητήθηκε από τους Hamelin et al. [7].

Οι Chu and Jiang [8] αξιολόγησαν την απόδοση μίας ΚΚ τύπου PEM υπό διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες όπως σχετική υγρασία και θερμοκρασία με την χρήση εμπειρικών εξισώσεων. Τα θεωρητικά αποτελέσματα τα οποία ελήφθησαν ήταν σε πολύ καλή σύμπτωση με τα πειραματικά υπό διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Οι Wang et al. [9] εξέτασαν ταυτόχρονα πειραματικά και θεωρητικά τις παραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοση μίας ΚΚ τύπου PEM και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απόδοση της επηρεάζεται σημαντικά από το γεγονός ότι είναι ατμοσφαιρική ως επίσης και από τα επίπεδα της σχετικής υγρασίας καθώς και από την διανομή του νερού και των αντιδρόντων και την θερμοκρασία.

Οι Jung et al. [11] αξιολόγησαν πειραματικά μία ατμοσφαιρική ΚΚ τύπου PEM με σκοπό την αξιολόγηση της απόδοσης της στη στάσιμη κατάσταση (steady-state) και την ανταπόκριση της σε μεταβατικές φάσεις υπό την επίδραση διαφόρων φορτίων και συνθηκών λειτουργίας όπως σχετική υγρασία υδρογόνου και αέρα.

Πρέπει να τονισθεί ότι οι προαναφερθείσες μελέτες καθώς και γενικότερα τα περισσότερα από τα δημοσιευμένα άρθρα τα οποία ασχολούνται με την πειραματική αξιολόγηση ΚΚ τύπου PEM χρησιμοποιούν ΚΚ υψηλής ισχύος. Σε αντίθεση, ο κύριος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση της απόδοσης μίας εμπορικής ατμοσφαιρικής ΚΚ τύπου PEM ισχύος 100 W, έπειτα από πειραματική αλλά και θεωρητική μελέτη προσομοίωσης, σε συνδυασμό με μια παραμετρική ανάλυση, έτσι ώστε με τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν, να μπορέσουν να προταθούν μέτρα βελτίωσης της απόδοσης των εμπορικά διαθέσιμων ατμοσφαιρικών ΚΚ τύπου PEM.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η εργασία αυτή ουσιαστικά διαιρείται σε δύο κύρια μέρη τα οποία είναι η Πειραματική διαδικασία και η Διαδικασία Προσομοίωσης τα οποία όμως ακολουθούνται βέβαια από την διαδικασία σύγκρισης και εξαγωγής συμπερασμάτων.

2.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Το πρώτο μέρος της εργασίας είναι η πειραματική διαδικασία κατά τη διάρκεια της οποίας μελετήθηκε πειραματικά η απόδοση της ΚΚ. Η ΚΚ η οποία χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα είναι ατμοσφαιρική, χρησιμοποιεί δηλαδή Υδρογόνο και αέρα ως καύσιμο μίγμα, και αποτελεί μέρος ενός εμπορικά διαθέσιμου συστήματος το οποίο ονομάζεται 'H-100FC'. Το σύστημα αυτό βρίσκεται στο Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του ΤΕΙ Αθήνας και α-

ποτελείται από μία στήλη (stack) ΚΚ, δύο ηλεκτρονικές βαλβίδες, ένα ενσωματωμένο ανεμιστήρα ψύξης και μία ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου της λειτουργίας. Η στήλη ΚΚ αποτελείται από 21 κεραμικές κυψέλες οι οποίες αποτελούνται από ένα αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο (κάθοδος), ένα θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο (άνοδος) και μία πολυμερή μεμβράνη για ηλεκτρολύτη. Για την τροφοδοσία της ΚΚ με υδρογόνο χρησιμοποιείται μια μεταλλική φιάλη αποθήκευσης υδρογόνου υπό πίεση χωρητικότητας 200 λίτρων εξοπλισμένη με κατάλληλη ρυθμιστική βαλβίδα.

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας η ΚΚ συνδέθηκε με ένα ηλεκτρικό φορτίο το οποίο ουσιαστικά αποτελούσαν δύο μεταβλητές αντιστάσεις συνδεδεμένες εν σειρά. Αλλάζοντας την τιμή του φορτίου ελήφθησαν μετρήσεις της τιμής της έντασης του ρεύματος και της τάσης για κάθε τιμή του φορτίου. Πα την λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα συνδεδεμένα όργανα μέτρησης, πω συγκεκριμένα ένα βολτόμετρο και ένα αμπερόμετρο. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων καταγράφηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την χάραξη των δύο χαρακτηριστικών καμπυλών της ΚΚ οι οποίες είναι η καμπύλη Τάσης-Έντασης και η καμπύλη Ισχύος-Έντασης.

2.2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε κατά την διάρκεια της διαδικασίας προσομοίωσης είναι το μαθηματικό μοντέλο τύπου 170 και αποτελεί μέρος των μοντέλων προσομοίωσης που εμπεριέχονται στο πρόγραμμα προσομοίωσης συστημάτων TRNSYS. Το μοντέλο αυτό είναι κατά ένα μεγάλο ποσοστό θεωρητικό με τους περισσότερους όρους να έχουν ληφθεί από την θεωρία περιλαμβάνοντας επίσης και συντελεστές με θεωρητική βάση. Ο κύριος μη-θεωρητικός όρος είναι η ωμική υπέρταση η οποία είναι κυρίως εμπειρική. Οι κύριες εξισώσεις του ηλεκτροχημικού μοντέλου περιγράφονται εκτενώς στην υπάρχουσα βιβλιογραφία [13]. Το μοντέλο περιλαμβάνει επίσης και την δυνατότητα ανάλυσης της θερμικής συμπεριφοράς της ΚΚ.

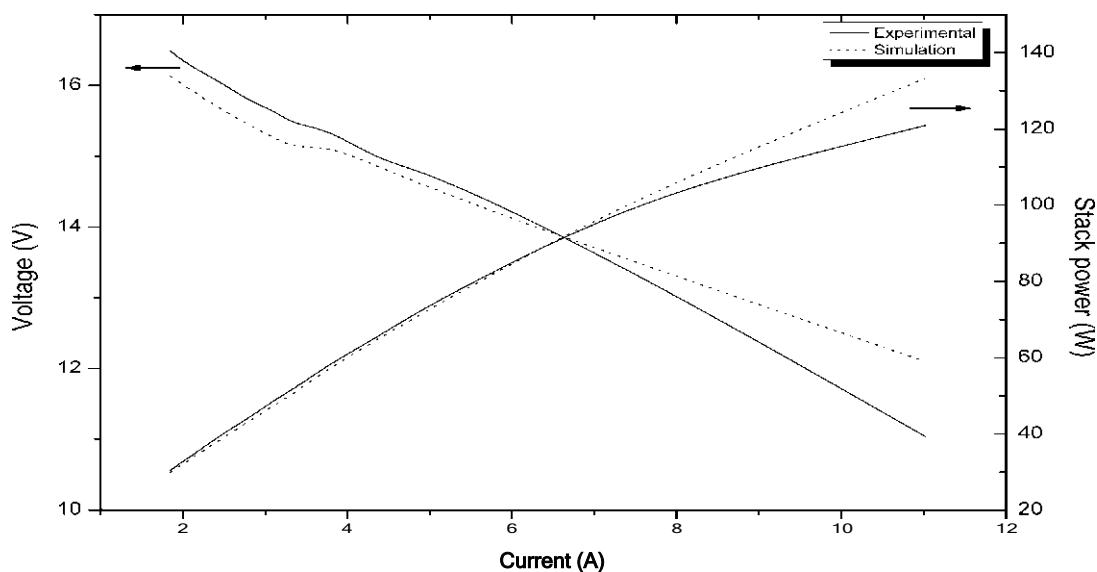
Για να μπορέσει το μοντέλο να προσομοιώσει με ακρίβεια την συγκεκριμένη ΚΚ το τροποποιούμε κατάλληλα εισάγοντας του τα συγκεκριμένα τεχνικά χαρακτηριστικά της και τις παραμέτρους που χρειάζονται. Αφού τροποποιηθεί κατάλληλα τότε εκτελούμε την διαδικασία προσομοίωσης και λαμβάνουμε και καταγράφουμε τα αποτελέσματα τα οποία στην συνέχεια παρουσιάζονται γραφικά.

Επίσης, σημαντικό μέρος της διαδικασίας προσομοίωσης αποτελεί και η παραμετρική ανάλυση ο κύριος στόχος της οποίας είναι η μελέτη της επίδρασης που έχουν ορισμένες συγκεκριμένες παράμετροι στην συνολική απόδοση της ΚΚ. Πιο συγκεκριμένα οι παράμετροι οι οποίες μελετήθηκαν είναι οι ακόλουθες: (i) η πίεση του υδρογόνου, (ii) η πίεση του οξυγόνου και (iii) η θερμοκρασία λειτουργίας της ΚΚ. Η επίδραση και των τριών παραμέτρων μελετήθηκε με την διεξαγωγή μίας σειράς τεσσάρων προσομοιώσεων για κάθε μία από αυτές αλλάζοντας κάθε φορά την τιμή της πίεσης ή της θερμοκρασίας ανάλογα με την παράμετρο.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Τα δεδομένα τα οποία ελήφθησαν κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας αφορούν την τάση, την ένταση και την θερμοκρασία λειτουργίας της ΚΚ. Επίσης καθόλη την διάρκεια λειτουργίας της ΚΚ η θερμοκρασία περιβάλλοντος μετρήθηκε και ήταν σταθερή στους 25°C.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από την Εικόνα 1 τόσο οι πειραματικές όσο και οι θεωρητικές καμπύλες είναι χαραγμένες μέσα σε ένα συγκεκριμένο περιορισμένο εύρος τιμών, αυτό συμβαίνει λόγω της ύπαρξης της ηλεκτρονικής μονάδας ελέγχου η οποία δεν αφήνει την ΚΚ να λειτουργήσει πέραν αυτού του εύρους των τιμών διασφαλίζοντας έτσι την ασφαλή λειτουργία της ΚΚ και αποτρέποντας το ενδεχόμενο να λειτουργήσει σε πεδία τιμών τα οποία μπορούν να την βλάψουν έως και να την καταστρέψουν.



Εικόνα 1: Πειραματικές και θεωρητικές καμπύλες Τάσης-Έντασης και Ισχύος-Έντασης

Η σχέση μεταξύ της τάσης εξόδου και της έντασης, στο εύρος τιμών που εξετάζουμε, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 1 είναι αντιστρόφως ανάλογη αφού αυξανόμενης της έντασης μειώνεται η τάση και αντίστροφα. Η μέγιστη τιμή της τάσης στην καμπύλη Τάσης-Έντασης είναι 16.49V στα 1.85A (Πειραματική), 16.13V στα 1.85A (Προσομοίωση) και η μέγιστη τιμή της έντασης είναι 11.02A στα 11.04V (Πειραματική) και 11.02A στα 12.10V (Προσομοίωση).

Επίσης στην Εικόνα 1 μπορούμε να παρατηρήσουμε και την σχέση μεταξύ της ισχύος και της έντασης η οποία εκ των πραγμάτων για αυτό το εύρος των τιμών είναι ανάλογες. Η μέγιστη τιμή της ισχύος εξόδου είναι 120.91W στα 11.02A (Πειραματική) και 133.31W στα 11.02A (Προσομοίωση).

Η συγκριτική μελέτη έγινε μεταξύ των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας και της διαδικασίας προσομοίωσης έτσι ώστε να βοηθήσει στην αύξηση της αξιοπιστίας του συγκεκριμένου μοντέλου όταν χρησιμοποιείται για την προσομοίωση μικρών σχετικά ΚΚ. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από την Εικόνα 1 τόσο η καμπύλη Τάσης-Έντασης όσο και η καμπύλη Ισχύος-Έντασης που προέκυψαν από την προσομοίωση έχουν αρκετά καλή σύγκλιση με αυτές που προέκυψαν πειραματικά με την διαφορά τιμών να κυμαίνεται σε ένα εύρος (-2.16)- 9.63% (Τάσης-Έντασης) και (-1.64)-10.26% (Ισχύος-Έντασης).

Η διαφορά μεταξύ των πειραματικών καμπυλών και των θεωρητικών έγκειται στο γεγονός ότι υπεισέρχονται αρκετές πηγές σφάλματος όπως:

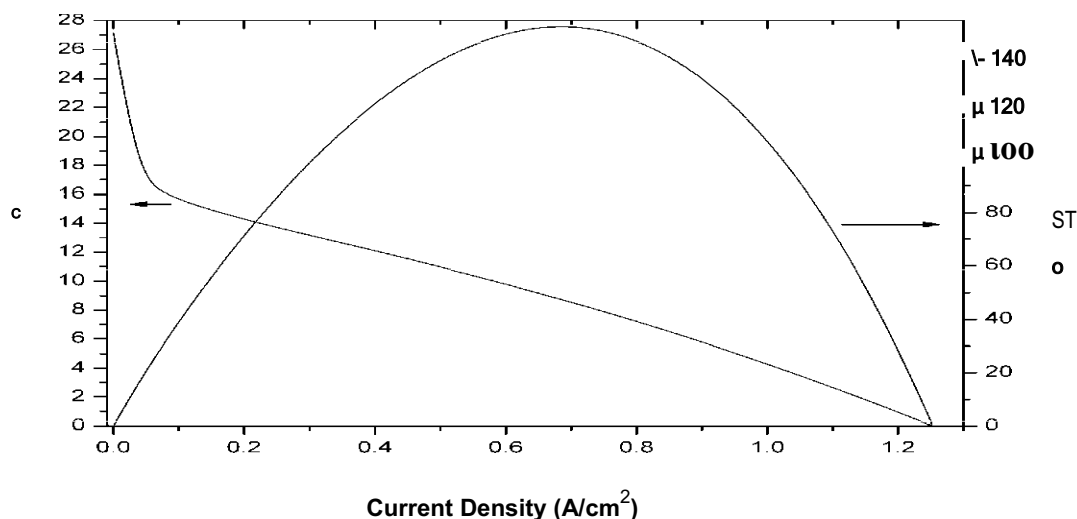
- Το μοντέλο δεν δέχεται τιμές για την ενεργή επιφάνεια της μεμβράνης χαμηλότερες των 25cm² τη στιγμή που η ΚΚ που χρησιμοποιούμε έχει ενεργή επιφάνεια μεμβράνης μόλις 18cm².

- Ο ενσωματωμένος ανεμιστήρας, που είναι υπεύθυνος για την ψύξη λόγω της διακοπτόμενης λειτουργίας του η οποία καθοδηγείται από την ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου, δεν επιτρέπει στην ΚΚ να διατηρήσει μία σταθερή θερμοκρασία σε μια υψηλή τιμή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της και έτσι έχουμε μια συνεχή αυξομείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας της ΚΚ γεγονός που επηρεάζει κατά πολύ την απόδοση της.

- Η ύπαρξη του αναλογικού μανόμετρου αποτελεί μία πηγή σφάλματος.

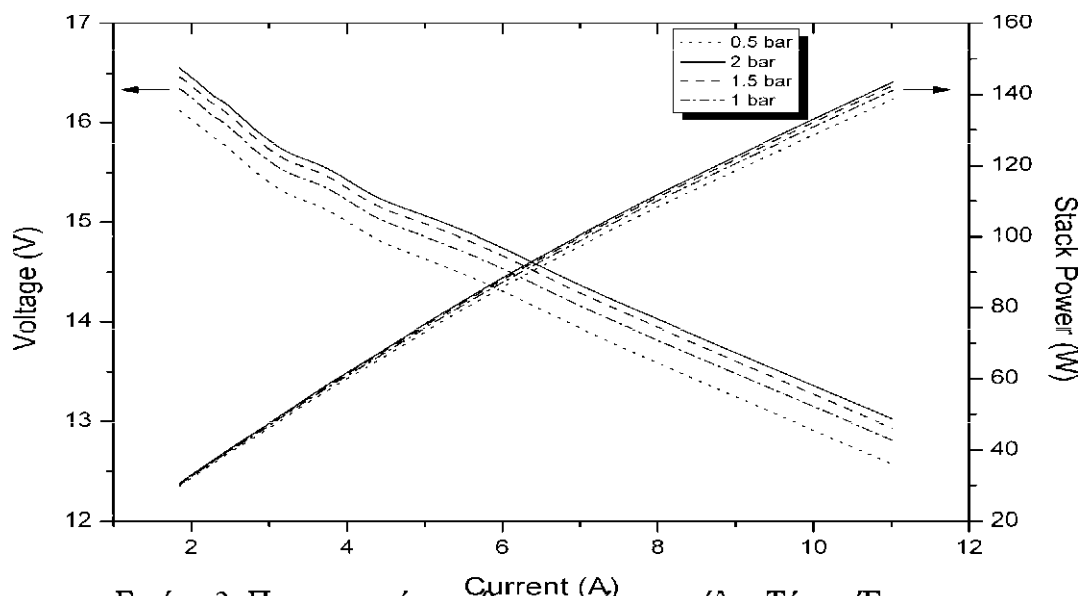
Λόγω του ότι κατά την διάρκεια της διαδικασίας προσομοίωσης δεν ισχύουν οι ίδιοι περιορισμοί που ισχύουν κατά την πειραματική διαδικασία, λόγω της ύπαρξης της ηλεκτρονικής μονάδας ελέγχου, καθίσταται δυνατή η χάραξη των καμπυλών σε όλο το θεωρητικό εύρος τιμών που θα μπορούσε να δουλέψει η ΚΚ.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από την Εικόνα 2 και οι δύο καμπύλες χαράχθηκαν ως προς την ένταση ανά μονάδα επιφανείας ενεργής μεμβράνης, αντί της έντασης έτσι ώστε να έχουμε μια πιο αντιπροσωπευτική εικόνα των δυνατοτήτων της ΚΚ και επίσης για να είμαστε σε συμφωνία με την διεθνή βιβλιογραφία.



Εικόνα 2: Θεωρητικές καμπύλες Τάσης-Έντασης και Ισχύος-Έντασης σε όλο το εύρος τιμών

Η τιμή της τάσης ανοικτού κυκλώματος όπως μπορεί να παρατηρηθεί από την Εικόνα 2 είναι 27.09V ενώ η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης είναι 1.25 A/cm². Επίσης η μέγιστη θεωρητική τιμή της ισχύος εξόδου είναι ίση με 149.78W για μια τιμή έντασης /μονάδα επιφανείας 0.68A/cm² και μία τιμή τάσης ίση με 8.8V.



Εικόνα 3: Πειραματικές και θεωρητικές καμπύλες Τάσης-Έντασης και Ισχύος-Έντασης από την παραμετρική ανάλυση για το Υδρογόνο.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από την Εικόνα 3 η καμπύλη η οποία δίνει την υψηλότερη τάση και ισχύ είναι αυτή η οποία αντιπροσωπεύει την υψηλότερη πίεση υδρογόνου (2 bar). Ως φυσικό επακόλουθο της πιο πάνω παρατήρησης μπορεί να ειπωθεί ότι σε αυτή την πίεση θα παρατηρηθεί και η υψηλότερη απόδοση ηλεκτροχημικής μετατροπής μιας και είναι άμεσα συνδεδεμένη και εξαρτώμενη από την τάση. Επίσης, οι χαμηλότερες τιμές τάσης και ισχύος παρατηρούνται στην καμπύλη που αντιπροσωπεύει την πίεση του 0.5 bar. Ο λόγος για τον οποίο παρατηρείται αύξηση της τάσης και της ισχύος όταν αντίστοιχα αυξάνεται η πίεση είναι διότι αυξάνοντας την πίεση όλο και περισσότερο υδρογόνο φθάνει στην μεμβράνη και λαμβάνει μέρος στην ηλεκτροχημική αντίδραση.

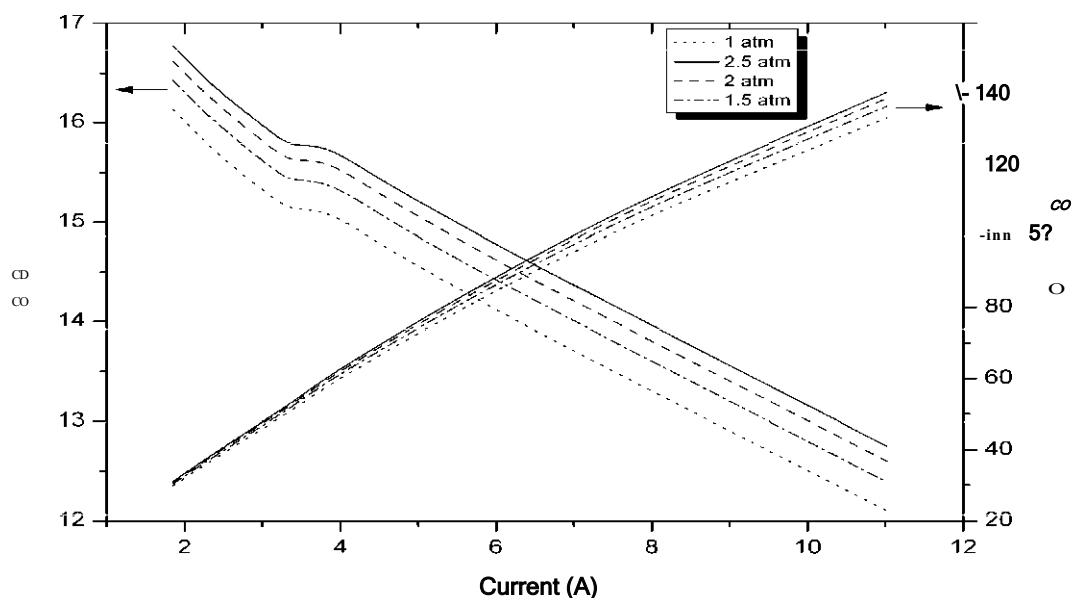
Φυσικά, το θέμα της αύξησης της πίεσης αποτελεί μόνο μία θεωρητική προσέγγιση μιας και για να μπορεί να αποκτήσει πρακτική εφαρμογή θα πρέπει να εξεταστεί λαμβάνοντας υπόψη και τους περιορισμούς που υπεισέρχονται από τις ιδιότητες και τα όρια αντοχής των υλικών που χρησιμοποιούνται, όπως για παράδειγμα στην μεμβράνη.

Από την Εικόνα 4 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η καμπύλη η οποία δίνει την υψηλότερη τάση και ισχύ είναι αυτή η οποία αντιπροσωπεύει την υψηλότερη πίεση οξυγόνου (2.5 atm). Η χαμηλότερη τιμή τάσης και ισχύος παρατηρείται στην καμπύλη που αντιπροσωπεύει την πίεση της 1 atm.

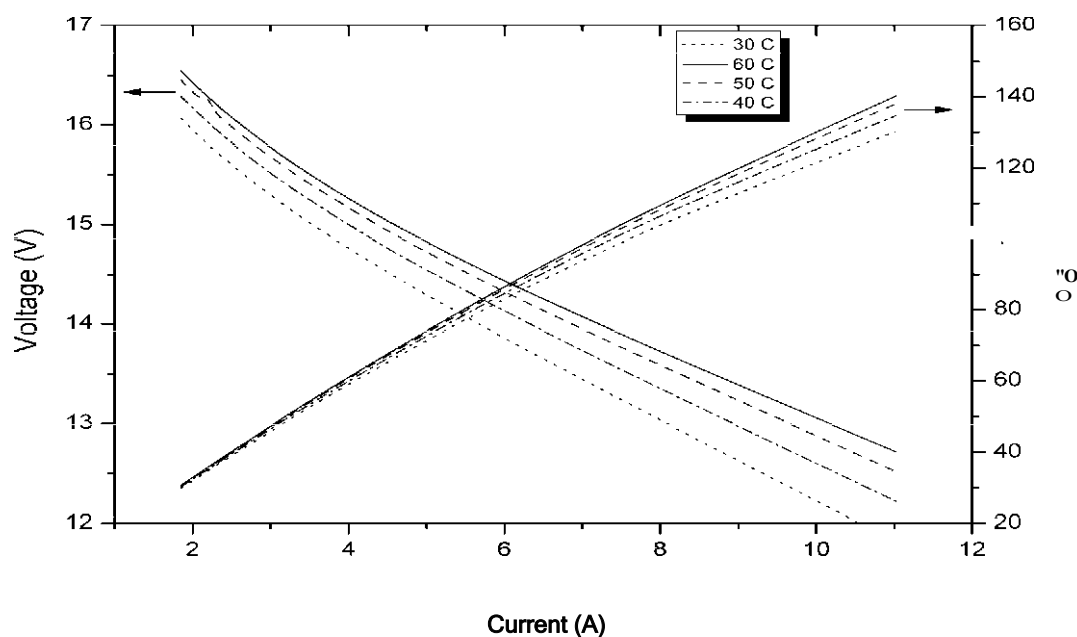
Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ο ίδιος με αυτόν για το υδρογόνο δηλαδή όταν αυξάνουμε την πίεση όλο και περισσότερο οξυγόνο φθάνει στην μεμβράνη και λαμβάνει μέρος στην ηλεκτροχημική αντίδραση.

Συγκρίνοντας τις Εικόνες 3 και 4 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι αυξάνοντας την πίεση της καθόδου (οξυγόνου) παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση της τάσης και της ισχύος από ότι όταν αυξάνουμε την πίεση της ανόδου (υδρογόνου).

Το θέμα της αύξησης της πίεσης του οξυγόνου μπορεί να πραγματοποιηθεί με την ενσωμάτωση μίας μικρής αντλίας αλλά θα πρέπει να εξεταστεί η ενεργειακή του απόδοση με την σύγκριση της αύξησης της παραγόμενης ενέργειας με αυτή που θα δαπανηθεί για την αύξηση της πίεσης.



Εικόνα 4: Πειραματικές και θεωρητικές καμπύλες Τάσης-Έντασης και Ισχύος-Έντασης από τον παραμετρική ανάλυση για το οξυγόνο



Εικόνα 5: Πειραματικές και θεωρητικές καμπύλες Τάσης-Έντασης και Ισχύος-Έντασης παραμετρικής ανάλυσης θερμοκρασίας λειτουργίας

Στην Εικόνα 5 παρατηρούμε ότι η καμπύλη η οποία δίνει την υψηλότερη τάση και ισχύ είναι αυτή η οποία αντιπροσωπεύει την υψηλότερη θερμοκρασία (60°C). Η χαμηλότερη τιμή τάσης και ισχύος παρατηρείται στην καμπύλη που αντιπροσωπεύει την θερμοκρασία των 30°C. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι διότι με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνονται οι απώλειες ενεργοποίησης (activation losses) και επίσης διότι βελτιώνεται η μεταφορά μάζας μέσα στην ΚΚ γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αντίστασης της ΚΚ (διότι αυξανόμενη της θερμοκρασίας η ηλεκτρική αγωγιμότητα των μετάλλων μειώνεται αλλά αυξάνεται η ιοντική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη-μεμβράνης [18]).

Η δυνατότητα του να διατηρηθεί η θερμοκρασία της ΚΚ σταθερή σε υψηλές τιμές θα μπορούσε να εξεταστεί με την χρήση μίας ηλεκτρονικής μονάδας ελέγχου μεγαλύτερης ακρίβειας σε συνδυασμό με ένα διαφορικό θερμοστάτη.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η απόδοση και η συμπεριφορά ενός εμπορικού συστήματος ΚΚ τύπου PEM με την πραγματοποίηση τόσο πειραματικής όσο και θεωρητικής διαδικασίας. Από τα αποτελέσματα των διαδικασιών αυτών προέκυψαν κάποια πολύ χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά την λειτουργία και περαιτέρω ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων.

Όπως στις περισσότερες εφαρμογές έτσι και κατά την λειτουργία υπό σταθερές συνθήκες μίας ΚΚ τύπου PEM δεν χρειάζεται και δεν πρέπει ουσιαστικά να λειτουργεί στην μέγιστη ισχύ της αλλά στο βέλτιστο σημείο όπου έχει και την μέγιστη απόδοση. Έτσι όταν πρόκειται να επιλεγεί μία ΚΚ το σωστό είναι η επιλογή να γίνει με βάση το βέλτιστο σημείο λειτουργίας και όχι με την μέγιστη ισχύ διότι με αυτό τον τρόπο έστω και αν το αρχικό κόστος είναι μεγαλύτερο λόγω του ότι θα επιλεγεί ΚΚ πιο μεγάλης ισχύος, από την άλλη αυτό το επιπλέον κόστος θα αποσβεσθεί από το γεγονός ότι θα λειτουργεί με πολύ καλύτερη απόδοση.

Όσον αφορά την πιστοποίηση της αξιοπιστίας του μοντέλου προσομοίωσης σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την σύγκριση των πειραματικών με τα θεωρητικά αποτελέσματα αυτή αποδείχθηκε να βρίσκεται σε αρκετά υψηλά και αποδεκτά επίπεδα παρά την ύ-

παρξη αρκετών πηγών σφάλματος. Μπορούμε έτσι να συμπεράνουμε ότι το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αρκετά υψηλό βαθμό αξιοπιστίας για την προσομοίωση μικρής ισχύος ΚΚ τύπου PEM.

Οι συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, τόσο στην άνοδο όσο και στην κάθοδο, κατά την λειτουργία της ΚΚ μπορούν να βελτιστοποιηθούν με βάση την αύξηση της απόδοσης της ΚΚ αλλά και της αντοχής των υλικών που την αποτελούν.

Επίσης η αστάθεια στις τιμές της τάσης και της ισχύος η οποία παρατηρείται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της ΚΚ οφείλεται στην λειτουργία του ενσωματωμένου ανεμιστήρα που είναι υπεύθυνος για την ψύξη της ΚΚ. Η χρήση ενός συστήματος ψύξης με μεγαλύτερη ακρίβεια, θα μπορούσε να διατηρήσει την θερμοκρασία λειτουργίας της ΚΚ πιο σταθερή και σε πιο υψηλές τιμές όπου η απόδοση θα ήταν υψηλότερη.

Όλες οι προτεινόμενες τεχνικές βελτιώσεις θα πρέπει να αξιολογηθούν σε μία βάση οικονομικής βιωσιμότητας που θα έχει ως κριτήριο το θετικό ενεργειακό ισοζύγιο που αφορά το κόστος αλλά και την ενέργεια που θα ξοδεύεται ως προς το κέρδος από την επιπλέον ενέργεια που θα παράγεται.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

- [1] Wakizoe M, Velev OA, Srinivasan S. Analysis of proton exchange membrane fuel cell performance with alternate membranes. *Electrochim Acta* 1995; 40(3)335-44
- [2] Chin-Hsiang Cheng, Hung-Hsiang Lin, Guang-Jer Lai, Simulation of Effects of Nafion Loading in Catalyst Layer on Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Heat and Mass Transfer*, Gold Coast, Queensland, Australia, January 17-19, 2007
- [3] Lee JH, Lalk TR, Modeling fuel cell stack systems, *J Power Sources* 1998; 73:229-41 [4] Picot D, Metkemeijer R, Bezia JJ, Rouveyre L. Impact of the water symmetry factor on humidification and cooling strategies for PEMFC stacks, *J Power Sources* 1998; 75: 251-60 [5] You L, Liu HT. A parametric study of the cathode catalyst layer of PEMFCs using a pseudo-homogeneous model, *Int J of Hydrogen Energy* 2001; 26:991—9
- [6] Hamelin J, Agbossou K, Laperriere A, Laurencelle F, Bose TK. Dynamic behavior of a PEMFC stack for stationary applications, *Int J of Hydrogen Energy* 2001;26:625-9
- [7] Chu D, Jiang R. Performance of polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) stacks Part I. Evaluation and simulation of an airbreathing PEMFC stack, *J Power Sources* 1999; 83:128-33 [8] Wang Ying, Young-Jun Sohn, Won-Yong Lee, J. Ke, Chang-Soo Kim, Three-dimensional modelling and experimental investigation for an air-breathing polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC), *J of Power Sources* 145 (2005) 563-571
- [9] Guo-Bin Jung, Kai-Fan Lo, Ay Su, Feng-Bor Weng, Cheng-Hsin Tu, Teng-Fu Yang, Shih- Hung Chan, Experimental evaluation of an ambient forced-feed air-supply PEM fuel cell, *Int J of Hydrogen Energy* 33 (2008) 2980 - 2985
- [10] Mann RF., Amphlett JC., Hooper MAI., Jensen HM., Peppley BA., Roberge PR., Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell, *J Power Sources* 86(2000) 173-180
- [11] Yerramalla S, Davari A, Feliachi A, Biswas T. Modeling and simulation of the dynamic behavior of a polymer electrolyte membrane fuel cell, *J Power Sources* (2003), 124(1):104

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ - ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ ΙΙ)

Ιωαννίδου¹ Ο., Ζαμπανιώτου¹ Α., Αθανασίου¹ Κ. και Χατζηανγουστής² Θ.

¹Τμ. Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,
Παν.θыр. 455, 54124, Πανεπιστημιούπολη, Θεσσαλονίκη
email: sonia@cheng.auth.gr

²ΤΕΙ Δυτ. Μακεδονίας, Κοίλα, Κοζάνη, 50100

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν αγροτικά και ενεργειακά υπολείμματα με σκοπό την ενεργειακή τους αξιοποίηση με τη μέθοδο της πυρόλυσης. Για τα πειράματα επιλέχθηκαν το βαμβάκι, ο ηλίανθος, η ελαιοκράμβη, το καλαμπόκι, η σόγια και η ελιά. Το βαμβάκι, το καλαμπόκι, η ελιά και ο ηλίανθος αποτελούν ήδη βασικές καλλιέργειες στην Ελλάδα με πολύ καλή προσαρμογή στις εδαφολογικές συνθήκες της χώρας. Η ελαιοκράμβη, από την άλλη, αποτελεί ένα από τα πιο πλούσια σε έλαια φυτό, μετά την σόγια, και παρουσιάζει πολύ καλή προσαρμοστικότητα στο κλίμα της Ελλάδος γενικότερα.

Κατά τη διεργασία της πυρόλυσης μελετήθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι αντιδραστήρων (captive sample, fixed bed). Οι αποδόσεις των αέριων και των υγρών βιοκαυσίμων ήταν τα κύρια αποτελέσματα της έρευνας με σκοπό να χρησιμοποιηθούν σε κυψέλη καυσίμου ώστε να μελετηθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος στη διάταξη.

Ο προτεινόμενος συνδυασμός πυρόλυσης βιομάζας /κυψέλη καυσίμου, δύσκολα μπορεί, από οικονομικής σκοπιάς, να ανταγωνιστεί την αντίστοιχη χρήση των, φθηνών προς το παρόν, ορυκτών καυσίμων, παρά μόνο αν η εφαρμογή του συνοδεύεται από την ταυτόχρονη παραγωγή χημικών προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας από τα παραπροϊόντα της διεργασίας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κοινωνικο-οικονομική και βιομηχανική ανάπτυξη της Ελλάδας την οδηγεί σε μία συνεχώς αυξανόμενη τάση κατανάλωσης ενέργειας, ιδιαίτερα ηλεκτρικής, με αποτέλεσμα να παρατηρείται μια αύξηση 170% κατά την διάρκεια των τελευταίων 20 χρόνων. Η νομοθεσία και οι εθνικές οδηγίες έχουν πλέον απελευθερώσει την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, και έχει ήδη εκδηλωθεί ενδιαφέρον για την παραγωγή ενέργειας από άλλες ανανεώσιμες πηγές. Η ενεργειακή αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και ειδικότερα της γεωργικής βιομάζας (υπολείμματα γεωργικών /ενεργειακών καλλιεργειών), μέσω των θερμοχημικών διεργασιών συνεπάγεται σημαντικά πλεονεκτήματα όπως η μηδενική συνεισφορά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και η μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων NO_x, SO_x.

Τα τελευταία χρόνια έχει καταγραφεί (ΚΑΠΕ) επίσης ότι το 2002 περίπου 2.730 εγκαταστάσεις παρήγαγαν μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που κατανάλωναν από τα υπολείμματα/ παραπροϊόντα βιομάζας που διαχειρίζονταν (υπολείμματα εκκοκκιστηρίων βάμβακος, ελαιοπυρηνόξυλου, πριονίδια, άχυρο ρυζιού κ.α.) μη συμπεριλαμβανομένης της βιομάζας που χρησιμοποιήθηκε για οικιακή χρήση (κυρίως δασική ξυλεία).

Το πρώτο στάδιο της παρούσας μελέτης ήταν η επιλογή των πρώτων υλών με σκοπό την ενεργειακή τους αξιοποίηση διαμέσου πυρόλυσης. Οι πρώτες ύλες που μελετήθηκαν ήταν διάφορα αγροτικά και ενεργειακά υπολείμματα.

Κατόπιν χρησιμοποιήθηκαν δύο διατάξεις πυρολυτικού αντιδραστήρα (captive sample, fixed bed), με σκοπό να μελετηθούν τα ποσοστά και οι αποδόσεις των υγρών και αερίων προϊόντων τους. Από τον captive sample υπήρχε η δυνατότητα χρήσης μόνο αερίου προϊόντος λόγω της διάταξης.

Τέλος, μελετήθηκε η δυνατότητα εσωτερικής αναμόρφωσης των αερίων και μετατροπής των υγρών προϊόντων, σε μίγματα πλούσια σε υδρογόνο, καθώς και η απευθείας τροφοδοσία τους σε κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα στάδια της μελέτης περιγράφονται παρακάτω.

2. ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ

Τα υπολείμματα γεωργικών καλλιεργειών (κλαδιά, φύλλα, κουκούτσια, κοτσάνια, κλαδέματα, άχυρα κτλ) συσσωρεύονται επί ετήσιας βάσης και πολύ μεγάλες ποσότητες, αφήνοντας ανεκμετάλλευτο το ενεργειακό δυναμικό τους. Μόνο ένα μικρό ποσοστό αυτών αξιοποιείται, παγκοσμίως, για παραγωγή ενέργειας και κυρίως μέσω της καύσης και η έρευνα επεκτείνεται και σε τομείς όπως η σύνθετη καύση με ζωικά απορρίμματα, με άνθρακα, αναερόβια ζύμωση και κομποστοποίηση.

Τα πλεονεκτήματα της ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας για την αποτροπή της κλιματικής αλλαγής είναι γνωστά. Η χρησιμοποίηση των αγροτικών υπολειμμάτων μπορεί να συμβάλει στην κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη αγροτικών περιοχών, καθώς θα αυξήσει την αγροτική παραγωγή και θα διασφαλίσει ένα καλύτερο βιοτικό επίπεδο για τους κατοίκους των αγροτικών περιοχών και τους ίδιους τους αγρότες. Η ελεύθερη από παρουσία S στάχτη της θερμοχημικής μετατροπής των αγροτικών απορριμμάτων την καθιστά εφαρμόσιμη σαν λίπασμα.

Εκτός όμως από τα παραπάνω πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρησιμοποίηση της βιομάζας, υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα και δυσκολίες στην διαχείριση της: μεγάλοι όγκοι προς αποθήκευση και διαχείριση, η συγκομιδή και μεταφορά τους από ηπειρωτικές περιοχές και νησιά, το υψηλό περιεχόμενο υγρασίας τους που μειώνει σημαντικά το ενεργειακό περιεχόμενο τους, ο εποχιακός χαρακτήρα παραγωγής τους και η μεταβλητή ποιότητα τους ακόμα και αν πρόκειται για δείγματα της ίδιας παρτίδας.

Η επιλογή των πρώτων υλών ανάμεσα από τα διάφορα αγροτικά και ενεργειακά υπολείμματα έγινε κατόπιν βιβλιογραφικής επισκόπησης. Τα κριτήρια με τα οποία επιλέχθηκαν για πειραματική μελέτη αφορούσαν την ποιότητα και ποσότητα τους. Η υγρασία και η διαθεσιμότητα τους στον ελλαδικό χώρο έπαιξαν επίσης σημαντικό ρόλο στην επιλογή των δειγμάτων [1].

Σύμφωνα με τις τελευταίες εκτιμήσεις του ΚΑΠΕ(2003) η κατανάλωση της βιομάζας έχει συνεισφέρει κατά 704.000 ΤΙΠ στον οικιακό τομέα, και στον βιομηχανικό τομέα κατά 246.000 ΤΙΠ ενώ ακόμα δεν έχει γίνει απόπειρα χρησιμοποίησης τους στον τομέα μεταφορών.

Ένα σημαντικό από τα κριτήρια που καθορίζουν την επιλογή μεθόδου επεξεργασίας των αγροτικών απορριμμάτων, είναι το περιεχόμενο υγρασίας τους και η στοιχειομετρική σχέση C/N. Για περιεχόμενο υγρασίας λιγότερο από 50% κ.β. και λόγους C/N > 30, η θερμοχημική μέθοδος επεξεργασίας της βιομάζας είναι εφαρμόσιμη για την απευθείας καύση, πυρόλυση, και αεριοποίηση. Οι περιοχές όπου υπάρχει σημαντική παραγωγή γεωργικών υπολειμμάτων είναι η Θεσσαλία, Ανατολική Μακεδονία, Πελοπόννησος, και Κρήτη. Τα κυριότερα γεωργικά υπολείμματα που χαρακτηρίζουν τις αγροτικές δραστηριότητες στην Ελλάδα είναι τα κλαδέματα ελιάς, κλαδέματα βαμβακιού, άχυρα σκληρού σίτου, κλαδέματα καλαμποκιάς, άχυρα μαλακού σίτου, κλπ. Έτσι, τα δείγματα τα οποία υπερτέρησαν ήταν:

Τα υπολείμματα βαμβακιού, τα υπολείμματα ηλίανθου, τα κλαδέματα ελαιοκράμβης, τα υπολείμματα καλαμποκιού, τα κλαδέματα σόγιας και τα υπολείμματα ελιάς.

3. ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΣΤΟΥΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ CAPTIVE SAMPLE ΚΑΙ FIXED BED

Πυρόλυση στον captive sample

Η αρχή λειτουργίας της διάταξης του αντιδραστήρα captive sample είναι η εξής:

Το δείγμα τοποθετείται σε πλέγμα από ανοξείδωτο χάλυβα το οποίο εφαρμόζει μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων μέσα στον αντιδραστήρα και σε αδρανή ατμόσφαιρα αερίου γνωστής πίεσης. Η μεταφορά θερμότητας στο πλέγμα γίνεται από ένα απλό ηλεκτρικό κύκλωμα εναλλασσόμενου ρεύματος. Η όλη διάταξη αποτελείται από 5 τμήματα (αντιδραστήρας, ψύκτης αερίων προϊόντων, παγίδα υγρασίας, σύστημα συλλογής αερίων προϊόντων, σύστημα ανάλυσης των αερίων προϊόντων). Λεπτομερής περιγραφή της πειραματικής μονάδας αλλά και της διαδικασίας παρουσιάζεται σε προηγούμενη δημοσιευμένη έρευνα της ίδιας πειραματικής ομάδας [2, 3].

Στη διεργασία της πυρόλυσης η θερμοκρασία και ο ρυθμός θέρμανσης παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ποιότητα των προϊόντων. Με την αύξηση της θερμοκρασίας το ποσοστό του εξανθρακώματος μειώνεται σε αντίθεση με του αερίου που αυξάνεται. Το ποσοστό των υγρών προϊόντων (υδρογονάνθρακες, πίσσα και νερό πυρόλυσης) δεν είναι μεγαλύτερο από 27%κβ στα ρόκα και 22%κβ στα υπολείμματα από καλαμπόκι.

Η θερμοκρασία επιδρά σημαντικά και στις συγκεντρώσεις του αερίου προϊόντος από την πυρόλυση. Παρατηρείται ότι η υψηλή θερμοκρασία ευνοεί την διάσπαση των υδρογονανθράκων και της πίσσας στην αέρια φάση ευνοώντας το σχηματισμό H_2 και CO , και του CH_4 . Το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα μειώνεται με τη θερμοκρασία, και υπάρχουν επίσης ίχνη αιθυλενίου και αιθανίου. Η θερμογόνος δύναμη του αερίου προϊόντος που υπολογίστηκε με βάση τα ποσοστά κατ' όγκο των CO , H_2 , και των υδρογονανθράκων κυμαίνεται μεταξύ 10-15 MJ m⁻³.

Πυρόλυση στον fixed bed

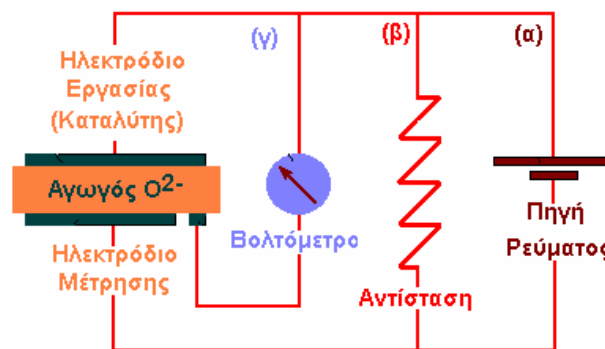
Τα πειράματα πυρόλυσης διεξήχθησαν επίσης και με αντιδραστήρα σταθερής κλίνης (fixed bed). Λεπτομερής περιγραφή της πειραματικής μονάδας αλλά και της διαδικασίας παρουσιάζεται σε προηγούμενη δημοσιευμένη έρευνα της ίδιας πειραματικής ομάδας [4].

Από τη μελέτη φάνηκε πως τη μεγαλύτερη παραγωγή σε υγρά προϊόντα εμφανίζουν τα υπολείμματα καλαμποκιού, σε αέρια προϊόντα η ρόκα καλαμποκιού ενώ σε κωκ ο ηλίανθος. Ο ηλίανθος και τα δύο είδη του καλαμποκιού ευνοούν την παραγωγή νερού ή υδατοδιαλυτών ενώσεων κατά την πυρόλυση. Τη μεγαλύτερη παραγωγή σε H_2 εμφάνισε το ελαιοπυρηνόξυλο, σε CO_2 ο ηλίανθος ενώ σε CO εμφάνισαν τα υπολείμματα και τα ρόκα από καλαμπόκι. Το CH_4 , που είναι ο μεγαλύτερος σε συγκέντρωση υδρογονάνθρακας στο παραγόμενο μίγμα αερίων εμφανίζεται ιδιαίτερα αυξημένο στα πειράματα από ελαιοπυρηνόξυλο, ενώ το πιο πλούσιο μίγμα σε βαρείς αέριους υδρογονάνθρακες είναι το παραγόμενο από κλαδέματα ελιάς

4. ΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΙ ΥΓΡΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ ΣΕ ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Στην παρούσα μελέτη επιχειρήθηκε η ηλεκτροκαταλυτική αναμόρφωση των αερίων / υγρών προϊόντων της θερμοχημικής μετατροπής πρώτων υλών βιομάζας και τέλος τα ίδια προϊόντα τροφοδοτήθηκαν στον Αντιδραστήρα Μεμβράνης με στόχο να μελετηθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος στη διάταξη.

Στο **Σχήμα 1** απεικονίζεται η αρχή λειτουργίας μίας **Κυψέλης Καυσίμου**. Η διεξαγωγή μίας αντίδρασης στο ίδιο ηλεκτρόδιο, έχει σαν αποτέλεσμα τη συντήρηση μίας διαφοράς συγκέντρωσης οξυγόνου, εκατέρωθεν της μεμβράνης και η αυθόρμητη ροή O^{2-} , που αυτή προκαλεί, μεταφράζεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από την κυψέλη καυσίμου (β). Επιτυγχάνεται η **ηλεκτροχημική ενίσχυση της αντίδρασης** (Electrochemical Oxygen Pumping, EOP), η οποία έχει εφαρμοσθεί σε αντιδράσεις όπως η οξείδωση μεθανόλης, υδρογόνου, μεθανίου κ.α και έχει οδηγήσει στην αντιστρεπτή αύξηση του καταλυτικού ρυθμού ως και κατά δύο τάξεις μεγέθους.



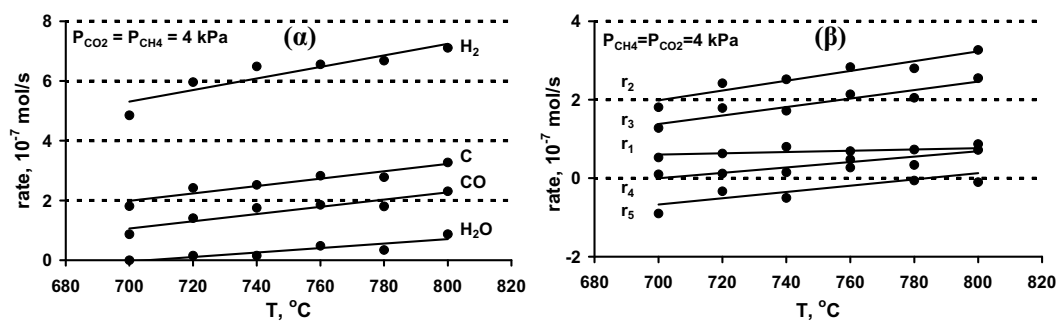
Σχήμα 1. Αρχή λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου

Η εσωτερική αναμόρφωση σε SOFC παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα της ταυτόχρονης παραγωγής και κατανάλωσης H_2 και CO στην ίδια διάταξη, του περιορισμού της εναπόθεσης άνθρακα και τη μετατόπιση της ισορροπίας προς τα προϊόντα. Το Pd αποτελεί έναν από τους πιο ενεργούς καταλύτες αναμόρφωσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ανοδικό ηλεκτρόδιο σε SOFCs.

Στην παρούσα μελέτη, ερευνήθηκε η ξηρή αναμόρφωση του CH_4 σε κυψέλη Pd/YSZ/Pt. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η επίδραση της θερμοκρασίας ($700 - 800^\circ C$), των μερικών πιέσεων του CH_4 (1-7 kPa) και του CO_2 (1-7 kPa) καθώς και της επιβολής ρεύματος (ηλεκτροχημική τροφοδοσία / απομάκρυνση οξυγόνου) στους ρυθμούς των προϊόντων και των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα στην κυψέλη. Κατά τη διεξαγωγή της σε καταλυτικά ή ηλεκτροκαταλυτικά συστήματα, η Αντίδραση 3 συνοδεύεται από πλήθος παράπλευρων αντιδράσεων. Οι γραμμικώς ανεξάρτητες αντιδράσεις του συστήματος $CH_4 - CO_2$ είναι έξι. Για την ερμηνεία της κινητικής συμπεριφοράς της ξηρής αναμόρφωσης, από το πλήθος των επιμέρους αντιδράσεων επιλέχθηκαν οι παρακάτω.

$CH_4 + CO_2 = 2 CO + 2 H_2$	ξηρή αναμόρφωση	1.
$CH_4 \leftrightarrow C + H_2$	πυρόλυση του CH_4	2.
$2CO \leftrightarrow C + CO_2$	Boudouard	3.
$CO_2 + H_2 \leftrightarrow CO + H_2O$	αντίστροφη αντίδραση του υδραερίου	4.
$CH_4 + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 4H_2$	αναμόρφωση με περίσσεια ατμού	5.

Οι καταλυτικοί και οι ηλεκτροκαταλυτικοί ρυθμοί των αντιδράσεων αυτών, υπολογίστηκαν από την επίλυση των μοριακών ισοζυγίων, έτσι ώστε να επαληθεύονται οι πειραματικές μετρήσεις.



Σχήμα 2. Επίδραση της θερμοκρασίας στους ρυθμούς σχηματισμού των προϊόντων (α) και των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα (β).

Η επίδραση της θερμοκρασίας στον ρυθμό της ξηρής αναμόρφωσης του CH₄, σε ισομοριακό μίγμα αντιδρώντων, φαίνεται στο **Σχήμα 2**. Παρατηρήθηκε ότι, τόσο οι ρυθμοί σχηματισμού των προϊόντων όσο και οι ρυθμοί των Αντιδράσεων 1 – 5, αυξάνονται με τη θερμοκρασία. Η αύξηση του ρυθμού παραγωγής υδρογόνου μπορεί να αποδοθεί περισσότερο στην αύξηση της πυρόλυσης του CH₄ και τη μετατόπιση της ισορροπίας της αναμόρφωσης με ατμό, ενώ περιορίζεται από την ενίσχυση της Αντίδρασης 4. Η Αντίδραση 1 φαίνεται να ενισχύεται οριακά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αντίστοιχα, η αύξηση του CO μπορεί να αποδοθεί στην ενίσχυση της Αντίδρασης 4, καθώς και στην οριακή ενίσχυση της Αντίδρασης 1 και περιορίζεται από την αύξηση του ρυθμού της Boudouard. Η αύξηση του ρυθμού των Αντιδράσεων 2 και 3, οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού συσσώρευσης άνθρακα στην επιφάνεια του καταλύτη.

Παρατηρείται ότι η αύξηση της μερικής πίεσης του CO₂, οδηγεί σε πτώση του ρυθμού των Αντιδράσεων 2 και 3 και κατά συνέπεια στη μείωση της εναπόθεσης άνθρακα. Μάλιστα, η αντίδραση Boudouard πραγματοποιείται με αντίθετη φορά για P_{CO2} > 6 kPa, ενώ καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος λαμβάνει χώρα οι αντιδράσεις μεθανίωσης (η αντίστροφη της Αντίδρασης 5) και η αντίδραση του υδραερίου (η αντίστροφη της Αντίδρασης 4), με αντίθετα μεταξύ τους αποτελέσματα, όσον αφορά στην παραγωγή H₂. Έτσι, παρά την ενίσχυση της κατανάλωσης H₂, από την Αντίδραση 5 και τον περιορισμό της πυρόλυσης, η αύξηση του ρυθμού παραγωγής του μπορεί να αποδοθεί στην ενίσχυση του ρυθμού των αντιδράσεων του υδραερίου και της ξηρής αναμόρφωσης. Αντίστοιχα, η ενίσχυση του ρυθμού παραγωγής CO μπορεί να αποδοθεί στην ενίσχυση της ξηρής αναμόρφωσης και της αντίστροφης αντίδρασης Boudouard και περιορίζεται από την αντίδραση του υδραερίου.

Επίσης, παρατηρήθηκε αύξηση στους ρυθμούς των Αντιδράσεων 2 και 3 με αποτέλεσμα να εμφανίζονται υψηλοί λόγοι H₂/CO καθώς και αυξημένη εναπόθεση άνθρακα, σε συνθήκες περίσσειας μεθανίου. Αντίθετα, ο ρυθμός σχηματισμού του CO ελαττώνεται τόσο λόγω της ενίσχυσης της αντίδρασης Boudouard όσο και της πτώσης του ρυθμού της ξηρής αναμόρφωσης. Η ελάττωση αυτή περιορίζεται οριακά από την πτώση του ρυθμού της αντίδρασης του υδραερίου. Αντίθετα, ο ρυθμός σχηματισμού H₂ αυξάνεται λόγω της σημαντικής αύξησης του ρυθμού της πυρόλυσης και την πτώση του ρυθμού της μεθανίωσης (αντίστροφη της Αντίδρασης 5), παρά την πτώση του ρυθμού της αντίδρασης του υδραερίου.

Η ανάλυση του μηχανισμού της ξηρής αναμόρφωσης [5], έδειξε ότι στις υψηλές θερμοκρασίες διεξαγωγής των μετρήσεων, πυρόλυσης του CH₄ διαδραματίζει σημαντικό ρόλο οδηγώντας σε υψηλή αναλογία H₂/CO και υψηλούς ρυθμούς εναπόθεσης άνθρακα, ακόμη και σε συνθήκες περίσσειας CO₂ (CO₂/CH₄ = 2). Η ηλεκτροχημική ενίσχυση παρά το γεγονός ότι περιορίζει το σχηματισμό άνθρακα και ενισχύει τους ρυθμούς H₂ και CO, δεν φαίνεται να βελτιώνει τη μεταξύ τους αναλογία.

Εσωτερική Αναμόρφωση αερίων/υγρών προϊόντων για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος

Σύμφωνα με την θεωρία των κυψελών καυσίμου, αυτές επιτρέπουν την μετατροπή της ελεύθερης ενέργειας της αντίδρασης καύσης, που συμβαίνει στην άνοδο, απευθείας σε ηλεκτρική. Η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας κατά την αντίδραση καύσης του H_2 (228,6 kJ/mol) είναι χαμηλότερη από αυτή της αντίδρασης καύσης του CO (257,1 kJ/mol). Οπότε το μονοξείδιο του άνθρακα θα έπρεπε να αποτελεί περισσότερο αποδοτικό καύσιμο σε σχέση με το υδρογόνο. Κάτι τέτοιο δεν φαίνεται να επιβεβαιώνεται από τις μετρήσεις που διεξήχθησαν καθώς και από τη σχετική διεθνή βιβλιογραφία και αποδίδεται στο γεγονός ότι το μόριο του CO, μετά τη ρόφηση του στο ηλεκτρόδιο εργασίας δεν είναι σε θέση να διαχυθεί προς την τριεπιφάνεια αερίου-ηλεκτροδίου-ηλεκτρολύτη, όπου και αντιδρά με τα ιόντα O^{2-} που εκλύονται από τον αγωγό οξυγόνου. Αντίθετα, η ηλεκτρο-οξείδωση των ευκίνητων ατόμων του διασπαστικά ροφημένου H_2 , δεν περιορίζεται κινητικά από την επιφανειακή τους διάχυση προς την τριεπιφάνεια.

Τα αέρια βιοκαύσιμα που προκύπτουν από την θερμοχημική μετατροπή της βιομάζας περιέχουν σημαντικές ποσότητες μονοξειδίου του άνθρακα. Για το λόγο αυτό η δυνατότητα ηλεκτρο-οξείδωσης του σε κυψέλες καυσίμου τύπου SOFC αποτελεί ίσως την πλέον σημαντική παράμετρο, όσον αφορά στην επιτυχή σύζευξη τους με τις διεργασίες θερμοχημικής μετατροπής βιομάζας [6].

Για το ίδιο δυναμικό, οι τιμές του ρεύματος που αναπτύσσονται στην κυψέλη είναι παραπλήσιοι ανεξάρτητα του τροφοδοτούμενου καυσίμου, γεγονός που με τη σειρά του οδηγεί σε παραπλήσιες τιμές παραγόμενης ισχύος.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα υπολείμματα γεωργικών καλλιεργειών αποτελούν μια σημαντική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και από άποψης περιβαλλοντικής προστασίας και αειφόρου ανάπτυξης και φαίνονται κατάλληλα για την θερμοχημική μετατροπή τους προς αέρια υγρά καύσιμα. Η πυρόλυση τους συμβάλει ως καθαρή μέθοδος παραγωγής ενέργειας από αυτά γιατί δεν δημιουργεί τα περιβαλλοντικά προβλήματα τα οποία προκαλεί η καύση, όπως αύξηση της συγκέντρωσης του CO_2 στην ατμόσφαιρα, απελευθέρωση αερίων θερμοκηπίου, αύξηση συγκέντρωσης σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.

Με την ολοκλήρωση της παρούσας έρευνας τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι τα υπολείμματα γεωργικής βιομάζας δύνανται να αξιοποιηθούν μέσω της θερμοχημικής οδού με ελκυστικά αποτελέσματα σε ότι αφορά την παραγωγή αερίων και υγρών καυσίμων που θα οδηγηθούν περαιτέρω για παραγωγή ενέργειας. Οι μέθοδοι πυρόλυσης (captive sample αντιδραστήρα και σταθερής κλίνης) μπορούν να αποδώσουν αέρια προϊόντα μέσης θερμογόνου δύναμης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας σε τουρμπίνες και μηχανές εσωτερικής καύσης. Επίσης, το στερεό υπόλειμμα της πυρόλυσης αποδείχθηκε να είναι μια καλή πρώτη ύλη για παραγωγή ενεργού άνθρακα. Η πυρόλυση στον αντιδραστήρα σταθερής κλίνης έδειξε επίσης, ότι το υγρό προϊόν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Η εφαρμογή του H_2 και CO, που παρήχθησαν από την πυρόλυση της βιομάζας, σε κυψέλη καυσίμου συνέσφερε στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της τάξης του 70%.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα θέλανε να ευχαριστήσουν το Υπουργείο Παιδείας και την Ευρωπαϊκή Ένωση για τη χρηματοδότηση της έρευνας στα πλαίσια του Προγράμματος Πυθαγόρας II.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. V.Skoulou, A. Zabaniotou, Potential application of wastes (agricultural and animal) for energy and material recovery with environmental safety, 13th International Symposium on Environmental Pollution and its Impact on Life in the Mediterranean Region, 8-12 October, 2005, Thessaloniki, Greece
2. A. Zabaniotou, O. Ioannidou, E. Antonakou, A. Lappas, 'Experimental study of pyrolysis for potential energy, hydrogen and carbon material production from lignocellulosic biomass', *IJHE* 33, p.2433, 2008.
3. A.A. Zabaniotou, E.K. Kantarelis, D.C. Theodoropoulos, 'Sunflower shells utilization for energetic purposes in an integrated approach of energy crops: Laboratory study pyrolysis and kinetics', *Bioresource Technology* 99, p.3174, 2008.
4. Eleni Antonakou, Angelos Lappas, Merete H. Nilsen, Aud Bouzga, Michael Stocker, 'Evaluation of various types of Al-MCM-41 materials as catalysts in biomass pyrolysis for the production of bio-fuels and chemicals', *Fuel* 85 p. 2202, 2006.
5. A Zabaniotou, C Athanasiou, E Antonakou, A Lappas, The Conjunction of Biomass Thermochemical Conversion with Solid Oxide Fuel Cells, 7th European Gasification Conference 25-27 April 2006, Barcelona, Spain
6. Athanassiou, E. Antonakou, A. Lappas and A. Zabaniotou. The Conjunction of Biomass Thermochemical Conversion with Solid Oxide Fuel Cells – a Review of the Involved Processes. International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC 2005, Istanbul, Turkey, 13-15 July 2005

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΥΜΑΤΩΝ

ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟ ΣΕ ΗΛΕΚΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

A. A. Καράμπελας, M. Γεωργίου, A. Πρίφτης

Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Πατρών.
26500. e-mail: caral@mech.upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος εκμετάλλευσης της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων. Η αρχική ιδέα οφείλεται στον ινδό **T.Sampath Kumar** και φέρει την ονομασία IWave (Indian Wave energy device) (1). Ο μηχανισμός αυτός επιπλέει στο επίπεδο τις θάλασσας αγκυρωμένος στο βυθό. Η άνοδος της στάθμης του νερού λόγω του κύματος ή της παλίρροιας αναγκάζει ένα πλωτό πιστόνι συνδεδεμένο με ένα στρόφαλο να μετατοπισθεί κατά τον άξονα Z με αποτέλεσμα την μισή περιστροφή του στροφάλου. Καθώς το κύμα υποχωρεί το πιστόνι κατεβαίνει ολοκληρώνοντας τον κύκλο. Για κάθε κύμα αντιστοιχεί μια ολόκληρη περιστροφή. Η κίνηση του πιστονιού λαμβάνει χώρα μέσα σε ένα κύλινδρο με μια ειδική διαμόρφωση στη βάση του. Χρησιμοποιώντας ένα μεταβλητό κιβώτιο ταχυτήτων έχουμε από την γεννήτρια παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενεργειακή κρίση που οφείλεται στην αύξηση της τιμής των καυσίμων, η μόλυνση του περιβάλλοντος και το γεγονός ότι τα ορυκτά καύσιμα σε λίγα χρόνια θα αποτελούν παρελθόν, πρέπει να μας οδηγήσουν στην εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι πρόσφατες προβλέψεις δείχνουν πως η παγκόσμιες ανάγκες θα αυξηθούν κατά 50% ως το 2020! Συνδυάζοντας αυτό με τους ήδη γοργούς ρυθμούς εξάντλησης των αποθεμάτων σε παγκόσμια κλίμακα και με τον πλανήτη να εκπέμπει σήμα κινδύνου, καθώς τα επίπεδα τις ατμοσφαιρικής ρύπανσης έχουν φτάσει στα ύψη, καταλαβαίνει κανείς πως η στροφή στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελεί μονόδρομο για την ανθρωπότητα.

2. ΣΗΜΕΡΙΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Ένα μεγάλο κομμάτι των ΑΠΕ αποτελούν τα θαλάσσια κύματα τα οποία έχουν την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από κάθε άλλη ΑΠΕ. Η ενέργεια του κύματος είναι ευθέως ανάλογη του τετραγώνου του εύρους και της περιόδου της κίνησής του (3). Μακράς περιόδου (>7-10 s) και μεγάλου εύρους (>2m) κύματα έχουν ενεργειακές εκροές που υπερβαίνουν τα 40-50KW ανά μέτρο εύρους μετώπου κύματος. Η οικονομικά αποδοτική παραγωγή ενέργειας από τη θάλασσα όμως, αποτελεί μια αρκετά δύσκολη τεχνολογικά δοκιμασία γι' αυτό πολλές χώρες δίνουν ήδη μεγάλη έμφαση στη σχετική έρευνα και ανάπτυξη.

Οι μηχανισμοί μετατροπής κυματικής ενέργειας εντάσσονται σε δύο κύριες κατηγορίες: στους σταθερούς και στους πλωτούς. Οι *σταθεροί μηχανισμοί ή μηχανισμοί ακτογραμμής*

εγκαθίστανται είτε στο βυθό είτε στην ακτή και βασικό τους πλεονέκτημα έναντι των πλωτών είναι η πιο εύκολη εγκατάσταση και συντήρησή τους.

2.1 ΣΤΑΘΕΡΟΙ:

Το βασικό σταθερό ή σύστημα ακτογραμμής μετατροπής κυματικής ενέργειας εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της *ταλαντευόμενης στήλης νερού* (συμπίεση αέρα σε θάλαμο με στροβιλογεννήτρια). Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται ήδη σε νορβηγικούς σταθμούς στο Bergen, στην Ιρλανδία και στο σταθμό Gully στο νησί Islay της Σκωτίας, όπου σήμερα λειτουργεί βελτιωμένο με την ονομασία *LIMPET* (Land Installed Marine Powered Energy Transformer) (2).

Μέσα στους μηχανισμούς ακτογραμμής εντάσσεται και το σύστημα *TAPCHAN* που αποτελείται από μια δεξαμενή η οποία όταν γεμίσει με νερό το διοχετεύει μέσω καναλιών σε ένα υδροστρόβιλο συνδεδεμένο με ηλεκτρογεννήτρια. Μάλιστα η Νορβηγική εταιρεία Indonor AS ανέλαβε να εγκαταστήσει μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος τύπου TAPCHAN στο Baron στην νότια ακτή της Java στην Ινδονησία.

2.2 ΠΛΩΤΟΙ:

Υπάρχουν πολλά συστήματα πλωτών εγκαταστάσεων μερικά εκ των οποίων είναι:

Το σύστημα *Mighty Whale*, αποτελεί το ερευνητικό πρόγραμμα Ιαπώνων επιστημόνων. Πρόκειται για ένα κινητό σύστημα κυματικής ενέργειας που εξωτερικά το περίβλημα του θυμίζει φάλαινα. Εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της *ταλαντευόμενης στήλης νερού* όπως και τα συστήματα ακτογραμμής.

Πλωτό σύστημα είναι και το κυλινδρικό *Salter Duck*, το οποίο αναπτύχτηκε από ομάδα ερευνητών του Πανεπιστήμιου του Εδιμβούργου. Ο μηχανισμός αυτός σταθεροποιείται γυροσκοπικά και μπορεί να εκμεταλλεύεται τόσο την κινητική όσο και τη δυναμική ενέργεια του κύματος, επιτυγχάνοντας υψηλή απόδοση ενεργειακής απορρόφησης (θεωρητικά πάνω από 90%).

Το 1978 το Πολυτεχνείο του Κόβεντρυ παρουσίασε το σύστημα *Circular SEA Clam* που αποτελούσε μέρος του Βρετανικού Προγράμματος Κυματικής Ενέργειας. Το σύστημα αυτό αποτελείται από μεμονωμένους αερόσακους τοποθετημένους σε σταθερό πλαίσιο και οι οποίοι συμπιέζονται από την κυματική δραστηριότητα με αποτέλεσμα ο εκτοπισμένος αέρας να διοχετεύεται σε στρόβιλο που παράγει ηλεκτρισμό.

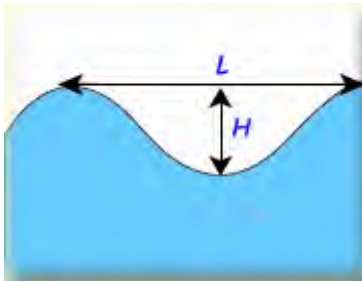
Δοκιμάστηκε υπό κλίμακα 1/15 στη λίμνη του Loch Ness και προβλέψεις έδειξαν πως είχε το χαμηλότερο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από όλους τους μηχανισμούς εκείνης της εποχής.

Σε κυματικό πάρκο στην Πορτογαλία που άνοιξε επίσημα το Σεπτέμβριο του 2008 χρησιμοποιείται το σύστημα *Pelamis*, το οποίο έχει κατασκευαστεί από την εταιρεία Pelamis Wave Power που εδρεύει στη Σκωτία. Το Pelamis είχε τεθεί για πρώτη φορά σε λειτουργία το 2004 στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Θαλάσσιας Ενέργειας στο Όρκνυ της Σκωτίας παρέχοντας ηλεκτρισμό στο βρετανικό δίκτυο. Είναι μια ημιβυθισμένη κατασκευή αποτελούμενη από κυλινδρικά ατσάλινα κομμάτια ενωμένα σε αρθρώσεις. Πρυμνοδετημένο έτσι ώστε να ευθυγραμμίζεται με την κατεύθυνση του ισχυρότερου κύματος, το σύστημα δέχεται τον

κυματισμό σ' όλο του το μήκος (150 μετρά), πραγματοποιώντας μια σπαστή κίνηση στις αρθρώσεις. Υδραυλικά έμβολα σε κάθε άρθρωση αντιδρούν στην κίνηση αυτή και αντλούν υψηλής πίεσης υγρό σε υδραυλικούς κινητήρες. Αυτοί με τη σειρά τους ενεργοποιούν τις ηλεκτρογεννήτριες που τροφοδοτούν ένα υποβρύχιο καλώδιο μεταφοράς ρεύματος αυξάνοντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας το κόστος μετατροπής (5).

3. ΦΥΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ CWAVE

3.1 ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΥΜΑ:



Σχ.1

Μήκος κύματος (L), Ύψος κύματος (H) , Περίοδος κύματος (T)

Θεωρία Airy:

Η θεωρία αυτή ισχύει όταν το ύψος του κύματος **H**, είναι μικρό σε σχέση με το βάθος του νερού **d** και το μήκος του κύματος **L**, δηλαδή όταν **H<d** και **H<<L**. Η θεωρία του Airy καλύπτει όλες τις περιπτώσεις του **d/L**. Κατά την θεωρία αυτή το κύμα αποτελεί ημιτονοειδή ταλάντωση και η στάθμη της επιφάνειας δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \quad (3.1)$$

-όπου (**η**) του ύψος του κύματος τη χρονική στιγμή t, σε οριζόντια απόσταση (x).

Οι γενικές εξισώσεις της ταχύτητας (C) και του μήκους κύματος (L):

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(r) \quad (3.2)$$

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh(r) \quad (3.3)$$

$$r = k \cdot d$$

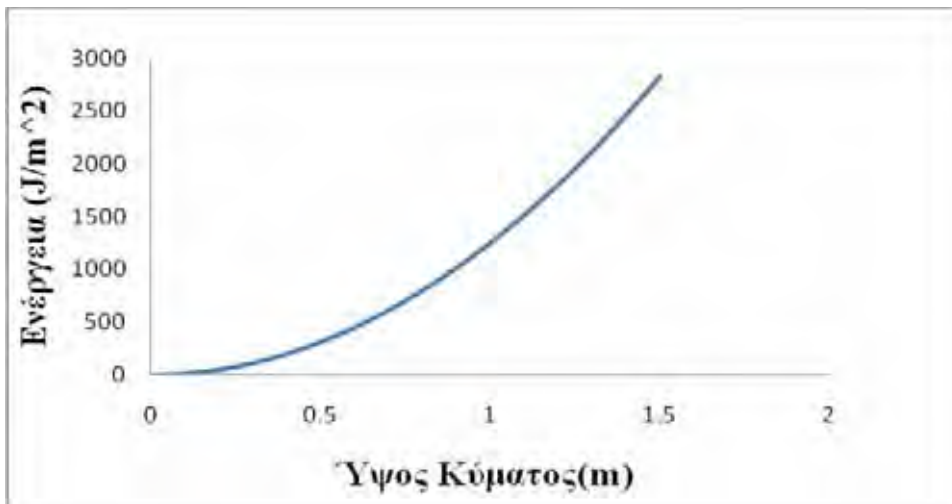
$$k = 2\pi/L$$

Σε μεγάλη απόσταση από την ακτή έχουμε ότι: $d/L > 5$, η τιμή της $\tanh(r)$ τείνει στο kd και για κύματα πλησίον της ακτής έχουμε: $d/L < 5$, η $\tanh(r)$ τείνει στο 1.

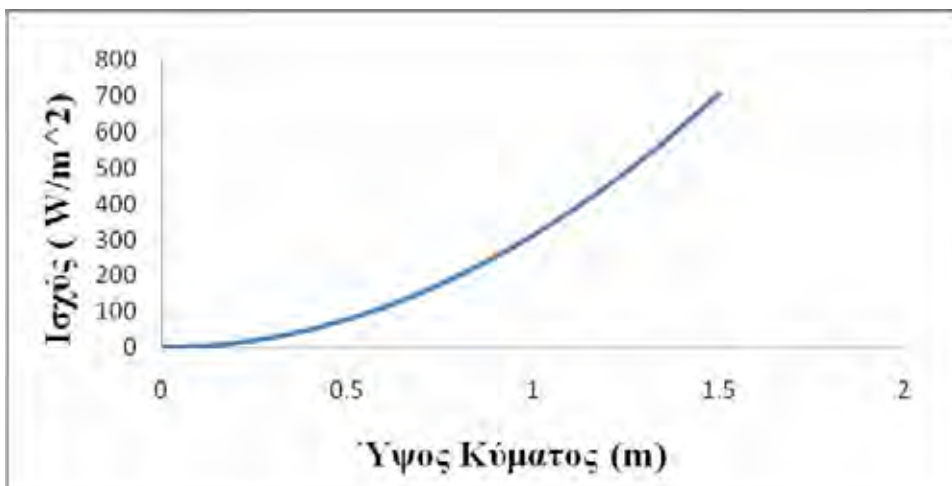
Η κυματική θεωρία του Airy είναι αρκετά ακριβής για μικρές ταχύτητες κύματος σε βαθιά νερά και λιγότερο ακριβής για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των κυμάτων σε ρηχά νερά. Χρησιμοποιείτε περισσότερο λόγο τις μαθηματικές της απλότητας και δεν λαμβάνει υπόψη το ύψος του κύματος για τον καθορισμό τις ταχύτητας του.

Ενέργεια κύματος :

$$E = \frac{\rho g H^2}{8}$$



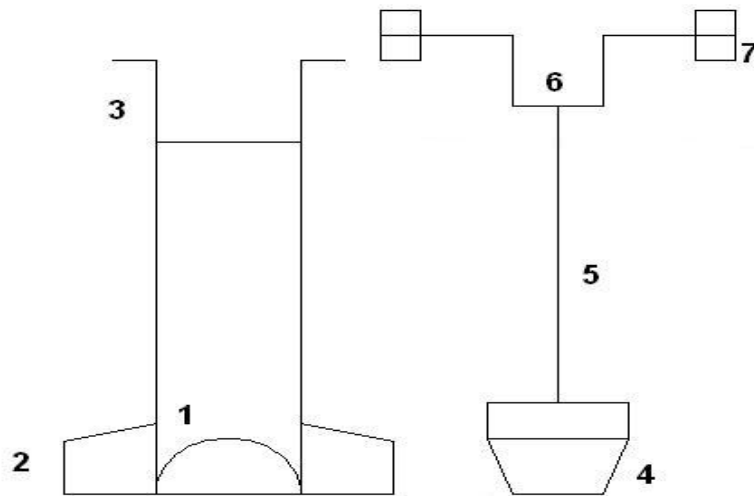
Σχ. 2: Ενέργεια κύματος συναρτήσει του ύψος του



Σχ. 3: Ισχύς κύματος συναρτήσει του ύψους του

Διαιρώντας αυτή την ενέργεια με μια μέση περίοδο κύματος ($T=4s$) μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ που μεταφέρουν τα θαλάσσια κύματα (Σχ.3). Μέρος αυτής τις ισχύος προσπαθεί το σύστημα CWave (Σχ.4) να απορροφήσει και να την μετατρέψει σε ηλεκτρική ισχύ.

3.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ CWAVE:



Σχ. 4: Μηχανισμός CWave

1. Αγωγός μέσα στον οποίο τροχοδρομείται ο πλωτήρας
2. Βάση στήριξης του μηχανισμού
3. Βάσεις στις οποίες στηρίζονται τα κιβώτια ταχυτήτων και οι γεννήτριες
4. Πλωτήρας
5. Ράβδος σύνδεσης πλωτήρα - στροφάλου
6. Στρόφαλος
7. Κιβώτιο ταχυτήτων & Γεννήτρια

Όπως φαίνεται στο (Σχ.4) η ακτίνα περιστροφής του στροφάλου ισούται με τη διαδρομή που εκτελεί το πλωτό πιστόνι(πλωτήρας) μέσα στο σωλήνα. Επομένως είναι εύκολα κατανοητό πως ανάλογα το σχεδιασμό, όπου θα λαμβάνονται υπόψη το βάθος εγκατάστασης και το είδος του κύματος που επικρατεί στην περιοχή αυτή, θα δοθούν και οι κατάλληλες διαστάσεις στην κατασκευή για όσον το δυνατόν περισσότερη απόδοση.

Καθώς ο πλωτήρας επιπλέει στο επίπεδο τις θάλασσας οποιαδήποτε μεταβολή τις στάθμης τον αναγκάζει να ανέβει. Όπως έχουμε προαναφέρει παίρνουμε μια περιστροφή του στροφάλου από κάθε κύμα που περνά, χρησιμοποιώντας ένα κιβώτιο μεταβλητών σχέσεων μπορούμε να πάρουμε τις στροφές που χρειαζόμαστε ώστε ο ρυθμός περιστροφής τις γεννήτριας να παραμένει σταθερός, με αποτέλεσμα την συνεχή και μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Αυτά μπορεί να συμβούν, εφόσον το κύμα έχει ύψος ανάλογο με την απαιτούμενη από το σχεδιασμό διαδρομή του πλωτήρα.

Ανάλογα με το κιβώτιο που θα χρησιμοποιηθεί ο μηχανισμός δύναται να εκμεταλλευτεί και κύματα μικρού ύψους καθώς η άνοδος του πλωτήρα αυτή κάθε αυτή μεταδίδει κίνηση στο κιβώτιο ταχυτήτων ανεξάρτητα αν εκτελεί μια πλήρη περιστροφή ή όχι.

4. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Ο μηχανισμός CWave είναι απλός στη λειτουργία και εύκολα μπορεί να συντηρηθεί.
- Υπάρχει δυνατότητα μετακίνησης σε σημεία όπου τα κύματα είναι ψηλότερα από τη στάθμη της θάλασσας.
- Όλα τα ηλεκτρικά και κρίσιμα μέρη του βρίσκονται πάνω από το επίπεδο της θάλασσας και μπορούμε να έχουμε εύκολη πρόσβαση σε αυτά.
- Συγκρινόμενο με άλλα συστήματα το CWave μετατρέπει απευθείας τη μηχανική ενέργεια του κύματος σε ηλεκτρική. Επομένως οι απώλειες ενέργειας είναι ελάχιστες

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το σύστημα αυτό μπορεί να κατασκευαστεί και να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Στο παρόν στάδιο όμως είναι δύσκολο να προβλέψουμε τα επίπεδα απόδοσης του καθώς βρισκόμαστε ακόμα στο στάδιο της μελέτης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. T. Sampath Kumar/ IWave (Indian Wave energy device)
2. Νόμος και φύση “Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η εναλλακτική τεχνολογία για ένα αειφόρο μέλλον.” (Νοέμβριος 2004)
3. Airy, G. B. (1841), "Tides and waves"
4. Craik, A. D. D. (2004). "The origins of water wave theory"
5. Pelamis Wave Power Ltd

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΚΕΡΔΟΥΣ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΗΛΙΑΚΗΣ ΙΧΝΗΛΑΤΗΣΗΣ ΜΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

A. Τζαχάνης, Ν. Νίνος, Κ. Κιτσάκης

Τμήμα Μηχανολογίας, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Λάρισας, 41110 Λάρισα,
e-mail: tzach@teilar.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ηλιοτροπικοί μηχανισμοί χρησιμοποιούνται σήμερα ευρύτερα με σκοπό την αύξηση της απόδοσης φωτοβολταϊκών πλαισίων που κινούνται σε ένα ή σε δύο άξονες περιστροφής. Οι αυξήσεις αυτές θεωρούνται σημαντικές, ωστόσο τα μεγέθη τους σε σχέση με σταθερούς δέκτες δεν έχουν επιβεβαιωθεί μέχρι σήμερα επίσημα με επαρκείς μετρήσεις στη χώρα μας. Η εργασία αυτή παρουσιάζει τα αποτελέσματα της εφαρμογής ενός μοντέλου αριθμητικής προσομοίωσης ιδανικού ιχνηλάτη της ροής ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες καθαρού ουρανού. Ο κώδικας δημιουργήθηκε για να ολοκληρώνει συγκριτικές αξιολογήσεις μεταξύ σταθερών και ηλιοτροπικών πλαισίων ενός και δύο αξόνων, σε σχέση με την ηλιοφάνεια του τόπου. Διαπιστώθηκε ότι τα μηνιαία ενεργειακά κέρδη που αποφέρει ο διαζονικός δέκτης, έναντι του σταθερού, κυμαίνονται από 19,5% τον Δεκέμβριο έως 24,15% τον Ιούνιο, ενώ η μέση ετήσια αύξηση είναι 23,11%. Η απόδοση του μονοαξονικού δέκτη με αζιμουθιακή περιστροφή και σταθερή κλίση 45°, είναι σε ετήσια βάση κατά 9,5% μικρότερη από αυτή του διαζονικού. Διαπιστώθηκαν τέλος άριστες συγκλίσεις με αποτελέσματα άλλων μοντέλων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο βέλτιστος σχεδιασμός συστημάτων απορρόφησης και μετατροπής της ηλιακής ενέργειας εστιάζεται στην αρχή της μεγιστοποίησης της απόδοσης σε σχέση με το υφιστάμενο ηλιακό δυναμικό, διατηρώντας τη μικρότερη δυνατή δαπάνη για το σκοπό αυτό. Μια γνωστή μέθοδος αύξησης της απόδοσης ηλιακών συλλεκτών ή φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι η ιχνηλάτηση του ήλιου ή ηλιοτροπισμός, δηλαδή η κίνηση της επιφάνειας του δέκτη ακολουθώντας την ηλιακή τροχιά και απορροφώντας έτσι τη μέγιστη προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Οι αυτόματοι μηχανισμοί των διατάξεων παρακολούθησης της πορείας του ήλιου αποτελούν συνήθως σύνθετες κατασκευές, αρκετά ακριβές με, πρακτικά, άγνωστη αξιοπιστία και ακρίβεια. Επίσης, οι αναμενόμενες αυξήσεις της απόδοσης ηλιακών ιχνηλατών που αναφέρονται στη βιβλιογραφία ή ανακοινώνονται από τους κατασκευαστές, διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους. Ως εκ τούτων, η εκτίμηση της αναμενόμενης αύξησης του ενεργειακού κέρδους σε σχέση με τα σταθερά πλαίσια, θεωρείται σημαντική και χρήσιμη για τη λήψη μιας τεχνικής ή και οικονομικής απόφασης.

Υπάρχουν αρκετές λύσεις σχεδιασμού και ανάπτυξης ηλιοτροπικών μηχανισμών είτε για ηλιακούς συλλέκτες είτε για Φ/Β πλαίσια. [3]. Όλα τα μοντέλα βασίζονται στη αρχή ότι η επιφάνεια του δέκτη πρέπει να περιστρέφεται ακολουθώντας τις δύο ηλιακές γωνίες – ηλιακό ύψος και αζιμούθιο, ελαχιστοποιώντας έτσι την γωνία πρόσπτωσης. Οι διαφορετικές κατασκευαστικές λύσεις που δίνονται προδιαγράφουν τις δυνατές επιλογές κατά τη διαδικασία σχεδιασμού του μηχανισμού. Ουσιαστικά, υπάρχου δύο ανεξάρτητες περιστροφικές κινήσεις, οι οποίες ορίζουν τον ιχνηλάτη ενός ή δύο αξόνων. Ο ένας εξ αυτών είναι οριζόντιος επιτρέ-

ποντας την περιστροφή σύμφωνα με το ηλιακό ύψος, ενώ η αζιμουθιακή κίνηση του ηλιακού δίσκου ολοκληρώνεται με περιστροφή γύρω από τον κατακόρυφο άξονα Βορά-Νότου.

Οι ηλιοτροπικοί μηχανισμοί ελέγχονται συνήθως με σερβοκινητήρες, μικροεπεξεργαστές και κατάλληλο λογισμικό [6,7], ενώ οι αυξήσεις απόδοσης σύμφωνα με την βιβλιογραφία, σε σύγκριση με σταθερές μονάδες, κυμαίνονται από 25% μέχρι και 50% [2].

Πειραματικές μετρήσεις κατέγραψαν ότι οι αποδόσεις ηλιοτροπικών πλαισίων έναντι των σταθερών με βέλτιστη τοποθέτηση, εμφανίζουν σημαντικές μεταβολές σε σχέση με το γεωγραφικό πλάτος, ενώ τα ενεργειακά κέρδη του ηλιοτροπικού δέκτη δύο αξόνων ανέρχονται ετησίως σε 39,7% για το Βερολίνο και 41,8% για την Πάτρα [4].

Συγκριτικά μεγέθη απόδοσης μεταξύ σταθερών και ηλιοτροπικών Φ/Β ανακοινώθηκαν πρόσφατα για όλη την Ευρώπη από το Ινστιτούτο Ενέργειας του Ευρωπαϊκού Κέντρου Ερευνών στο Ispra της Ιταλίας [5]. Αναφέρονται, γενικότερα, αυξήσεις από 20-55% με μεγέθη αιχμής στη Βόρεια Σκανδιναβία και με μεγαλύτερα κέρδη στη Νότια Ευρώπη σε σχέση με την Κεντρική. Το Ινστιτούτο προσφέρει τέλος μια διαδικτυακή εφαρμογή για υπολογισμούς απόδοσης σε συνάρτηση του τόπου, σύμφωνα με την οποία στη Λάρισα η ετήσια αύξηση απόδοσης του διαξονικού δέκτη έναντι του σταθερού προβλέπεται σε 21,5%.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας τεχνικής προσομοίωσης που οδηγεί σε πρόβλεψη και συγκριτική αξιολόγηση του ενεργειακού κέρδους σταθερών και ηλιοτροπικών Φ/Β πλαισίων. Η μέθοδος αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας του ΤΕΙ Λάρισας στο πλαίσιο μιας ευρύτερης έρευνας σχετικά με την ενεργειακή αξιολόγηση παθητικών ηλιακών στοιχείων [8,9], έχοντας ως βάση το μαθηματικό μοντέλο καθαρού ουρανού της ASHRAE [1]. Ως εκ τούτου, πρόκειται για προσομοίωση λειτουργίας ιδανικού δέκτη και τα μεγέθη απόδοσης αποτελούν οριακά μέγιστα. Ο κώδικας είναι εφαρμόσιμος σε κάθε περιοχή με γνωστό ηλιακό δυναμικό και παρέχει χρήσιμα στοιχεία προς κάθε ενδιαφερόμενο σε σύγκριση με αυτά που ανακοινώνονται σε διαφημιστικά φυλλάδια των εταιριών διακίνησης ηλιοτροπικών συστημάτων.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Ο αλγόριθμος προσομοίωσης αποτελείται από δύο βασικές διαδικασίες υπολογισμού που περιγράφονται συνοπτικά πιο κάτω:

Η πρώτη περιλαμβάνει το υποπρόγραμμα σταθερού δέκτη, όπου με εισαγωγή σταθερών παραμέτρων (π.χ., ημέρα, θέση δέκτη, κλίση, προσανατολισμός), υπολογίζεται αρχικά σε βρόγχο 24ώρου η ηλιακή γεωμετρία και οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ σχεδιάζεται κατόπιν το προφίλ της προσπίπτουσας ολικής ακτινοβολίας σταθερού δέκτη στη διάρκεια της ηλιοφάνειας της ημέρας. Οι χρονικά μεταβαλλόμενες θετικές τιμές των γωνιών ηλιακού ύψους (β_{sun}) και του αντίστοιχου αζιμούθιου (γ_{sun}), υπολογίζονται και αποθηκεύονται σε αρχείο δεδομένων. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται κατόπιν ως αρχείο εισαγωγής για τον ηλιοτροπικό δέκτη.

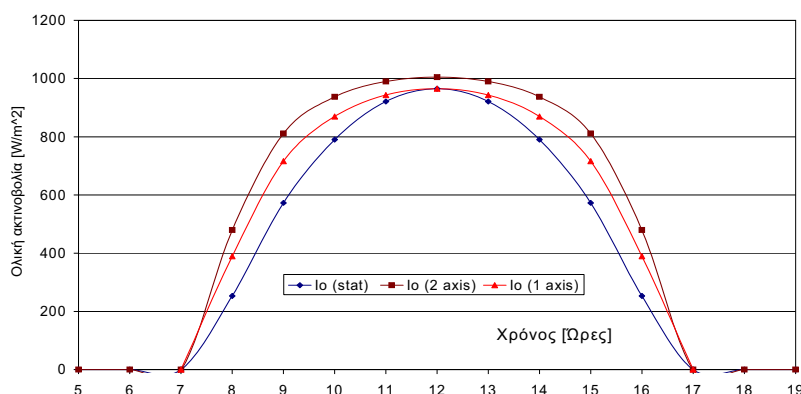
Η δεύτερη διαδικασία περιέχει το υποπρόγραμμα του ηλιοτροπικού δέκτη, όπου οι τιμές του αποθηκευμένου αρχείου δεδομένων με τις ηλιακές γωνίες αντλούνται σε περίοδο 24ώρου βρόγχου και εισάγονται τώρα ως γωνίες κλίσης και προσανατολισμού του δέκτη. Ουσιαστικά ισχύουν οι σχέσεις ηλιακό ύψος (β_{sun}) = κλίση δέκτη και αζιμούθιο (γ_{sun}) = προσανατολισμός δέκτη. Ακολουθεί κατόπιν ο υπολογισμός της ολικής ακτινοβολίας και ο σχεδιασμός της ημερήσιας καμπύλης μεταβολής της ακτινοβολίας που δέχεται το περιστρεφόμενο πλαίσιο, με χρήση των θετικών τιμών του ηλιακού ύψους.

Με ολοκλήρωση της επιφάνειας που περιέχεται στην καμπύλη προκύπτει κατόπιν για κάθε δέκτη η μέση τιμή έντασης η οποία συσχετίζεται τέλος με τις ώρες ηλιοφάνειας και τελικά προκύπτει η ηλιακή ενέργεια που δέχονται οι δέκτες σε ημερήσια, μηνιαία ή ετήσια βάση.

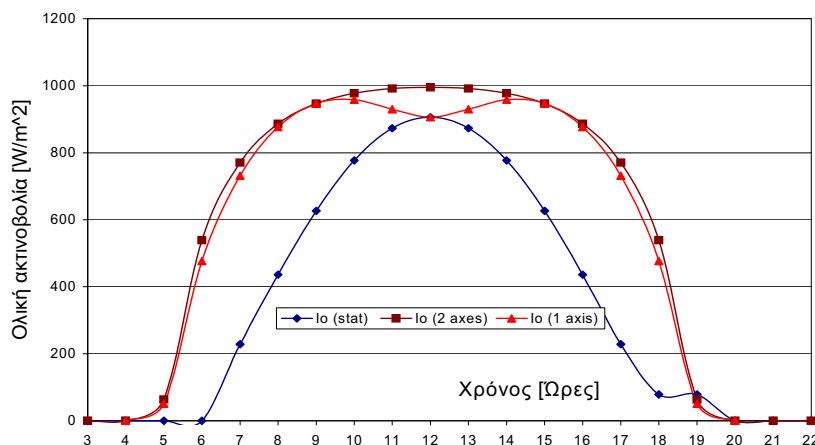
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Εποχικές αυξήσεις ακτινοβολίας ηλιοτροπικού έναντι σταθερού δέκτη.

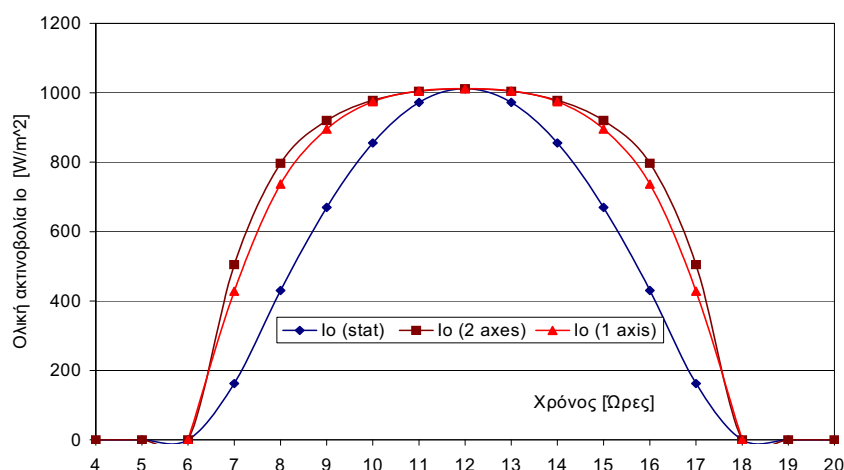
Η προσομοίωση της ημερήσιας ακτινοβολίας που προσπίπτει στις επιφάνειες των ηλιοτροπικών και του σταθερού δέκτη με νότιο προσανατολισμό και κλίση 45° , φαίνονται στις Εικόνες 1,2 και 3. Πρόκειται για τα προφίλ ηλιακής ισχύος καθαρού ουρανού στο γεωγραφικό πλάτος $39,6^\circ$ και αναφέρονται στην 21^η ημέρα του κάθε ενός από τους τρεις αντιπροσωπευτικούς μήνες. Διακρίνονται οι εποχικές διαφορές της προσπίπτουσας έντασης σε μέγεθος και διάρκεια, μεταξύ των τριών περιπτώσεων.



Εικόνα 1. Ημερήσια μεταβολή προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε σταθερό και σε ηλιοτροπικούς δέκτες (21^η Ιανουαρίου).

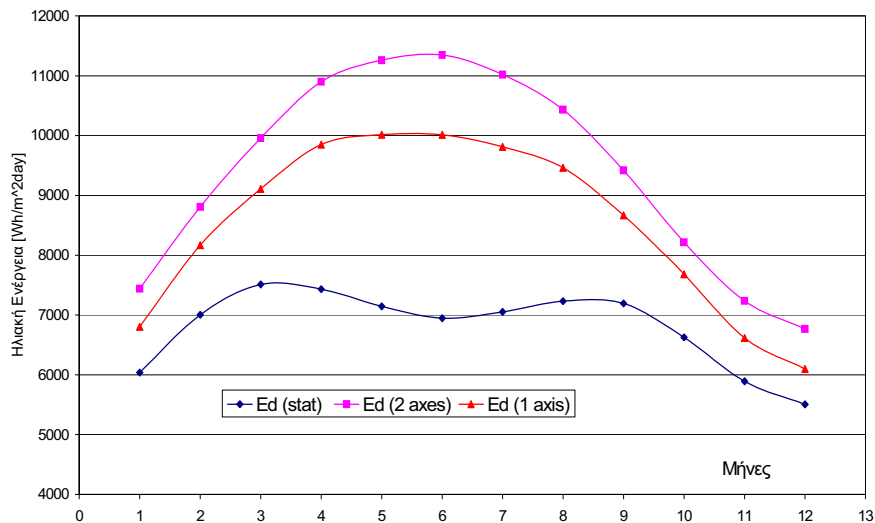


Εικόνα 1. Ημερήσια μεταβολή προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε σταθερό και σε ηλιοτροπικούς δέκτες (21^η Ιουνίου).



Εικόνα 3. Ημερήσια μεταβολή προσπίπτουσας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε σταθερό και σε ηλιοτροπικούς δέκτες (21^η Σεπτεμβρίου).

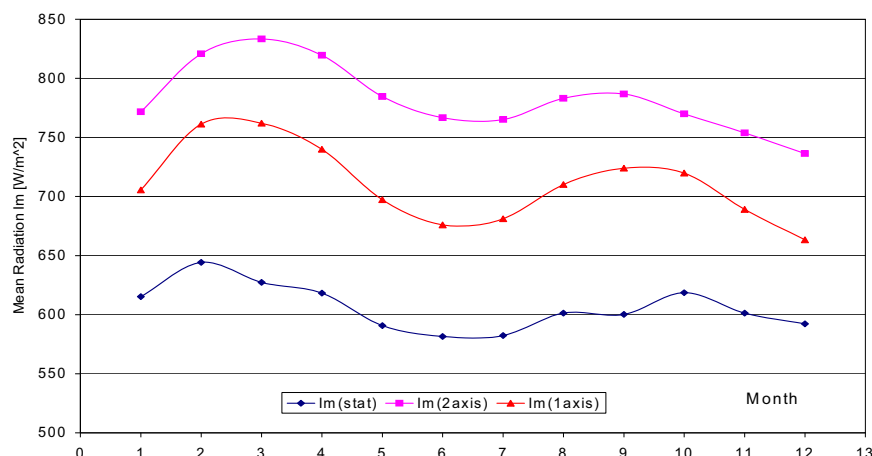
Είναι εμφανές ότι οι διαφορές ηλιακής έντασης ανάμεσα στους τρεις δέκτες μειώνονται σημαντικά το χειμώνα, ενώ ο αξιμουθιακός δέκτης βρίσκεται πολύ κοντά στα μεγέθη του διαζονικού καθ' όλο το έτος. Με ολοκλήρωση της επιφάνειας που περικλείνει κάθε καμπύλη ακτινοβολίας προκύπτει η ημερήσια ενέργεια που δέχονται οι δέκτες την 21^η ημέρα κάθε μήνα σε Wh/m²day (Εικόνα 4). Η μέση ένταση ημέρας κάθε δέκτη, I_m (W/m²), θα προκύψει κατόπιν ως γινόμενο της ημερήσιας ενέργειας με τις ώρες ηλιοφάνειας που του αντιστοιχούν.



Εικόνα 4. Μεταβολή ημερήσιας απολαβής ηλιακής ενέργειας

Η Εικόνα 4 δείχνει ότι κατά την ετήσια μεταβολή της ημερήσιας ενεργειακής απολαβής ο σταθερός δέκτης υπολείπεται του διαζονικού κατά μέγιστο 38.8% τον Ιούνιο και ελάχιστο 18.6% τον Δεκέμβριο. Σε ετήσια βάση η διαφορά τους βρίσκεται σε ποσοστό 27.7%. Ο αξιμουθιακός δέκτης υπολείπεται του διαζονικού σε ποσοστά από 8,5% τον Ιανουάριο έως 11,8% τον Ιούνιο. Τα ποσοστά αυτά δείχνουν ότι ο δέκτης δύο αξόνων αποδίδει σε ετήσια βάση μόνο 10% περισσότερο σε σύγκριση με τον αξιμουθιακό. Η διαπιστώσεις αυτές είναι σημαντικές διότι αφενός θέτουν υπό κρίση την επιλογή των δύο αξόνων ως την οικονομοτεχνικά βέλτιστη και αφετέρου αντικρούουν τις απόψεις ότι ο διαζονικός δέκτης αποδίδει πε-

ρισσότερο από 40% έναντι του σταθερού. Ωστόσο, τα συγκριτικά αυτά αποτελέσματα προέκυψαν από ιδανικές ώρες ηλιοφάνειας καθαρού ουρανού κατά την 21^η ημέρα, αντιπροσωπευτική για όλο το μήνα. Μια ακριβέστερη προσέγγιση του φυσικού φαινομένου θεωρούμε ότι αποτελεί ο καθορισμός της μέσης ηλιακής έντασης I_m [W/m^2], αντιπροσωπευτικής για κάθε μήνα, ικανής να συσχετιστεί με τις πραγματικές ώρες ηλιοφάνειας μιας περιοχής ώστε να εκτιμηθεί η αναμενόμενη απολαβή ενέργειας (Εικόνα 5).



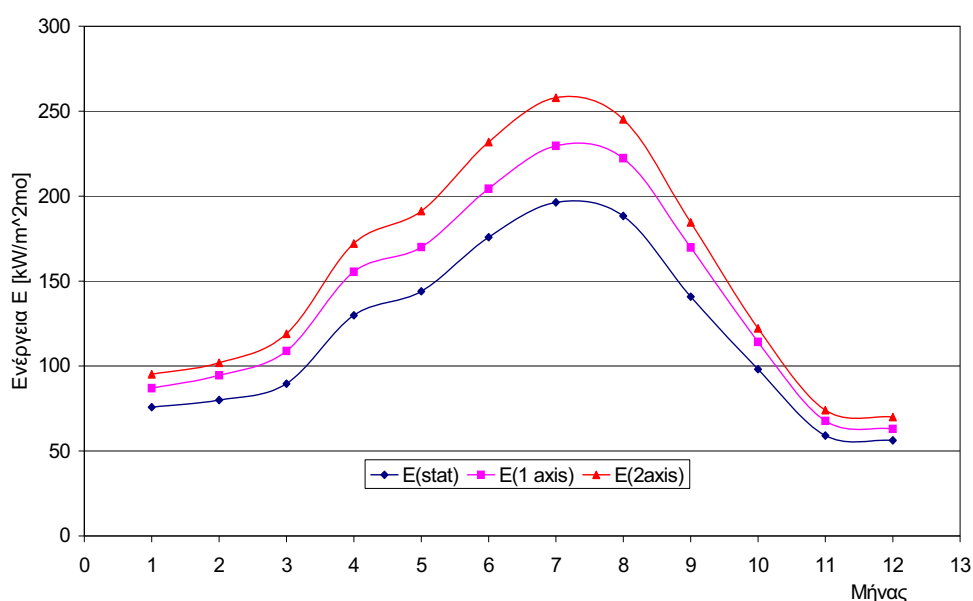
Εικόνα 5. Μέση ένταση ακτινοβολίας I_m (W/m^2) που προσπίπτει την 21^η ημέρα κάθε μήνα σε σταθερό και σε ηλιοτροπικούς δέκτες.

Σύμφωνα με την Εικόνα 5, η μέση ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας του διαξονικού δέκτη έναντι του σταθερού, είναι κατά μέγιστο 24,7% τον Μάιο και κατ' ελάχιστο 19,6% μεγαλύτερη, το Δεκέμβριο. Ο δέκτης ενός άξονα με αζιμουθιακή κίνηση υπολείπεται του διαξονικού από 6,5% τον Οκτώβριο έως 11,8% τον Ιούνιο.

3.2. Η αύξηση της ενεργειακής απολαβής.

Με βάση τα αποτελέσματα της Εικόνας 5, τα μεγέθη της μηνιαίας ή και ετήσιας ενεργειακής αύξησης των ηλιοτροπικών πλαισίων έναντι του σταθερού, μπορούν να προκύψουν αν λάβουμε υπόψη τις πραγματικές συνθήκες ηλιοφάνειας της περιοχής. Ο Πίνακας 1 περιέχει, για την τελευταία δεκαετία, την κατά μήνα διάρκεια ηλιοφάνειας σε ώρες. Στην Εικόνα 6 και στον Πίνακα 2 διακρίνονται οι ετήσιες διακυμάνσεις ενεργειακής απολαβής ($kWh/m^2/month$), κάθε δέκτη, όπως προκύπτουν από την προσομοιωμένη τιμή της μέσης έντασης και τις μέσες κατά μήνα ώρες ηλιοφάνειας της δεκαετίας.

Πίνακας 1. Ώρες ηλιοφάνειας στη Λάρισα σε απόλυτα μέγιστες, μέσες και απόλυτα ελάχιστες κατά τη δεκαετία 1991-2000.												
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
Abs. Max	172,8	165,9	255,1	255,1	300	360	397,1	350	291	211	140	141
Mean	123,2	124,1	142,8	210	244	302,3	337	313,1	234	158	98,2	95
Abs.Min.	73,6	56	72,3	155,3	187	244,7	287,3	257,3	205	115	39,5	54,2



Εικόνα 6. Ενεργειακά κέρδη σταθερού και ηλιοτροπικών πλαισίων μονού και διπλού άξονα σε kWh/m²mo, σύμφωνα με την κατά μήνα μέση ηλιοφάνεια της δεκαετίας.

Πίνακας 2. Ενεργειακά κέρδη [kWh/m ² mo], σταθερού δέκτη και ηλιοτροπικών πλαισίων			
	Σταθερός δέκτης	Ιχνηλάτης ενός άξονα	Ιχνηλάτης δύο αξόνων
Ιανουάριος	75,805	86,917	95,077
Φεβρουάριος	79,945	94,465	101,863
Μάρτιος	89,578	108,813	119,002
Απρίλιος	129,822	155,379	172,095
Μάιος	143,978	169,932	191,195
Ιούνιος	175,787	204,354	231,773
Ιούλιος	196,269	229,564	257,872
Αύγουστος	188,267	222,332	245,189
Σεπτέμβριος	140,747	169,754	184,498
Οκτώβριος	98,110	114,160	122,122
Νοέμβριος	59,048	67,669	74,023
Δεκέμβριος	56,259	63,004	69,957
ΣΥΝΟΛΟ	1433,615	1686,343	1864,667

Σύμφωνα με την Εικόνα 6 και τον Πίνακα 2 διακρίνουμε ότι ο διαξονικός δέκτης υπερέχει έναντι του σταθερού κατά μέγιστο 24,15% τον Ιούνιο και 19,5% κατ' ελάχιστο το Δεκέμβριο, ενώ η μέση ετήσια αύξηση υπολογίζεται σε 23,11%. Οι αποδόσεις του αζιμουθιακού ηλιακού ιχνηλάτη υπολείπονται από αυτές του διαξονικού σε ποσοστά που κυμαίνονται από 8,58% τον Ιανουάριο μέχρι και 11,8 τον Ιούνιο. Σε ετήσια βάση η διαφορά τους βρίσκεται σε ποσοστό 9,56%.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Δημιουργήθηκε ένα αριθμητικό μοντέλο ικανό να προσομοιώνει μεταβατικά ηλιακά μεγέθη και να προβλέπει τις μεταβολές απόδοσης σε ηλιοτροπικούς και σταθερούς ηλιακούς δέκτες. Ολοκληρώθηκε μια συγκριτική αξιολόγηση σχετικά με την απόδοση του ηλιοτροπικού δέκτη ενός και δύο αξόνων έναντι του σταθερού με κλίση 45° και νότιο προσανατολισμό. Διαπιστώθηκε ότι οι ημερήσιες αυξήσεις προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας που αποδίδει ο δέκτης δύο αξόνων έναντι του σταθερού είναι 38,8% κατά μέγιστο και 18,6% κατ' ελάχιστο. Σε ετήσια βάση η αύξηση βρίσκεται στο 27,6%. Ο ιχνηλάτης μονού άξονα με αζιμουθιακή κίνηση αποφέρει αποδόσεις σε ποσοστά 88,2% έως 91,5% έναντι του διαξονικού.

Με πραγματικές συνθήκες ηλιοφάνειας της περιοχής υπολογίστηκε η αύξηση σε ηλιακή ενέργεια που παρέχουν οι δέκτες κατά μήνα και έτος. Η τελική αυτή προσέγγιση έδειξε ότι ο δέκτης δύο αξόνων παρέχει αυξήσεις από 19,5% έως 24,15% έναντι του σταθερού, με μέση ετήσια αύξηση 23,11%. Ο δε αζιμουθιακός δέκτης παρέχει ετήσια αύξηση σε ποσοστό 90,5% έναντι του διαξονικού. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με το Ευρωπαϊκό Κέντρο Ερευνών έδειξε τέλος άριστη σύγκλιση, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία του μοντέλου προσομοίωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ASHRAE, Handbook of Fundamentals (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, N.Y., 1993).
2. J.A. Duffie, W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes (Second Edition, A. Willey Interscience Publication, N.Y., 1991).
3. M. Comsit, I. Visa, A. Duta, "Using Tracking Systems for improving the Efficiency of Solar Collectors", Proc. of the International Conference on Energy and Environment, Bucharest Romania, 20-22 October 2005.
4. V. Dafopoulos, "Optimale Nutzung photovoltaischer Energiewandler-Langzeitmessung als Datenbasis zur Rechenimulation", (Ph.D. Thesis, Fachbereich Elektrotechnik, D83, T.U. Berlin, 1994).
5. Huld T., Šúri M., Dunlop E.D., 2008, "Comparison of Potential Solar Electricity Output from Fixed-Inclined and Two-Axis Tracking Photovoltaic Modules in Europe", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 16, 47-59.
6. S. Kaplanis, G. Barakos, I. Georgoudakis, A. Katsaitis, "Design and Construction of a Solar Tracking System (S.T.S.) with two Rotation Axes", Proc. VIIIth National Symposium with International Participation on Computer aided Design of mechanical Systems PRASIC'02, Brasov Romania, Nov. 7-8 2002, Vol. III, 399-404.
7. D. Marinescu, C. Marinescu, "Software Sun Tracker Control for Romania", Proc. of the International Conference on Sustainable Energy, Brasov Romania, July 7-9 2005, S. 2, 1-6.
8. A. Tzachanis, C. Sdravopoulou, "Calculation of the Total Solar Irradiation using Computer Simulation", Proc. 2nd IASTED Conf. on Power and Energy Systems (Euro PES), Crete, Greece, June 25-28 2002, Vol. Renewable Energy and Technologies I, 382-387.
9. A. Tzachanis, P. Chassiotis, K. Kitsakis, "Solar Heat Flow. A Simulation Model validated through Test-Cell Experiments", Proc. 15th IASTED Conf. on Applied Simulation and Modelling, Rhodes, Greece, June 26-28 2006, Vol. Power and Energy Systems, 302-309.
10. N. Νίνοϋ, "Ανάπτυξη συστήματος οδήγησης ηλιακού ιχνηλάτη δύο αξόνων", Πτυχιακή εργασία, ΤΕΙ Λάρισας, Τμήμα Μηχανολογίας, 2008.

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΑΓΟΥ ΑΠΟ ΤΟΝ ΗΛΙΟ ΧΩΡΙΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

Π. Ι. Αξάπουλος, Μ. Π. Θεοδωρίδης

ΤΕΙ Αθηνών – Τμήμα Ενεργειακής Τεχνολογίας
Αγ. Σπυρίδωνα και Παλληκαρίδη – 122 10 Αιγάλεω, email : pax@teiath.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Τμήματος Ενεργειακής Τεχνολογίας του ΤΕΙ Αθηνών σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και αξιολογήθηκε πειραματικά, ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα παραγωγής πάγου από τον ήλιο χωρίς συσσωρευτές. Το σύστημα αποτελείται κυρίως από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, τη μονάδα ελέγχου, το ψυκτικό τμήμα και την αποθήκη πάγου. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματά του είναι ότι δεν χρησιμοποιεί συσσωρευτές για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συσσωρευτές μολύβδου – οξέος που χρησιμοποιούνται συνήθως στις εφαρμογές των φωτοβολταϊκών συστημάτων, έχουν αρκετά περιβαλλοντικά, οικονομικά και τεχνικά προβλήματα που εντείνονται ακόμα περισσότερο όταν χρησιμοποιούνται σε απομακρυσμένες περιοχές. Η πρωτότυπη μονάδα ελέγχου που διαθέτει το σύστημα του επιτρέπει να μεγιστοποιεί την διαθέσιμη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά και να βελτιστοποιεί την διαχείρισή της. Η αποθήκη πάγου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συντήρηση και κατάψυξη τροφίμων και φαρμάκων, καθώς και για πρόψυξη γάλακτος. Μια σειρά από πειραματικές μετρήσεις έδωσαν τις επιδόσεις του συστήματος, για ημέρες με διαφορετική ολική ηλιακή ενέργεια στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή πάγου από τον ήλιο, είναι μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή με κοινωνικά και οικονομικά οφέλη για απομακρυσμένες και υπό ανάπτυξη περιοχές, αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διατήρηση αγροτικών προϊόντων, τροφίμων, φαρμάκων και εμβολίων. Δυο κυρίως τρόποι παραγωγής πάγου από τον ήλιο υπάρχουν σε εφαρμογή. Ο πρώτος είναι με χρήση ηλιακής θερμότητας [1], [2] και ο δεύτερος με ηλιακό ηλεκτρισμό χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκό σύστημα [3], [4].

Οι εφαρμογές όμως που βασίζονται σε φ/β σύστημα, χρησιμοποιούν σχεδόν όλες, συσσωρευτές για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Στη περίπτωση όμως αυτή απαιτούν φορτιστή [5], [6] και επιπλέον αντιστροφέα όταν το φορτίο είναι εναλλασσόμενου ρεύματος [7], [8].

Οι συσσωρευτές όμως μολύβδου – οξέος που χρησιμοποιούνται συνήθως στις εφαρμογές των φωτοβολταϊκών συστημάτων, έχουν αρκετά προβλήματα [9] που εντείνονται ακόμα περισσότερο όταν χρησιμοποιούνται σε απομακρυσμένες περιοχές. Τα προβλήματα αυτά είναι περιβαλλοντικά, οικονομικά και τεχνικά.

(i) *Περιβαλλοντικά* : Περιορισμένη διάρκεια ζωής.

Μετά τη χρήση τους θα πρέπει να παραδίδονται για ανακύκλωση διότι η ελεύθερη απόθεσή τους στην ύπαιθρο επιφέρει σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα λόγω του μολύβδου και του οξέος που περιέχουν. Η περιορισμένη διάρκεια ζωής τους μπορεί να μειωθεί ξαφνικά λόγω κάποιας αιτίας και να χάσουν την ικανότητά τους για φόρτιση και εκφόρτιση.

(ii) *Οικονομικά*: Μεγάλο κόστος αντικατάστασης.

Η ποσοστιαία συμμετοχή του κόστους των συσσωρευτών στο συνολικό προϋπολογισμό του συστήματος είναι αρκετά σημαντική και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως, είδος συστήματος, περιοχή εγκατάστασης, ημέρες αυτονομίας, κ.α. Σε απομακρυσμένες περιοχές η αντικατάσταση αυτή θα επιβαρυνθεί με υψηλά έξοδα μεταφοράς λόγω απόστασης και βάρους, που θα δημιουργήσουν πρόβλημα σε χρήστες με χαμηλό εισόδημα.

(iii) Τεχνικά :

Περιοδικός έλεγχος και συντήρηση : Αυτά πρέπει να γίνονται από εκπαιδευμένα άτομα και η μη εφαρμογή τους θα οδηγήσει στη γρήγορη καταστροφή των συσσωρευτών. Σε απομακρυσμένες περιοχές η έλλειψη κατάλληλων ατόμων είναι ένα πρόβλημα.

Μειωμένη απόδοση : Στα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζονται ωρισμένες ιδιαιτερότητες σχετικά με τη φόρτιση και εκφόρτιση των συσσωρευτών όπως ο περιορισμένος χρόνος φόρτισης λόγω εξαρτήσεώς του από τις ώρες ηλιοφάνειας και ο ακανόνιστος κύκλος φόρτισης εκφόρτισης. Αυτά έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία προβλημάτων στους συσσωρευτές που είναι η στρωμάτωση του διαλύμματος και η θείωση και τελικά η μείωση της απόδοσής τους.

Στο προτεινόμενο σύστημα δεν χρησιμοποιούνται συσσωρευτές και η αποθήκευση ενέργειας γίνεται στον πάγο, ο οποίος απαιτεί μικρότερο μέγεθος κατά 14-21 % από αποθήκευση παγωμένου νερού και κατά 40-48 % μικρότερο μέγεθος από εύηκτα άλατα.

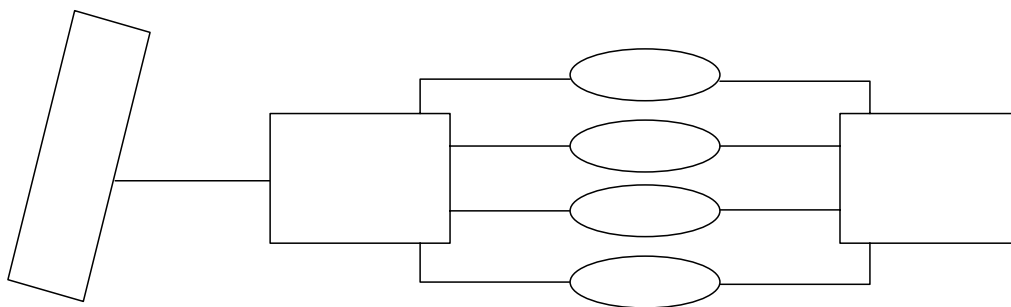
Στο ηλιακό σύστημα παραγωγής πάγου που αναπτύχθηκε, δεν χρησιμοποιήθηκαν συσσωρευτές, αλλά τα φ/β τροφοδοτούν τους συμπίεστρες μέσω μιας μονάδας ελέγχου, η οποία είχε τον πλήρη έλεγχο του συστήματος. Με την μονάδα ελέγχου επιτυγχάνεται η πλήρης εκμετάλλευση της ηλεκτρικής ενέργειας από τα φ/β, αφού διαθέτει σύστημα για το σημείο μέγιστης ισχύος και για την άμεση έναρξη των συμπιεστών, εφόσον η ηλιακή ακτινοβολία είναι ικανοποιητική. Αυτό το τελευταίο έχει σαν αποτέλεσμα τη συνεχή αποδοτική λειτουργία των συμπιεστών και κατά συνέπεια την αποφυγή επαναλαμβανόμενων κύκλων έναρξης – παύσης που θα είχαν σαν αποτέλεσμα ενεργειακό και μηχανικό κόστος.

Οι συμπίεστρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι μεταβλητών στροφών, λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν συγκριτικά με εκείνους των σταθερών στροφών [10].

Αντικείμενο της εργασίας είναι η παρουσίαση του φωτοβολταϊκού συστήματος παραγωγής πάγου χωρίς συσσωρευτές και οι πειραματικές του επιδόσεις για ημέρες με διαφορετική ολική ηλιακή ενέργεια.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το σύστημα παραγωγής πάγου από τον ήλιο αποτελείται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, τη μονάδα ελέγχου, το ψυκτικό τμήμα και την αποθήκη πάγου (σχ. 1). Τα φ/β πλαίσια είναι τοποθετημένα σε νότιο προσανατολισμό, στην οροφή του εργαστηρίου των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Τμήματος Ενεργειακής Τεχνολογίας του ΤΕΙ Αθηνών. Τα φ/β πλαίσια είναι μονοκρυσταλλικού πυριτίου, με συνολική ισχύ 440 Wp.



Σχήμα 1. Σχηματική παρουσίαση του συστήματος

Το ψυκτικό τμήμα διαθέτει τέσσερις συμπιεστές συνεχούς ρεύματος και μεταβλητών στροφών. Κάθε συμπιεστής είναι συνδεδεμένος υδραυλικά με εξατμιστή και συμπυκνωτή ενώ ο έλεγχος όλων των συμπιεστών γίνεται από ένα ελεγκτή ο οποίος έχει κατασκευασθεί εξ'ολοκλήρου στο εργαστήριο ΑΠΕ. Το πρωϊ ανάλογα με το επίπεδο της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας ο ελεγκτής δίνει εντολή στον πρώτο συμπιεστή να ξεκινήσει στις χαμηλότερες στροφές και στη συνέχεια εφ'όσον αυξηθεί η ακτινοβολία αυξάνεται και ο αριθμός στροφών. Όταν ο συμπιεστής φθάσει τον μέγιστο αριθμό στροφών και εφ'όσον υπάρχει κατάλληλη ακτινοβολία τότε ελαττώνονται οι στροφές του πρώτου, προκειμένου να ξεκινήσει και ο δεύτερος. Έτσι και οι δυο εργάζονται στις ίδιες στροφές, ενώ μια περαιτέρω αύξηση της ακτινοβολίας θα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των στροφών και των δυο συμπιεστών μέχρι να φθάσουν τον μέγιστο αριθμό τους. Με την περαιτέρω αύξηση της ακτινοβολίας ο ελεγκτής θα δώσει εντολή και στον τρίτο συμπιεστή να ξεκινήσει κ.ο.κ. Η μείωση της ακτινοβολίας θα έχει σαν αποτέλεσμα την αντίστροφη διαδικασία που αναφέρθηκε προηγουμένως. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται πλήρης εκμετάλλευση της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας όχι μόνο γιατί υπάρχει σταδιακή αύξηση της ισχύος του συστήματος αλλά και γιατί δεν μεσολαβεί μεγάλος χρόνος προσαρμογής του συστήματος σε κάθε αυξομείωση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται καλύτερος COP των συμπιεστών, αφού σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, η ελάττωση του αριθμού των στροφών τους, για σταθερή θερμοκρασία εξατμίστης, συνεπάγεται αυξημένο COP. Έτσι, δεδομένου ότι στην περίπτωση μας η θερμοκρασία εξατμίστης θεωρείται σταθερή, είναι καλύτερο οι συμπιεστές να εργάζονται στις ίδιες στροφές παρά να υπάρχουν ορισμένοι που θα εργάζονται στο μέγιστο αριθμό στροφών. Εκτός από τις παραπάνω λειτουργίες ο ελεγκτής, μεγιστοποιεί σε κάθε χρονική στιγμή την ηλεκτρική ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά και επιπλέον δεν καταναλώνει παρά ελάχιστη ηλεκτρική ενέργεια από το σύστημα.

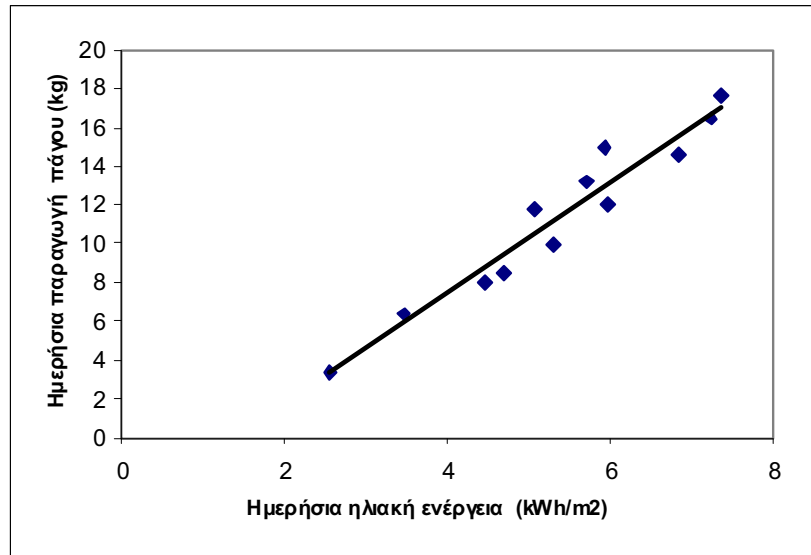
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Ένα αυτόματο σύστημα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων καταγράφει τις τιμές διαφόρων μεγεθών κάθε πρώτο λεπτό, τις επεξεργάζεται και αποθηκεύει τις μέσες τιμές τους κάθε δύο πρώτα λεπτά. Τα μετρούμενα μεγέθη είναι : ολική ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο των φ/β, θερμοκρασία περιβάλλοντος, θερμοκρασία στην πλάτη των φ/β, θερμοκρασίες σε διάφορα σημεία του ψυκτικού κυκλώματος και μέσα στη δεξαμενή αποθήκευσης του πάγου, χαμηλή και υψηλή πίεση στο ψυκτικό κύκλωμα, ταχύτητα ανέμου, τάση και ρεύμα φ/β. Νωρίς το πρωϊ της ημέρας που πρόκειται να μελετηθεί το σύστημα, το νερό της δεξαμενής έχει προετοιμασθεί να είναι στη θερμοκρασία 0°C , έτσι ώστε το βράδυ αμέσως μετά το ηλιοβασίλεμα να ζυγισθεί ο πάγος που δημιουργήθηκε στη διάρκεια αυτής της ημέρας. Οι πειραματικές μετρήσεις έχουν γίνει για μια σειρά από ημέρες με διαφορετικό προφίλ ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, προκειμένου να αξιολογήσουμε το σύστημα.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

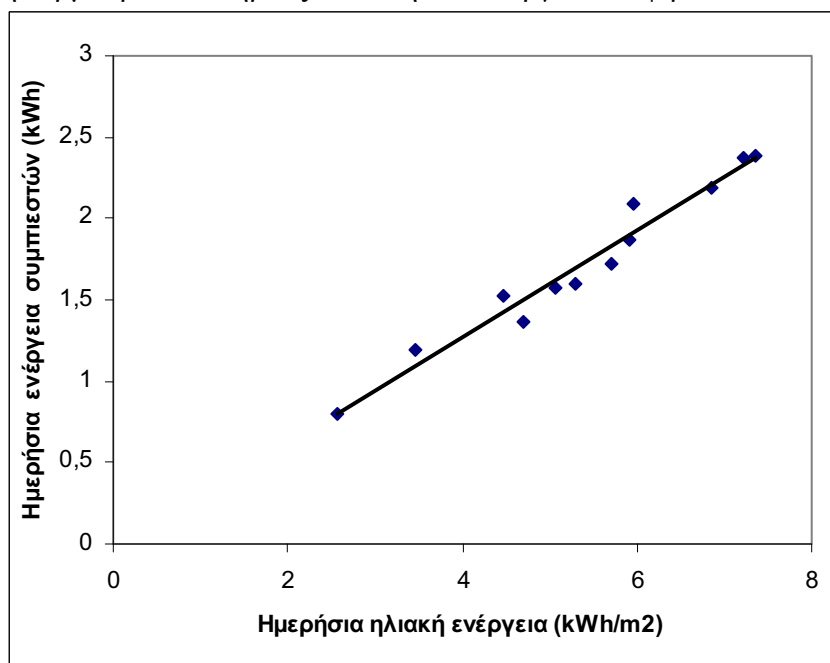
Στο σχ. 2, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για ωρισμένες ημέρες με διαφορετικές τιμές κλιματικών δεδομένων. Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι υπάρχει μια γραμμική εξάρτηση της ημερήσιας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας και της ποσότητας του παραγόμενου πάγου. Το διάγραμμα αυτό καλύπτει μια περίοδο με ημέρες που έχουν πολύ χαμηλή ημερήσια ηλιακή ενέργεια (2.5 kWh/m^2) μέχρι και ημέρες με πολύ υψηλή ημερήσια ηλιακή ενέργεια (7.5 kWh/m^2). Οι μικρές αποκλίσεις των πειραματικών σημείων που παρουσιάζονται για παραπλήσιες τιμές ηλιακής ενέργειας, είναι αναμενόμενες και οφείλονται στο γεγονός ότι ακόμα και όταν η ημερήσια ηλιακή ενέργεια είναι ίδια, το προφίλ της

ηλιακής ακτινοβολίας στην διάρκεια της ημέρας μπορεί να είναι διαφορετικό, πράγμα που επηρεάζει τον τρόπο λειτουργίας των συμπιεστών. Επίσης διαφορετική είναι και η θερμοκρασία περιβάλλοντος η οποία επηρεάζει τη λειτουργία των φ/β, τη λειτουργία του συμπιεστή και τις θερμικές απώλειες της δεξαμενής.



Σχήμα 2. Ημερήσια παραγωγή πάγου για διαφορετικές τιμές ημερήσιας ηλιακής ενέργειας.

Στο σχ. 3, παρουσιάζεται η απορροφούμενη ενέργεια από τους συμπιεστές για ημέρες με διαφορετικές τιμές ολικής ηλιακής ενέργειας. Ετσι όπως φαίνεται από το διάγραμμα τα δυο αυτά μεγέθη τα συνδέει μια γραμμική σχέση. Οι παρουσιαζόμενες και εδώ αποκλίσεις των πειραματικών σημείων εξηγούνται από το λόγο ότι η λειτουργία των συμπιεστών επηρεάζεται από το προφίλ της ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και από την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η τελευταία αυτή θερμοκρασία επηρεάζει και την λειτουργία των φ/β.



Σχήμα 3. Ημερήσια απορροφούμενη ενέργεια από τους συμπιεστές για διαφορετικές τιμές ημερήσιας ηλιακής ενέργειας.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το ηλιακό σύστημα παραγωγής πάγου που αναπτύχθηκε, δεν χρησιμοποιεί συσσωρευτές και κατά συνέπεια μπορεί να θεωρηθεί φιλικό με το περιβάλλον. Είναι εντελώς αυτόνομο και δεν απαιτεί συντήρηση, έτσι ώστε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε απομακρυσμένες περιοχές ή περιοχές που δεν υπάρχει διαθέσιμο ηλεκτρικό δίκτυο. Η αποθήκη πάγου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συντήρηση και κατάψυξη τροφίμων, φαρμάκων και εμβολίων, καθώς και για πρόψυξη γάλακτος.

Η μονάδα ελέγχου που κατασκευάστηκε γι' αυτό το σκοπό, λειτουργεί αξιόπιστα παρέχοντας τη δυνατότητα στο σύστημα να εκμεταλλεύεται πλήρως όλη τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια. Επίσης μεγιστοποιεί αποδοτικά την ισχύ των φ/β, κάνει άμεση εκκίνηση των συμπιεστών και γενικά διαχειρίζεται αποτελεσματικά την ισχύ του συστήματος.

Οι πειραματικές μετρήσεις δείχνουν ότι το σύστημα λειτουργεί παραγωγικά ακόμη και σε ημέρες με χαμηλή συνολικά ηλιακή ενέργεια, παρέχοντας ικανοποιητική ποσότητα πάγου. Συμπερασματικά, το σύστημα παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα και μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μια ηλιακή ψυκτική συσκευή πολλαπλών χρήσεων, για απομονωμένες περιοχές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Boubakri, A., 2006. Performance of an adsorptive solar ice maker operating with a single double function heat exchanger (evaporator/condenser). *Renewable Energy* 31, 1799-1812.
- [2] Li, M., Huang, H. B., Wang, R. Z., Wang, L. L., Cai, W. D., Yang, W. M., 2004. Experimental study on adsorbent of activated carbon with refrigerant of methanol and ethanol for solar ice maker. *Renewable Energy* 29, 2235-2244.
- [3] El Tom, O.M. M., Omer, S.A., Taha A.Z., Sayigh, A.A.M., 1991. Performance of a photovoltaic solar refrigerator in tropical climate conditions. *Renewable Energy* 1, 199-205.
- [4] Toure, S., Fassinou, W.F., 1999. Cold storage and autonomy in a three compartments photovoltaic solar refrigerator: experimental and thermodynamic study. *Renewable Energy* 17, 587-602.
- [5] Taha, A.Z., 1995. The oversizing method of estimation in PV systems. *Renewable Energy* 6, 487-490.
- [6] Kaplanis, S., Papanastasiou, S., 2006. The study and performance of a modified conventional refrigerator to serve as a PV powered one. *Renewable Energy* 31, 771-780.
- [7] Kattakayam, T.A., Srinivasan, K., 1998. Uninterrupted power supply for autonomous small refrigerators. *Energy Conversion and Management* 39, 21-26.
- [8] Kattakayam, T.A., Srinivasan, K., 2000. Thermal performance characterization of a photovoltaic driven domestic refrigerator. *International Journal of Refrigeration* 23, 190-196.
- [9] Spiers, D.J., Rasinkoski, A.A., 1996. Limits to battery lifetime in photovoltaic applications. *Solar Energy* 58, 147-154.
- [10] Li, Y.W., Wang, R.Z., Wu, J.Y., Xu, Y.X., 2007. Experimental performance analysis and optimization of a direct expansion solar-assisted heat pump water heater. *Energy* 32, 1361-1374.

ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ Σ' ΕΝΑ ΤΟΠΟ

***Φ. Μαυροματάκης¹, Γ. Μακρίδης², Γ. Γεωργίου², Α. Ποτηράκης¹,
Γ. Φραγκιαδάκης¹, Ε. Δρακάκης³, Ε. Κουδουμάς³***

¹Γενικό Τμήμα Θετικών Επιστημών, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, ΤΕΙ Κρήτης, email: fotis@stef.teiher.gr

²Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Κύπρου, email: eep5mg1@ucy.ac.cy

²Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Κύπρου, email: geg@ucy.ac.cy

¹Γενικό Τμήμα Θετικών Επιστημών, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, ΤΕΙ Κρήτης, email: pnjfra@stef.teiher.gr

³Τμήμα Ηλεκτρολογίας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, ΤΕΙ Κρήτης, email: koudoumas@stef.teiher.gr

³Τμήμα Ηλεκτρολογίας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, ΤΕΙ Κρήτης, email: m.drakakis@stef.teiher.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η καταγραφή της παραγόμενης ισχύος από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι σημαντική τόσο για τεχνικούς όσο και οικονομικούς λόγους, ιδιαίτερα σε σημαντικές επενδύσεις. Η ισχύς που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μοντελοποιείται με τη βοήθεια της ονομαστικής ισχύος, της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, και των βασικών μηχανισμών απωλειών ενέργειας. Τέτοιοι μηχανισμοί σχετίζονται με τη θερμοκρασία κυψελίδας, την επίδραση χαμηλών εντάσεων ακτινοβολίας, την ανακλαστικότητα των πλαισίων, το φάσμα και την πόλωση του ηλιακού φωτός, την απόκλιση λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας από το σημείο μέγιστης ισχύος, την μη σύμπτωση των τεχνικών χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών πλαισίων της συστοιχίας καθώς και τις απώλειες μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πειραματικές ποσότητες που είναι απαραίτητες για το μοντέλο είναι η ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο των πλαισίων, η θερμοκρασία κυψελίδας των πλαισίων και η εγκατεστημένη ονομαστική ισχύς. Σε αυτή την εργασία παρουσιάζουμε μέρος των αποτελεσμάτων των θεωρητικών υπολογισμών σε σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διεθνής αγορά φωτοβολταϊκών εξελίσσεται με γοργούς ρυθμούς. Η πλειοψηφία των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) συστημάτων είναι διασυνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο και καταναμεμένα σε μονάδες σχετικά μικρής ισχύος. Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής κοινότητας η Γερμανία είναι η χώρα με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ ΦΒ και δείχνοντας το δρόμο της αειφόρου ανάπτυξης. Η Ελλάδα βρισκόταν, μέχρι πρόσφατα, στη 10^η θέση των χωρών της κοινότητας ως προς την εγκατεστημένη ισχύ ΦΒ συστημάτων. Η ψήφιση του νόμου για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας το 2006 έδωσε σημαντική ώθηση στην υλοποίηση σημαντικών επενδύσεων στο χώρο της ενέργειας. Ιδιαίτερα, για την Κρήτη αναμένεται η εγκατάσταση τουλάχιστον 50 MW ΦΒ ισχύος με τη μορφή κεντρικών

συστημάτων, δηλαδή συστημάτων που θα διοχετεύουν την παραγόμενη ενέργεια στο κεντρικό δίκτυο. Η Κρήτη, όπως και η Κύπρος, σε σχέση με τις χώρες της κεντρικής-βόρειας Ευρώπης, χαρακτηρίζονται από υψηλό ηλιακό δυναμικό και αποτελούν περιοχές αυξημένου ενδιαφέροντος για την αξιοποίηση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

Δεδομένα από ΦΒ συστήματα προσφέρουν ένα πολύτιμο εργαλείο στους ερευνητές κατά την προσπάθεια τους να βελτιστοποιήσουν την απόδοση αυτών των συστημάτων και κατά συνέπεια, να μεγιστοποιήσουν τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας προς όφελος του κοινού και του περιβάλλοντος. Η μοντελοποίηση της απόδοσης των ΦΒ πλαισίων είναι αντικείμενο έρευνας εδώ και αρκετά χρόνια. Ειδικότερα σε συνδυασμό με την καταγραφή των δεδομένων σε μικρά χρονικά διαστήματα είναι δυνατή η ανίχνευση πιθανών προβλημάτων του συστήματος (π.χ. πλαισίων, αντιστροφών τάσης), μειωμένης απόδοσης (γήρανση, σκίαση, σκόνη κ.λπ.).

Είναι σημαντικό να αναπτυχθούν μοντέλα που θα προβλέπουν με όσο το δυνατόν περισσότερη ακρίβεια την παραγόμενη ενέργεια από ένα ΦΒ σύστημα χρησιμοποιώντας τον ελάχιστο αριθμό παραμέτρων εισόδου. Σε αυτή την εργασία παρουσιάζουμε μέρος των αποτελεσμάτων για ένα μοντέλο παραγωγής ενέργειας και το συγκρίνουμε με πειραματικά δεδομένα από τη Λευκωσία της Κύπρου και το Ηράκλειο της Κρήτης.

2. ΤΑ ΦΒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα δεδομένα από τη Λευκωσία της Κύπρου προέρχονται από το τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου της Κύπρου και αφορούν σε συστήματα τυπικής ισχύος 1 kW διαφορετικών τεχνολογιών (πολυκρυσταλλικά, μονοκρυσταλλικά, λεπτού φιλμ) τοποθετημένα όλα με την ίδια κλίση [1]. Επίσης, όλα τα συστήματα χρησιμοποιούν τον ίδιο αντιστροφέα τάσης, ώστε να αποφευχθούν διαφορές λόγω hardware και αλγορίθμου παρακολούθησης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT). Τα δεδομένα καταγράφονται κάθε δευτερόλεπτο αλλά στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται μέσες τιμές των δεκαπέντε λεπτών. Η ηλιακή ακτινοβολία καταγράφεται τόσο με πυρανόμετρο στο επίπεδο των πλαισίων όσο και με ΦΒ στοιχεία αναφοράς κρυσταλλικού πυριτίου, κατανομημένα στο χώρο εγκατάστασης. Καταγράφονται, επίσης, μετεωρολογικά δεδομένα (θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα ανέμου, διεύθυνση ανέμου). Με αυτό τον τρόπο έχουμε και τη δυνατότητα ελέγχου των σχέσεων, που αποδίδουν τη θερμοκρασία κυψελίδας (ΦΒ πλαισίου) σε συνθήκες, σχεδόν, θερμικής ισορροπίας χρησιμοποιώντας τα μετεωρολογικά δεδομένα.

Τα δεδομένα από το Ηράκλειο προέρχονται από το Εργαστήριο «Φωτοβολταϊκό Πάρκο» του Τ.Ε.Ι. Κρήτης και αφορούν στη μέτρηση συγκεκριμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων με τη βοήθεια ηλεκτρονικών συσκευών καταγραφής των χαρακτηριστικών καμπυλών ρεύματος-τάσης (I-V). Οι συσκευές I-V αναπτύχθηκαν από το εργαστήριο και κατασκευάστηκαν σε αυτό και επιτρέπουν τη μελέτη ΦΒ πλαισίων σχετικά χαμηλής ισχύος (<100 W). Το σήμα μεταφέρεται σε μια κάρτα A/D και τελικά οι τιμές ρεύματος και τάσης αποθηκεύονται σε αρχείο ASCII, στο σκληρό δίσκο ενός Η/Υ. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε για τη χρήση των συσκευών I-V επιτρέπει την προγραμματισμένη λειτουργία τους σε προ-επιλεγμένα χρονικά διαστήματα. Ο μετεωρολογικός σταθμός του εργαστηρίου βρίσκεται σε μικρή απόσταση και καταγράφει, πλέον των άλλων παραμέτρων, την ολική και τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο. Η διάχυτη ακτινοβολία διορθώνεται για τις επιπτώσεις της μεταλλικής λωρίδας σκίασης (shadow band) με τη βοήθεια μοντέλου [2]. Τα διορθωμένα δεδομένα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο των πλαισίων με κατάλληλο μοντέλο [3].

3. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Το μοντέλο υπολογισμού της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, βασίζεται στην επεξεργασία δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας αέρα και ταχύτητας ανέμου, για τον προσδιορισμό, μέσω αναλυτικών σχέσεων, των συντελεστών απόκλισης της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος από την ονομαστική ισχύ της ΦΒ συστοιχίας. Στα γενικά χαρακτηριστικά ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η ονομαστική ισχύς της συστοιχίας και ο θερμικός συντελεστής μεταβολής της με τη θερμοκρασία. Το μοντέλο μπορεί να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο με τη χρήση ανάλογων συναρτήσεων εξειδικευμένων για τα συγκεκριμένα πλαίσια που μελετούνται. Σε επόμενο βήμα, το μοντέλο πρόκειται να εξελιχθεί έτσι ώστε να παρέχει τα ζητούμενα για το ΦΒ δυναμικό ενός τόπου, αξιοποιώντας μέσες τιμές των βασικών χαρακτηριστικών του τόπου (πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασία αέρα και ταχύτητα ανέμου).

Στη συνέχεια θα γίνει κατανοητό ότι ακόμα και οι γενικές συναρτήσεις των συντελεστών απόκλισης δίνουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, η παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκής ενέργειας προκύπτει από την ονομαστική P_p , μετά την επίδραση των παραγόντων που έχουμε προαναφέρει

$$P_m = P_p \cdot \eta_t \cdot \frac{G}{G_{STC}} \quad (1)$$

όπου

P_p , η ονομαστική ισχύς αιχμής του ΦΒ πλαισίου (ή της συστοιχίας), όπως αναφέρεται από τον κατασκευαστή και η οποία αφορά στην αποδιδόμενη, από το ΦΒ πλαίσιο, ηλεκτρική ισχύ, κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ($E = 1 \text{ kW/m}^2$, κάθετη πρόσπτωση ακτινοβολίας στην επιφάνεια του πλαισίου, φάσμα ακτινοβολίας αντίστοιχο της κατάστασης AM1,5 και θερμοκρασία ΦΒ πλαισίου 25°C),

G : η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του ΦΒ πλαισίου ή της συστοιχίας,

G_{STC} : η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, που αναφέρεται στις πρότυπες συνθήκες ($G_{STC} = 1000 \text{ Wm}^{-2}$) και

η_t , ο ολικός συντελεστής απόκλισης της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με την ονομαστική ισχύ του ΦΒ πλαισίου (ή συστοιχίας). Ο συντελεστής αυτός περιλαμβάνει τους επιμέρους παράγοντες που προσδιορίζουν την απόκλιση των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας μιας ΦΒ συστοιχίας σε σχέση με τις πρότυπες συνθήκες. Οι παράγοντες που υπεισέρχονται αφορούν στη διαφοροποίηση της θερμοκρασίας ΦΒ πλαισίου (κυψελίδας) σε σχέση με τη θερμοκρασία των 25°C των πρότυπων συνθηκών, στη διαχρονική γήρανση του υλικού των ΦΒ κυψελίδων, στην καθαρότητα όψεως των ΦΒ πλαισίων, στην απόκλιση λόγω διαφοροποιήσεων κατά τη διαδρομή μιας ακτίνας μέχρι τη δημιουργία των φωτοφορέων στο εσωτερικό της ΦΒ κυψελίδας (απόκλιση οπτικού δρόμου), στην απόκλιση από το σημείο μέγιστης ισχύος, στην απώλεια ισχύος στους αγωγούς μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, κ.λπ. Ιδιαίτερως, για το συντελεστή απόκλισης λόγω ανακλαστικότητας, χρησιμοποιείται η επόμενη σχέση

$$\eta_R = \frac{1 - \exp(-\cos \theta / a_r)}{1 - \exp(-1 / a_r)} \quad (2)$$

όπου, θ , η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του πλαισίου και a_r , εμπειρικός συντελεστής, με τυπική τιμή $a_r = 0,165$ [4].

Η θερμοκρασία θ_c καθορίζεται κυρίως από την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας στο ΦΒ πλαίσιο, ηλιακής ακτινοβολίας (G) και διαμορφώνεται από τη θερμοκρασία του αέρα (θ_a) και την ταχύτητα του ανέμου (ws), στο περιβάλλον του ΦΒ πλαισίου. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε την επόμενη σχέση επειδή περιέχει και την επίδραση του ανέμου, που συμβάλλει στην ψύξη των ΦΒ πλαισίων:

$$\theta_c = \theta_a + \frac{G}{G_{STC}} \cdot (T_1 \cdot \exp(B \cdot ws) + T_2 + \Delta\theta) \quad (3)$$

όπου, T_1 , T_2 , B και $\Delta\theta$ εμπειρικοί συντελεστές (King et al. 1998). Ο συντελεστής απόκλισης λόγω θερμοκρασίας διαφορετικής της $\theta_{STC} = 25^\circ\text{C}$, δίδεται από τη σχέση

$$\eta_T = 1 + \gamma_{mp} \cdot (\theta_c - \theta_{c,STC}) \quad (4)$$

όπου, γ_{mp} , ο θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος, P_m . Σημειώνεται, πάντως, ότι για τις μελέτες εφαρμογής των ΦΒ συστημάτων, ενδιαφερόμαστε για την αξιοποίηση δεομένων από το TME του τόπου, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν στον προσδιορισμό των μηνιαίων τιμών της θερμοκρασίας ΦΒ πλαισίου, μέσω εμπειρικών σχέσεων [5].

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ολοκληρωμένα χαρακτηριστικά της ΦΒ συστοιχίας στη διάρκεια ημέρας, μηνός και έτους. Ένα από τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η ενεργειακή αποδοτικότητα (Energy Yield) ενός ΦΒ πλαισίου (ή συστοιχίας), ημερησίως, μηνιαίως ή ετησίως και ορίζεται από τη σχέση:

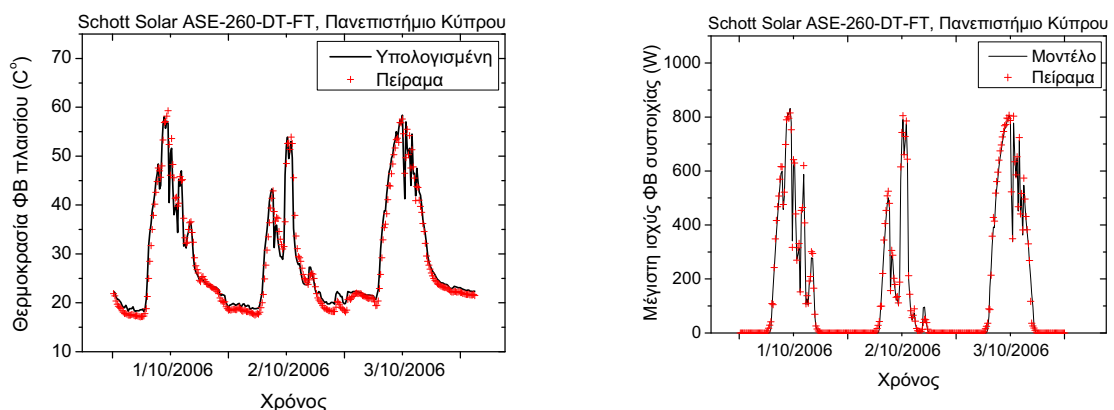
$$Y = \frac{E_{pv}}{P_p} \quad (5)$$

όπου, E_{pv} η συνολικά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από το ΦΒ σύστημα, στην αναφερόμενη χρονική περίοδο και P_p η ονομαστική ισχύς του ΦΒ πλαισίου ή συστοιχίας. Αν η E_{pv} εκφράζεται σε kWh και η P_p σε kW, η ενεργειακή αποδοτικότητα προκύπτει σε ώρες (h). Συνήθως, σε συγκριτικές αναφορές μεταξύ διαφορετικών τύπων ΦΒ πλαισίων ή ΦΒ συστημάτων εγκατεστημένων σε διαφορετικούς τόπους, αναφερόμαστε στην ετήσια ενεργειακή αποδοτικότητα (π.χ. [6]).

Στην παρούσα εργασία ελέγχεται η αξιοπιστία του μοντέλου, με αξιοποίηση δεδομένων διαφόρων τύπων ΦΒ πλαισίων, εγκατεστημένων σε δύο τόπους, στη Λευκωσία Κύπρου και στο Ηράκλειο Κρήτης. Το μοντέλο προσδιορισμού της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος που έχουμε αναπτύξει, βασίζεται στην εφαρμογή των αναφερθέντων ενεργειακών σχέσεων και

συντελεστών απόκλισης λειτουργίας του ΦΒ πλαισίου, από τις πρότυπες συνθήκες. Αξιοποιούνται δεδομένα καταγραφής της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο της ΦΒ συστοιχίας καθώς και της θερμοκρασίας αέρα και της ταχύτητας του ανέμου, από τους αναφερόμενους τόπους καθώς και χαρακτηριστικά των μελετούμενων ΦΒ πλαισίων και τελικώς, προσδιορίζεται η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς από κάθε ΦΒ συστοιχία. Στην περίπτωση που τα αρχικά δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας αφορούν σε μετρήσεις στο οριζόντιο επίπεδο, γίνεται αναγωγή στην τιμή της στο επίπεδο της ΦΒ συστοιχίας, με βάση το μοντέλο που έχουμε προαναφέρει [3].

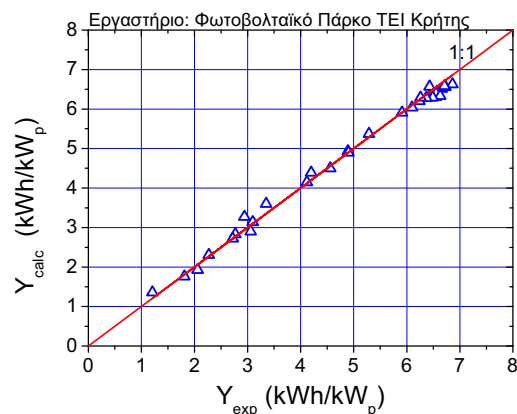
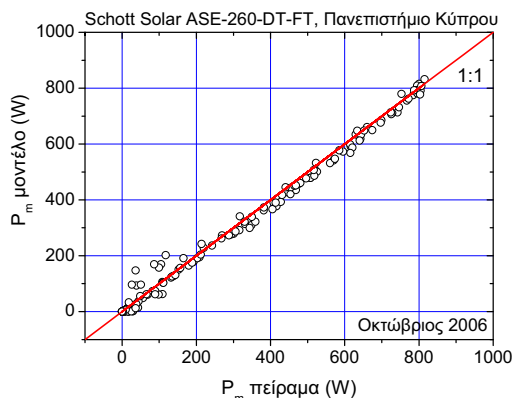
Ως αποτέλεσμα, των ανωτέρω υπολογισμών, προκύπτει η αναμενόμενη ηλεκτρική ισχύς από την κάθε μελετώμενη ΦΒ συστοιχία και συγκρίνεται με την πραγματικά αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ, σε πεντάλεπτη καταγραφή, ενώ προσδιορίζονται και οι μηνιαίες τιμές της ενεργειακής αποδοτικότητας (Υ).



Σχήμα 1. Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας ΦΒ πλαισίου (ASE 250), εγκατεστημένου στη Λευκωσία Κύπρου. Εμφανίζονται τα αποτελέσματα προσδιορισμού της θερμοκρασίας ΦΒ πλαισίου μέσω της σχέσης (2), σε σύγκριση με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα (αριστερό σχήμα). Επίσης, καταγράφονται η υπολογισμένη αποδιδόμενη, από τη ΦΒ συστοιχία, ηλεκτρική ισχύς καθώς και τα πειραματικά δεδομένα για άμεση σύγκριση (δεξιό σχήμα).

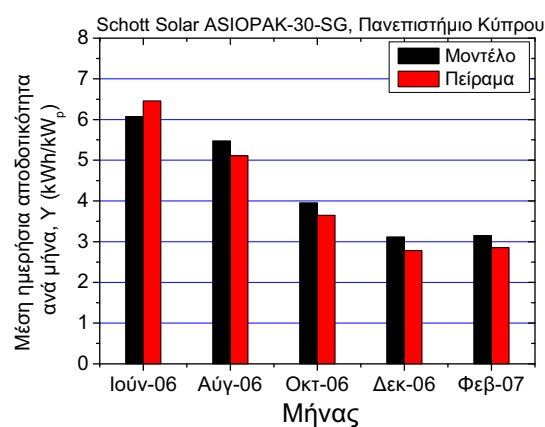
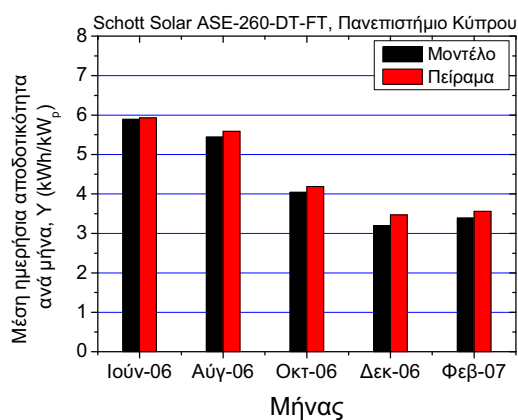
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ένας από τους κυριότερους παράγοντες μείωσης της παραγόμενης ισχύος από ένα ΦΒ πλαίσιο ή συστοιχία είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του, εξαιτίας της επιπλέον του ενεργειακού χάσματος του υλικού, ενέργειας των φωτονίων. Σε περίπτωση που δεν είναι άμεσα διαθέσιμα δεδομένα θερμοκρασίας πλαισίων, η σχέση (3) δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της μέσω τοπικών μετεωρολογικών μετρήσεων. Επομένως, είναι σημαντικό να ελεγχθεί ως προς την ορθότητα των συγκεκριμένων παραγόντων, που εμφανίζονται σε αυτή τη σχέση. Πραγματικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, η συμφωνία μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών μετρήσεων είναι πολύ καλή ακόμα και σε ημέρες με έντονες μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας. Σημειώνουμε ότι η σχέση (3) προϋποθέτει συνθήκες θερμικής ισορροπίας, που είναι δυσκολότερο να επιτευχθούν όταν η εισερχόμενη ενέργεια αλλάζει σημαντικά με το χρόνο σε σχέση με μια αίθρια ημέρα, όπου οι αλλαγές επιτελούνται με αργότερους ρυθμούς.



Σχήμα 2. Γραφική παράσταση υπολογισμένης αποδιδόμενης μέγιστης ισχύος σε συνάρτηση με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές του ίδιου μεγέθους, για ένα ΦΒ στη Λευκωσία (Ευθεία 1:1). Επίσης, στο ίδιο σχήμα εμφανίζονται τα δεδομένα από το Ηράκλειο Κρήτης, με τη μορφή της ενεργειακής αποδοτικότητας. Και σε αυτή την περίπτωση η συμφωνία είναι ικανοποιητική.

Στο ίδιο σχήμα γίνεται σύγκριση της υπολογισμένης ισχύος με τη βοήθεια του μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα. Όπως φαίνεται η συμφωνία μεταξύ των τιμών της ισχύος είναι ικανοποιητική παρά τις έντονες μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας. Το πρώτο μισό της ημέρας στις 3/10/2006 μπορεί να θεωρηθεί αίθρια ημέρα και η συμφωνία είναι ακόμα καλύτερη. Για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η συμφωνία μεταξύ μοντέλου και πειράματος γίνεται σύγκριση τιμών ισχύος στο Σχήμα 2 (ευθεία 1:1). Η πλειοψηφία των σημείων από τα δεδομένα του Πανεπιστημίου της Λευκωσίας βρίσκονται κοντά στην ευθεία 1:1 και η διασπορά τους αγγίζει το 5%. Στο Σχήμα 2 καταγράφεται η ενεργειακή αποδοτικότητα από τα δεδομένα στο Ηράκλειο, Κρήτης σε σύγκριση με αυτή που υπολογίζεται με τη βοήθεια του μοντέλου. Η ενεργειακή αποδοτικότητα Y (Energy Yield) είναι από τις σημαντικότερες παραμέτρους που χαρακτηρίζει ένα σύστημα και παρουσιάζει ενδιαφέρον τόσο για τον απλό χρήστη, όσο και για τον επιχειρηματία επενδυτή. Ο πρώτος ενδιαφέρεται, κυρίως, για τη μέγιστη δυνατή παραγωγή ενέργειας ανά kW_p εγκατεστημένης ισχύος ενώ ο δεύτερος ενδιαφέρεται για τη μέγιστη δυνατή οικονομική απόδοση της επένδυσης του.



Σχήμα 3. Η μέση ημερήσια ενεργειακή αποδοτικότητα ανά μήνα για δύο διαφορετικούς τύπους πλαισίων σε συνάρτηση του χρόνου.

Το Σχήμα 3 δείχνει τη χρονική εξέλιξη της ενεργειακής αποδοτικότητας, τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά βασισμένη στο μοντέλο που έχει αναπτυχθεί. Μέρος των δεδομένων αφορά σε πολυκρυσταλλικά πλαίσια που παρουσιάζουν σταθερή συμπεριφορά σε σχέση με το χρόνο (μικρές μεταβολές 0.5-1% ανά έτος). Αντίθετα, πλαίσια από άμορφο πυρίτιο παράγουν αρχικά περισσότερη ισχύ και με την πάροδο του χρόνου η ονομαστική ισχύς τους μειώνεται για να σταθεροποιηθεί μετά από μερικούς μήνες λειτουργίας (π.χ. μείωση κατά 20% εντός λίγων μηνών). Η μέγιστη ενεργειακή απόδοση από τα συγκεκριμένα πλαίσια (ASE 260) παρατηρείται τον Ιούνιο με 6 kWh/kW_p, ενώ η ελάχιστη το Δεκέμβριο με 3.5 kWh/kW. Η σύγκριση με τα πλαίσια ASIOPAK δεν είναι άμεσα δυνατή, επειδή η ονομαστική ισχύς τους μειώνεται με την πάροδο του χρόνου και τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται εδώ προέρχονται από τους πρώτους μήνες λειτουργίας τους. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι το μοντέλο συμπεριφέρεται ικανοποιητικά τόσο σε επίπεδο στιγμιαίων τιμών όσο και ημερήσιων ή μηνιαίων τιμών. Σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η προσαρμογή του μοντέλου στη χρήση μέσων τιμών (π.χ. μηνιαίων) αντί στιγμιαίων αφού τέτοια δεδομένα είναι ευκολότερα διαθέσιμα για ένα τόπο ή μια περιοχή.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή συγχρηματοδοτήθηκε κατά 75% από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης και κατά 25% από εθνικούς πόρους (INTERREG IIIA Ελλάδα-Κύπρος)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Zinsser B., Makrides G., Schubert M., Georgiou G.E. and Werner J., Jahresenergieertrag von 13 verschiedenen Photovoltaik-Technologien in Deutschland und Zypern, 23. Symposium Photovoltaische Solarenergie, 2008, Germany, pp 294-299.
2. Muneer, T., Zhang, X., 2002. A new method for correcting shadow band diffuse irradiance data. Transactions of the ASME 124, 34-43.
3. Hay, J.E., Davies, J.A., 1978. In: Hay, J.E., Won, T.K. (Eds.), Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface. First Canadian Solar Radiation Data Workshop, Toronto, Ont., Canada.
4. Martin N., Ruiz JM. Calculation of the PV modules angular losses under field conditions by means of an analytical model. Solar Energy Materials and Solar Cells 2001; 70: 25-38
5. Franghiadakis Y., Tzanetakis P. Explicit empirical relation for the monthly average cell-temperature performance ratio of photovoltaic arrays. Progress in Photovoltaics: Research and Applications Volume 14, Issue 6, September 2006, Pages: 541-551
6. Makrides G., Zinsser B., Georgiou G. E. and Werner J., Performance Assessment of Different Photovoltaic Systems Under Identical Field Conditions of High Irradiation, PV RES Conference, 15-20 September 2007, Nicosia, Cyprus, pp 4-12.

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΩΝ DC/AC ΣΕ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΦΒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ 20kWp ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

Χ. Δημουλιάς, Κ. Γκουραμάνης

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνική Σχολή,
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 541 24 Θεσσαλονίκη
e-mail:chdimoul@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο βαθμός απόδοσης των αντιστροφών φωτοβολταϊκών (ΦΒ) συστημάτων επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την φόρτισή τους. Αποδεικνύεται μέσω προσομοιώσεων με 53 εμπορικά διαθέσιμους αντιστροφείς και για επτά περιοχές της Ελλάδας ότι η βέλτιστη, από ενεργειακή άποψη, ισχύς των αντιστροφών πρέπει να είναι στο 75%-85% της μέγιστης ισχύος του ΦΒ συστήματος. Μετρήσεις έξι μηνών σε υφιστάμενο σύστημα 20kWp επιβεβαιώνουν τον παραπάνω ισχυρισμό. Από τις μετρήσεις φαίνεται επίσης ότι οι αντιστροφείς για να λειτουργήσουν προκαλούν ανύψωση τάσης στο σημείο σύνδεσης της τάξης του 5% . Επίσης από τις μετρήσεις φαίνεται ότι σφάλματα δικτύου και η απαίτηση για αποφυγή νησιδοποίησης που θέτει η ΔΕΗ προκαλούν απώλεια παραγόμενης ενέργειας της τάξης του 5,3% σε διάστημα 6 μηνών.

1. Εισαγωγή

Αν και η διείσδυση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, το κόστος εγκατάστασής τους παραμένει συγκριτικά υψηλό. Αυτό διατηρεί επιτακτική την απαίτηση για βέλτιστο σχεδιασμό του φωτοβολταϊκού συστήματος για την μέγιστη δυνατή αξιοποίηση του μεγάλου ηλιακού δυναμικού της χώρας μας. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η διαστασιολόγηση των αντιστροφών (inverters) σε διασυνδεδεμένα με το δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα με στόχο τη μέγιστη απόδοσή τους βάσει των τοπικών κλιματολογικών συνθηκών της Ελλάδας.

Οι αντιστροφείς που χρησιμοποιούνται σήμερα στα φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν με την αρχή της διαμόρφωσης εύρους παλμών. Οι απώλειες τους δεν είναι σταθερές σε όλη την περιοχή ισχύος τους αλλά μεταβάλλονται από κάποια ελάχιστη τιμή που αντιστοιχεί σε μηδενικό φορτίο μέχρι μια μέγιστη τιμή που αντιστοιχεί σχεδόν σε ονομαστική ισχύ λειτουργίας. Σαν επακόλουθο, ο βαθμός απόδοσης ενός αντιστροφέα είναι πολύ μικρός σε μικρή ισχύ λειτουργίας και γίνεται μέγιστος περίπου στην ονομαστική ισχύ. Η ισχύς λειτουργίας όμως ενός αντιστροφέα είναι ίση με την παραγόμενη ισχύ των συνδεδεμένων σε αυτόν φωτοβολταϊκών συλλεκτών και επομένως μεταβάλλεται με την ηλιοφάνεια, τόσο στην διάρκεια μιας ημέρας όσο και με τις εποχές του έτους. Είναι λοιπόν φανερό ότι η υπερδιαστασιολόγηση των αντιστροφών -σε σχέση με την συνολική ονομαστική ισχύ των φωτοβολταϊκών ηλιακών συλλεκτών- θα προκαλέσει τη λειτουργία τους για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε μερικό φορτίο και επομένως μειωμένο βαθμό απόδοσης, ενώ αντίθετα η υποδιαστασιολόγησή τους θα οδηγήσει σε απώλεια διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας για κάποια

χρονικά διαστήματα αφού οι αντιστροφείς περιορίζουν αυτόματα την ισχύ εξόδου τους στη μέγιστη επιτρεπτή.

Στην παρούσα εργασία θα γίνει διερεύνηση της βέλτιστης ισχύος των αντιστροφών μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης σε σχέση με την μέγιστη ονομαστική ισχύ του φωτοβολταϊκών συλλεκτών (PV panels) με παράμετρο βελτιστοποίησης την ετήσια παραγόμενη ενέργεια. Η διερεύνηση θα γίνει για 7 αντιπροσωπευτικές περιοχές όλης της Ελλάδας, και για μεγάλο αριθμό από εμπορικά διαθέσιμους αντιστροφείς. Για τον υπολογισμό της ετήσιας παραγόμενης ισχύος χρησιμοποιείται το εμπορικά διαθέσιμο λογισμικό PVSYST v.4.1 το οποίο δέχεται σαν είσοδο την καμπύλη του βαθμού απόδοσης κάθε αντιστροφέα. Τα στοιχεία της ηλιακής ακτινοβολίας για τις διάφορες περιοχές της Ελλάδας έχουν ληφθεί από τη διεθνή βιβλιογραφία με κυριότερη πηγή, τους επίσημους πίνακες ηλιοφάνειας που βρίσκονται στην ελληνική βιβλιογραφία και την αντίστοιχη βάση δεδομένων της Ευρωπαϊκής Επιτροπής [1]. Από τους υπολογισμούς διαπιστώνεται ότι η επιλογή αντιστροφών με ισχύ μικρότερη της ονομαστικής ισχύος των φωτοβολταϊκών συλλεκτών δε μειώνει μόνο το αρχικό κόστος εγκατάστασης αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις περιοχών της Βόρειας Ελλάδας αυξάνει και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα των υπολογισμών καθώς και τα συμπεράσματα σε σχέση με τη διαστασιολόγηση των αντιστροφών αξιολογούνται μέσω της σύγκρισης με πραγματικές μετρήσεις συνολικής διάρκειας 6 μηνών σε μία πραγματική φωτοβολταϊκή εγκατάσταση ονομαστικής ισχύος 20 kW_p. Υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης για όλη τη διάρκεια της μέτρησης και γίνεται υπολογισμός της απώλειας εσόδων που οφείλονται σε σφάλματα του δικτύου και σε σφάλματα των αντιστροφών. Με βάση την ανάλυση και την σύγκριση των μετρήσεων και υπολογισμών προτείνεται η ισχύς των αντιστροφών μιας ΦΒ εγκατάστασης να είναι μεταξύ 75%-85% της εγκατεστημένης ισχύος των ΦΒ συλλεκτών.

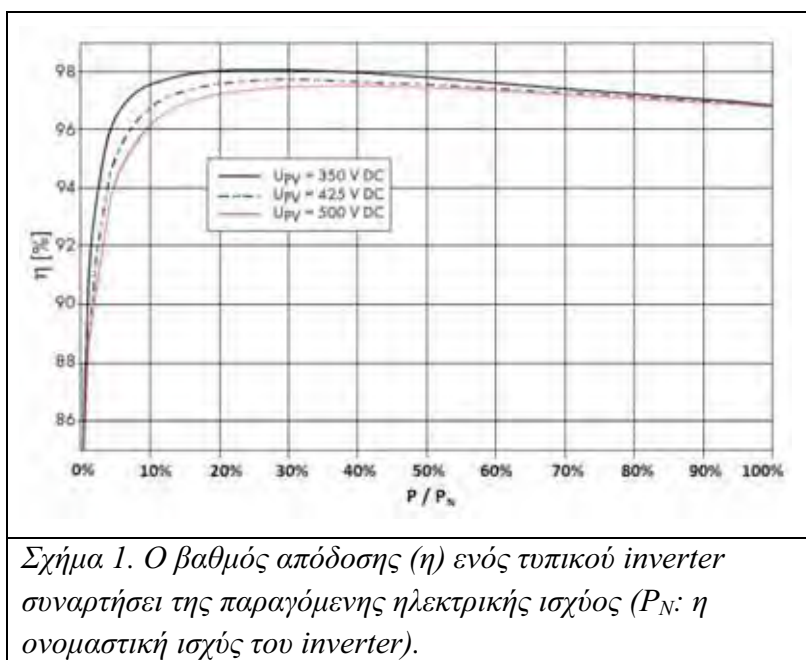
2. Επίδραση της Ηλιακής Ακτινοβολίας στο βαθμό απόδοσης των αντιστροφών.

Ο βαθμός απόδοσης των αντιστροφών εξαρτάται από την αναπτυσσόμενη ηλεκτρική ισχύ [2, 3] και από την τάση στο dc μέρος τους. Η μέγιστη απόδοση επιτυγχάνεται για ισχύεις μεταξύ 30% και 60% της ονομαστικής. Διαπιστώνεται λοιπόν ότι για την επιλογή ενός αντιστροφέα με στόχο την επίτευξη της μέγιστης απόδοσης απαιτείται η εξέταση του βαθμού απόδοσης σε διάφορα επίπεδα της ισχύος λειτουργίας του κι όχι μόνο στην ονομαστική φόρτιση που επιτυγχάνεται για μικρά χρονικά διαστήματα. Γι' αυτό το λόγο τα τεχνικά φυλλάδια των αντιστροφών κατά κανόνα περιλαμβάνουν διαγράμματα όπως αυτό του Σχ. 1, που προδιαγράφουν πλήρως το βαθμό απόδοσης.

Για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας των αντιστροφών σε όλο τον κύκλο λειτουργίας τους έχει ορισθεί ο Ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης:

$$\begin{aligned} \eta_{Euro} &= k_5 \times \eta_{5\%} + k_{10} \times \eta_{10\%} + k_{20} \times \eta_{20\%} + k_{30} \times \eta_{30\%} + k_{50} \times \eta_{50\%} + k_{100} \times \eta_{100\%} = \\ &= 0.03 \times \eta_{5\%} + 0.06 \times \eta_{10\%} + 0.13 \times \eta_{20\%} + 0.1 \times \eta_{30\%} + 0.48 \times \eta_{50\%} + 0.2 \times \eta_{100\%} \end{aligned} \quad (1)$$

όπου, $\eta_{m\%}$ είναι ο βαθμός απόδοσης για ισχύ λειτουργίας $m\%$ της ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα και k_m είναι το ποσοστό του χρόνου που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη ηλιοφάνεια ως προς το συνολικό χρόνο λειτουργίας της εγκατάστασης. Βάσει του ορισμού του Ευρωπαϊκού βαθμού απόδοσης λαμβάνεται υπόψη η απόδοση σε όλο τον κύκλο



εγκαταστάσεις που κατασκευάζονται στην Ελλάδα είναι η διαστασιολόγηση των αντιστροφέων με ισχύ ίση με την εγκατεστημένη ισχύ των φωτοβολταϊκών συλλεκτών. Στην πράξη η μέγιστη παραγόμενη ισχύς που θα αναπτυχθεί σε μία εγκατάσταση είναι μικρότερη σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ. Στην Ελλάδα η μέγιστη ισχύς που αναπτύσσεται σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις –και μόνο για μικρά χρονικά διαστήματα σε ημέρες έντονης ηλιοφάνειας- είναι περίπου 75 – 85% της εγκατεστημένης. Είναι φανερό ότι η επιλογή αντιστροφέων με ισχύ ίση με την εγκατεστημένη αντιστοιχεί σε υπερδιαστασιολόγηση.

Πίνακας 1. Οι 53 αντιστροφείς που εξετάστηκαν με την ενδεικτική ΦΒ εγκατάσταση 100kW_p.

	Ισχύς		
Κατασκευαστής 1	4x20kW,	3x25kW,	2x40kW
Κατασκευαστής 2	3x30kW,	1x75kW	
Κατασκευαστής 3	6x15kW,	5x15kW,	5x18kW, 4x18kW
Κατασκευαστής 4	2x36kW,	2x54kW,	1x72kW, 1x90kW
Κατασκευαστής 5	3x25kW,	4x25kW,	1x100kW
Κατασκευαστής 6	5x20kW,	4x20kW,	3x25kW, 2x41kW, 2x48kW
Κατασκευαστής 7	1x100kW,	2x40kW	
Κατασκευαστής 8	2x40kW,	3x32kW	
Κατασκευαστής 9	1x80kW,	1x100kW	
Κατασκευαστής 10	2x37kW,	1x84kW	
Κατασκευαστής 11	3x30kW,	1x75kW,	1x100kW
Κατασκευαστής 12	3x24kW,	2x40kW,	1x100kW
Κατασκευαστής 13	3x26kW,	3x34kW,	1x70kW, 1x100kW
Κατασκευαστής 14	1x90kW,	1x100kW	
Κατασκευαστής 15	3x26kW,	2x40kW,	1x100kW
Κατασκευαστής 16	3x25kW,	2x35kW,	1x100kW
Κατασκευαστής 17	2x35kW,	1x90kW	
Κατασκευαστής 18	2x36kW,	1x100kW	
Κατασκευαστής 19	3x30kW,	1x100kW	

Καλαμάτα, Ιωάννινα, Λάρισα και Δράμα, ώστε να καλυφθεί γεωγραφικά ένα σημαντικό μέρος της ελληνικής επικράτειας. Εξετάστηκαν 53 εμπορικά διαθέσιμοι αντιστροφείς 19 διαφορετικών εταιρειών, οι οποίοι δίνονται στον Πίνακα 1. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αντιστροφέων- και ειδικά η καμπύλη του βαθμού απόδοσής τους- που εισήχθησαν στις

λειτουργίας του αντιστροφέα ανάλογα με τα αναμενόμενα επίπεδα ηλιοφάνειας της Κεντρικής Ευρώπης.

3. Επίδραση των αντιστροφέων στην παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

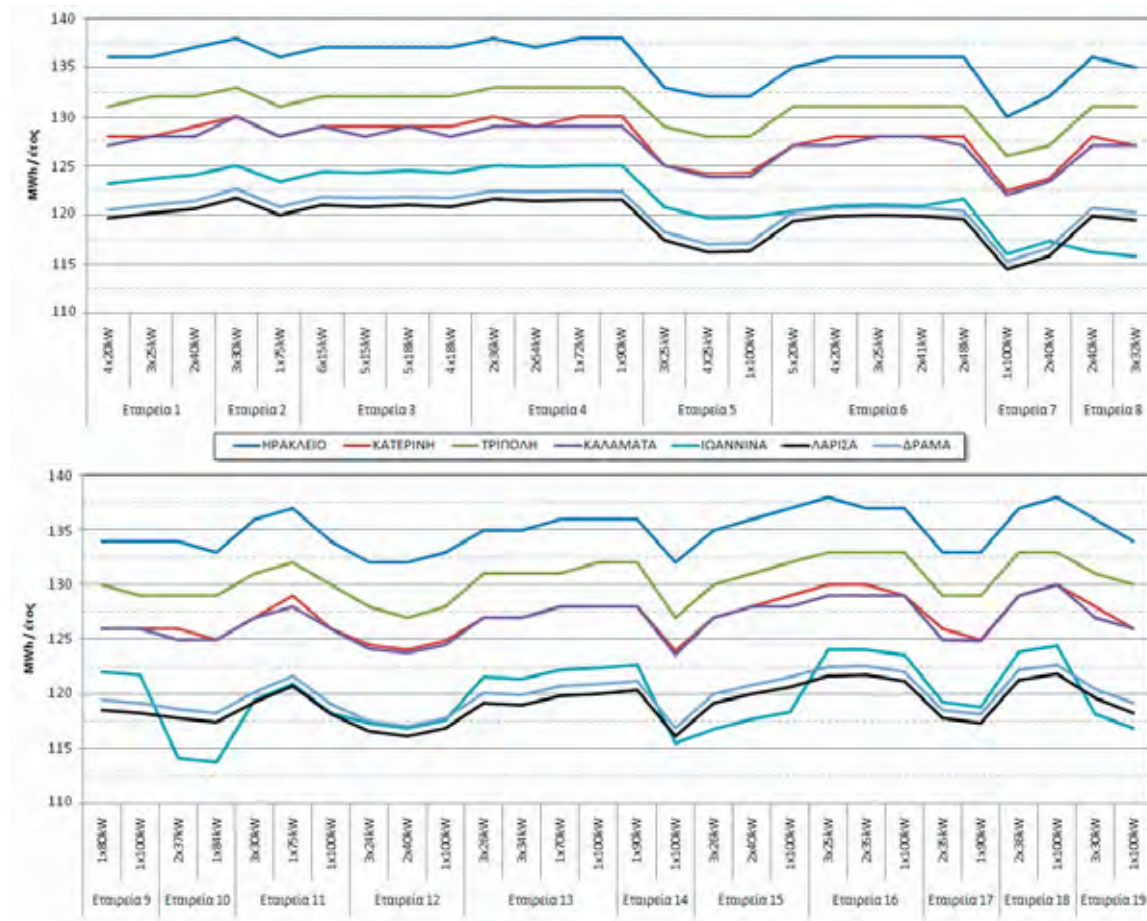
Η συνήθης πρακτική που εφαρμόζεται στις φωτοβολταϊκές

Η επίδραση της διαστασιολόγησης των αντιστροφέων εξετάζεται στη συνέχεια θεωρώντας μία ενδεικτική φωτοβολταϊκή εγκατάσταση εγκατεστημένης ισχύος 100 kW_p. Σε αυτήν την ενδεικτική εγκατάσταση γίνεται παραμετρικός υπολογισμός της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας ως παραμέτρους αφενός την περιοχή εγκατάστασης και αφετέρου τον τύπο και την ισχύ των αντιστροφέων. Όλοι οι υπολογισμοί έγιναν στο λογισμικό προσομοίωσης PVSyst. Ως περιοχές εγκατάστασης επιλέχθηκαν οι εξής επτά πόλεις:

Ηράκλειο, Κατερίνη, Τρίπολη,

προσομοιώσεις, ελήφθησαν από τα αντίστοιχα τεχνικά εγχειρίδια. Στον Πίνακα 1 εκτός από το είδος δίνεται και η ποσότητα των αντιστροφέων που επιλέγεται κατά περίπτωση για τη σύνδεση στην ενδεικτική φωτοβολταϊκή εγκατάσταση των 100kWp.

Στα δύο διαγράμματα του Σχ. 2 δίνεται η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όπως υπολογίστηκε από το λογισμικό PVSyst για το ενδεικτικό φωτοβολταϊκό σύστημα εγκατεστημένο σε 7 πόλεις της Ελλάδας και για τους 53 διαφορετικούς εμπορικά διαθέσιμους αντιστροφείς.



Σχήμα 2. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας στις 7 υπό εξέταση πόλεις με τους 53 αντιστροφείς

Από το Σχ.2 προκύπτει ότι, πέρα από την αναμενόμενη μεγαλύτερη παραγωγή σε πόλεις με μεγαλύτερη ηλιοφάνεια, η επιλογή των αντιστροφέων και ειδικότερα η επιλογή αντιστροφέων διαφορετικής ισχύος ακόμη και της ίδιας εταιρείας επηρεάζει την ηλεκτρική παραγωγή.

Η επιλογή αντιστροφέων ισχύος ίσης με αυτής των ΦΒ συλλεκτών όχι μόνο δεν αυξάνει την ηλεκτρική παραγωγή αλλά σε κάποιες περιπτώσεις προκαλεί μείωση σε σχέση με αντιστροφείς μικρότερης ισχύος. Αυτή η μείωση παρατηρείται κυρίως σε πόλεις με μικρή ηλιοφάνεια, ενώ στις πόλεις με μεγαλύτερη ηλιοφάνεια η παραγωγή διατηρείται περίπου σταθερή. Στις πόλεις με μεγάλη ηλιοφάνεια η παραγόμενη ισχύς είναι για περισσότερες ώρες το χρόνο κοντά στην μέγιστη ισχύ των αντιστροφέων με αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσης των αντιστροφέων να είναι αυξημένος. Αντίθετα, στις πόλεις με χαμηλή ηλιοφάνεια η παραγόμενη ισχύς βρίσκεται περισσότερες ώρες το χρόνο κοντά στα σημεία μικρής φόρτισης των αντιστροφέων με αποτέλεσμα και ο βαθμός απόδοσής τους να είναι μικρός.

4. Εξέταση φωτοβολταϊκού συστήματος ισχύος 20kW

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες από τις μετρήσεις των ηλεκτρικών μεγεθών μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης ονομαστικής ισχύος 20 kW_p, συνδεδεμένης στο δίκτυο Χαμηλής Τάσης (400V) της ΔΕΗ που βρίσκεται στον Κορινό της Πιερίας και είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο από 06/09/2007. Αποτελείται από 111 φωτοβολταϊκούς συλλέκτες Sharp – 180W_p, που συνδέονται στο δίκτυο μέσω τριών μονοφασικών multistring αντιστροφέων της εταιρείας SMA ονομαστικής ισχύος 5kW έκαστος. Για λόγους ηλεκτρικής συμμετρίας οι τρεις αντιστροφείς συνδέονται ανά ένας στις τρεις φάσεις του δικτύου. Κάθε αντιστροφέας δέχεται στην είσοδό του δύο ανεξάρτητα ελεγχόμενα strings από τα οποία το ένα αποτελείται από 19 συλλέκτες και το άλλο από 18 συλλέκτες των 180W_p εν σειρά.

Τα ηλεκτρικά μεγέθη που καταγράφονται είναι το ρεύμα, η τάση και η ισχύς στο ac και dc, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από κάθε string, καθώς επίσης και τα σφάλματα λόγω δικτύου και λόγω των αντιστροφέων, οι ώρες λειτουργίας των αντιστροφέων και η σύνθετη αντίδραση του δικτύου. Η καταγραφή γίνεται ανά 15 λεπτά.

Κατά τη διάρκεια του πρώτου έτους λειτουργίας της εγκατάστασης, σύμφωνα με τις ηλεκτρικές μετρήσεις και τους λογαριασμούς της Δ.Ε.Η. παρήχθησαν συνολικά 29600kWh, που αντιστοιχούν σε 1480 kWh/kW_p. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά τους μήνες Μάρτιος 2008 έως και Σεπτέμβριος 2008, σύμφωνα με τις ηλεκτρικές μετρήσεις δίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Μηνιαία Παραγωγή
Ηλεκτρικής Ενέργειας κατά το χρ. διάστημα
3/08-9/08

Μήνες	Παραγωγή [kWh]
Μάρτιος 2008	2021
Απρίλιος 2008	3274
Μάιος 2008	2331
Ιούνιος 2008	3626
Ιούλιος 2008	3492
Αύγουστος 2008	4052
Σεπτέμβριος 2008	1586

Αυτή η ανηγμένη ετήσια παραγωγή είναι κατά 9,6% υψηλότερη σε σχέση με τις 1350 kWh/kW_p που είναι η εκτίμηση βάσει μετεωρολογικών στοιχείων [1]. Η σημαντικά αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποδίδεται-εκτός από ενδεχόμενη αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας- και στην ελαχιστοποίηση των πιθανών απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας και ειδικότερα:

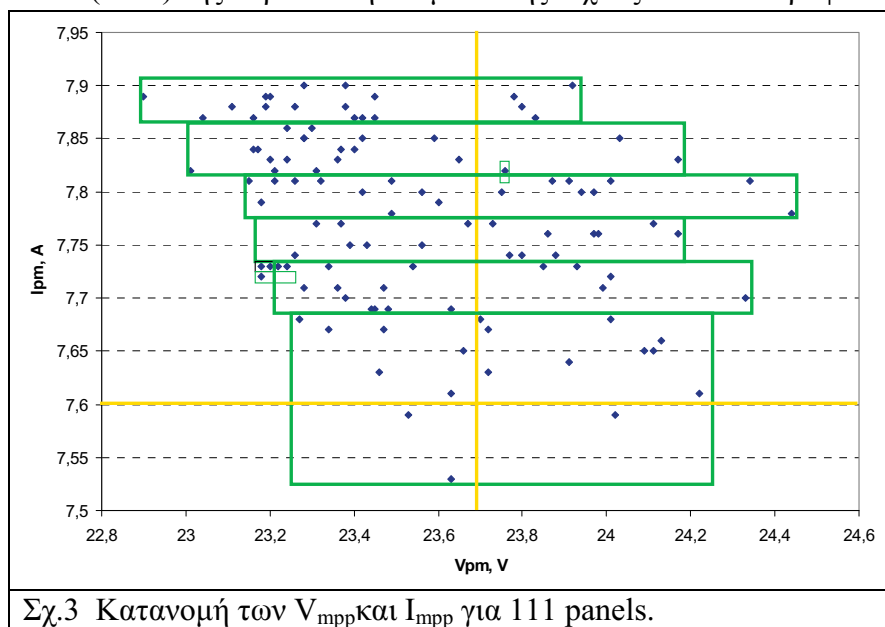
1. Στην ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω της ανοχής των ηλεκτρικών παραμέτρων των συλλεκτών V_{oc} , I_{sc} , V_{mpp} , I_{mpp} (*mismatch losses*).
2. Στη βέλτιστη διαστασιολόγηση των αντιστροφέων σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ των φωτοβολταϊκών συλλεκτών.

Η ελαχιστοποίηση των *mismatch losses* αντιμετωπίστηκε κατά τη σχεδίαση της εγκατάστασης με την κατάλληλη ομαδοποίηση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών στα strings. Η κατάλληλη ομαδοποίηση σημαίνει την σύνδεση σε κοινό string των panels που έχουν παρόμοια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά όπως φαίνεται στο Σχ. 3

Η διαστασιολόγηση των αντιστροφέων, επηρεάζει το βαθμό απόδοσής τους σε ολόκληρο τον κύκλο λειτουργίας τους, όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Στην υπό εξέταση εγκατάσταση η ισχύς των αντιστροφέων επιλέχθηκε στο 75% της ισχύος των φωτοβολταϊκών συλλεκτών. Το αποτέλεσμα είναι, όπως θα φανεί και στη συνέχεια, οι

αντιστροφείς να λειτουργούν σε μεγάλα χρονικά διαστήματα με υψηλό βαθμό απόδοσης λόγω του μεγάλου ποσοστού φόρτισης.

Στο Σχ. 4 γίνεται αντιπαράβολή του βαθμού απόδοσης των αντιστροφέων της εγκατάστασης με την παραγόμενη ισχύ, βάσει των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στις 24/9/2008. Συγκρίνοντας τις δύο καμπύλες φαίνεται η αλληλεπίδραση των δύο μεγεθών, καθώς ο βαθμός απόδοσης είναι πάνω από 0,95 όταν η παραγόμενη ισχύς είναι πάνω από το 40% (6kW) της αθροιστική ονομαστικής ισχύος των αντιστροφέων.

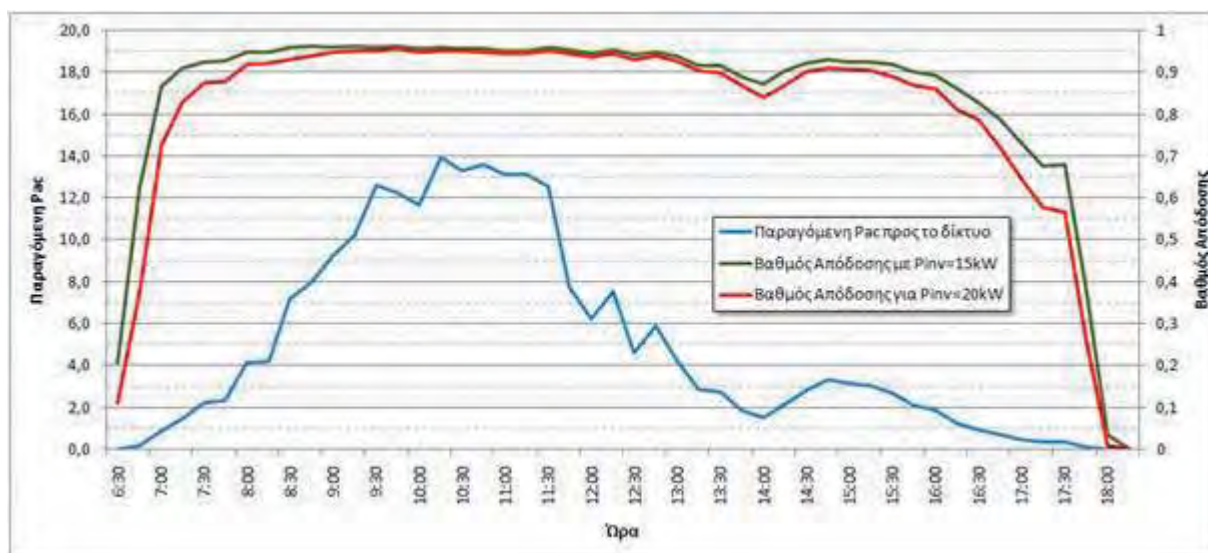


Η καμπύλη του βαθμού απόδοσης στο υποθετικό σενάριο που αντί για 15kW είχαν επιλεγεί αντιστροφείς ισχύος 20kW, όπως είναι η συνήθης πρακτική, φαίνεται στο ίδιο διάγραμμα. Η σύγκριση των δύο καμπυλών του βαθμού απόδοσης αποδεικνύει την αποδοτικότερη λειτουργία στην περίπτωση των αντιστροφέων με ισχύ 15kW.

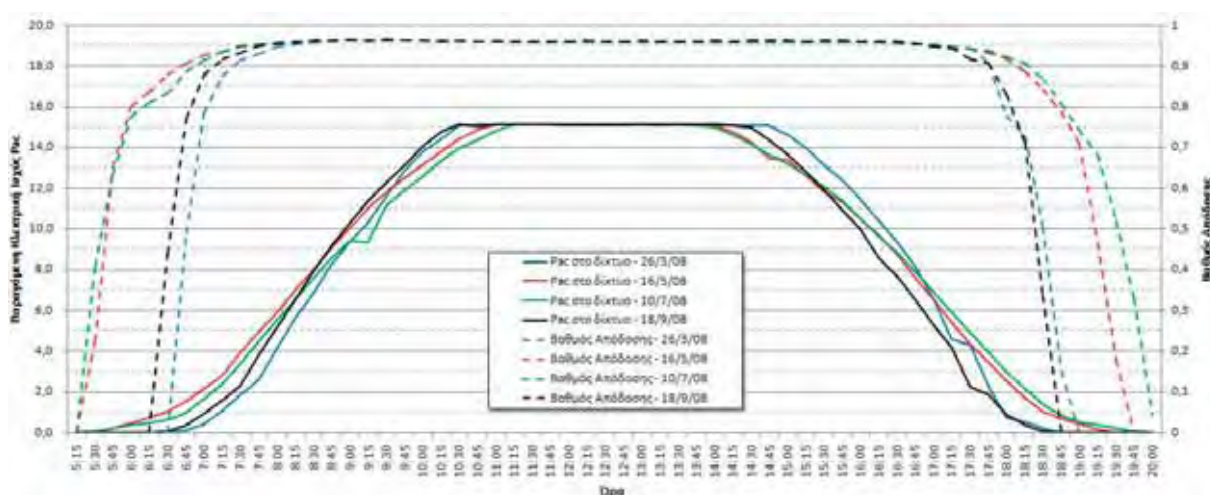
Στο Σχ. 4 φαίνεται η ηλεκτρική παραγωγή που αντιστοιχεί σε ημέρα με διαστήματα συννεφιάς γι' αυτό και η παραγωγή της ηλεκτρικής ισχύος είναι έντονα μεταβαλλόμενη. Στο Σχ. 5 δίνονται αντίστοιχες καμπύλες ηλεκτρικής ισχύος και βαθμού απόδοσης των αντιστροφέων για 4 ημέρες πλήρους ηλιοφάνειας που αντιστοιχούν στους μήνες Μάρτιο, Μάιο, Ιούλιο και Σεπτέμβριο του 2008. Διαπιστώνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις η παραγωγή περιορίστηκε από τη μέγιστη επιτρεπτή φόρτιση των αντιστροφέων- υπήρξε δηλαδή απώλεια παραγωγής ενέργειας σε σχέση με την περίπτωση που οι αντιστροφείς ήταν διαστασιολογημένοι στα 20kW.

Επίσης, διαπιστώνεται ότι για ημέρες έντονης ηλιοφάνειας η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας διαφοροποιείται λίγο μεταξύ των μηνών 3/08 – 9/08. Η κύρια διαφορά μεταξύ των 4 ημερών εντοπίζεται στη διάρκεια ηλιοφάνειας που είναι μεγαλύτερη τους μήνες Μάιο, Ιούλιο και μικρότερη τους Μάρτιο, Σεπτέμβριο. Οι βασικοί λόγοι αυτής της ομοιότητας είναι δύο και περιγράφονται στη συνέχεια.

Οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες της εγκατάστασης είναι εγκατεστημένοι σε σταθερές βάσεις με κλίση 30° που είναι η βέλτιστη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ετήσια βάση.



Σχήμα 4. Καμπύλη Παραγόμενης ισχύος και βαθμού απόδοσης στις 24/9/2008.



Σχήμα 5. Ηλεκτρική ισχύς και βαθμός απόδοσης αντιστροφών 4 ημερών του έτους.

Η κλίση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών ώστε να επιτευχθεί μέγιστη παραγωγή σε μηνιαία βάση φαίνεται στον Πίνακα 3. Από τις τιμές του πίνακα διαπιστώνεται ότι λόγω της σταθερής κλίσης στις 30° η παραγωγή ενισχύεται κατά τους μήνες Μάρτιο και Σεπτέμβριο, καθώς η κλίση των συλλεκτών σχεδόν συμπίπτει με τη βέλτιστη κλίση γι' αυτούς τους μήνες.

Η δεύτερη παράμετρος που ενισχύει την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ των μη θερινών μηνών σε σχέση με τους θερινούς είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η θερμοκρασία των συλλεκτών κατά τη λειτουργία τους αυξάνεται κατά περίπου 30°C σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος η οποία δίνεται στον Πίνακα 3 για τους δώδεκα μήνες. Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση της απόδοσης των συλλεκτών, άρα και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κατά -0,485%/°C.

Στον Πίνακα 4 δίνονται ορισμένα στοιχεία για έξι ενδεικτικούς μήνες του έτους 2008. Φαίνεται ότι οι αντιστροφείς λειτουργούν στην μέγιστη ισχύ τους μόνο για περιορισμένο χρονικό διάστημα (π.χ. 22% τον Μάιο και 13% τον Σεπτέμβριο) πράγμα που δικαιολογεί την υποδιαστασιολόγησή τους.

Πίνακας 3. Βέλτιστη κλίση φωτοβολταϊκών συλλεκτών και μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες για την περιοχή της Κατερίνης

Μήνες	Βέλτιστη κλίση [°]	Θερμοκρασία [°C]
Ιανουάριος	60	6
Φεβρουάριος	52	7,7
Μάρτιος	39	10,6
Απρίλιος	26	14,8
Μάιος	15	20,8
Ιούνιος	7	25,7
Ιούλιος	11	27,8
Αύγουστος	21	27,3
Σεπτέμβριος	37	22,6
Οκτώβριος	51	17,8
Νοέμβριος	59	12
Δεκέμβριος	59	7,2

για μία ολόκληρη ημέρα, προκαλώντας μείωση της παραγωγής κατά 39kWh (που αντιστοιχούν σε μείωση εσόδων κατά 18€). Σφάλματα του δικτύου που προκάλεσαν προσωρινή διακοπή της λειτουργίας της εγκατάστασης διαπιστώθηκαν του μήνες Μάρτιο, Ιούλιο και Σεπτέμβριο προκαλώντας μείωση της παραγωγής κατά περίπου 555kWh (που αντιστοιχούν σε μείωση εσόδων κατά 250€).

Πίνακας 4. Χαρακτηριστικές παράμετροι λειτουργίας των αντιστροφών για 6 ενδεικτικούς μήνες του έτους 2008 (ως ποσοστά επί της συνολικής διάρκειας λειτουργίας).

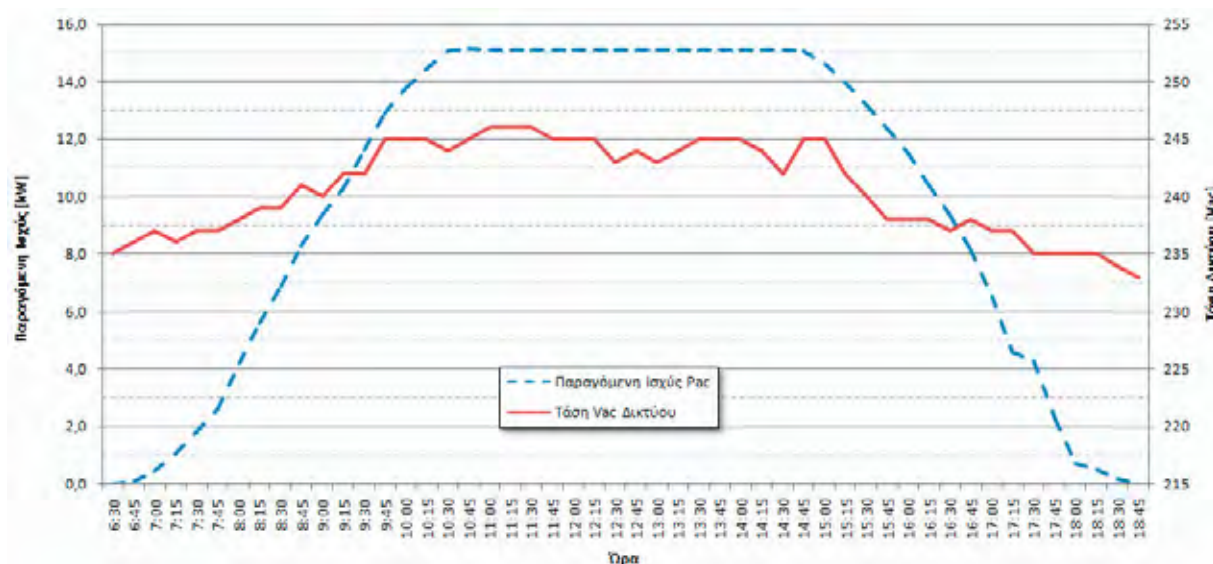
Μήνες	Πλήρης Ηλιοφάνεια	Μερική Ηλιοφάνεια	Έντονη Συννεφιά	Λειτουργία σε Ονομαστική Ισχύ	Σφάλματα Δικτύου (%)	Σφάλματα Αντιστροφή (%)
Μάρτιος	60%	20%	20%	23%	2,0%	0,9%
Μάιος	61%	35%	4%	22%	0,0%	0,0%
Ιούνιος	75%	25%	0%	21%	0,0%	0,0%
Ιούλιος	65%	35%	0%	19%	1,1%	0,0%
Αύγουστος	79%	21%	0%	19%	0,2%	0,0%
Σεπτέμβριος	44%	24%	32%	13%	2,0%	0,0%

Μέσω της σύγκρισης του επιπέδου τάσης του δικτύου όταν η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση είναι εντός και εκτός δικτύου, διαπιστώνεται ότι η λειτουργία της εγκατάστασης προκαλεί σημαντική αύξηση της τάσης. Στο Σχ. 6 φαίνονται η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς και η τάση του δικτύου όπως μετρήθηκαν στις 26/3/2008. Διαπιστώνεται αύξηση της τάσης με την αύξηση της παραγόμενης ισχύος μέχρι και 4,7% (από 235V σε 246V). Αυτό δικαιολογείται από την γεγονός ότι οι αντιστροφείς εγγέουν την ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο με συντελεστή ισχύος πολύ κοντά στην μονάδα. Παρόμοια συμπεριφορά διαπιστώθηκε και για τις υπόλοιπες μέρες που είναι διαθέσιμες οι μετρήσεις.

5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε διερεύνηση της βέλτιστης ισχύος των αντιστροφών μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ των φωτοβολταϊκών συλλεκτών με παράμετρο βελτιστοποίησής της ετήσια παραγόμενη ενέργεια. Η διερεύνηση έγινε για αντιπροσωπευτικές περιοχές όλης της Ελλάδας, και για μεγάλο αριθμό από εμπορικά διαθέσιμους αντιστροφείς. Διαπιστώθηκε ότι η βέλτιστη ισχύς των αντιστροφών είναι στην περιοχή 75-85% της μέγιστης ισχύος των φωτοβολταϊκών συλλεκτών με τις μικρότερες τιμές να αντιστοιχούν στις βόρειες περιοχές (π.χ Δράμα) της Ελλάδας και τις μεγαλύτερες στις νότιες.

Επίσης, στον Πίνακα 4 δίνεται η χρονική διάρκεια σαν ποσοστό του συνολικού χρόνου λειτουργίας ανά μήνα που η εγκατάσταση δεν ήταν στο δίκτυο λόγω σφαλμάτων είτε των αντιστροφών, είτε του δικτύου. Σφάλμα ενός αντιστροφέα παρατηρήθηκε κατά το μήνα Μάρτιο, όταν δεν λειτούργησε καθόλου



Σχήμα 6. Διάγραμμα Παραγόμενης Ηλεκτρικής Ισχύος και Τάσης Δικτύου (26/3/2008).

Η διαστασιολόγηση της ισχύος των αντιστροφών κοντά (>95%) στην ισχύ των φωτοβολταϊκών συλλεκτών αποδεικνύεται ότι στις νότιες περιοχές της Ελλάδας δεν επιφέρει αύξηση της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας και απλά επιβαρύνει το αρχικό κόστος επένδυσης, ενώ αντίθετα στις βόρειες περιοχές εκτός της επιβάρυνσης του αρχικού κόστους επένδυσης οδηγεί και σε μείωση της παραγόμενης ενέργειας. Σε περίπτωση βελτιστοποίησης της ισχύος των αντιστροφών αποδεικνύεται ότι η ετήσια παραγόμενη ενέργεια μπορεί να είναι 1-3% μεγαλύτερη σε σχέση με την περίπτωση διαστασιολόγησης με ισχύ ίση με αυτήν των φωτοβολταϊκών συλλεκτών όπως συνηθίζεται στην πράξη σήμερα.

Αναλύθηκαν τα αποτελέσματα μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε μία πραγματική φωτοβολταϊκή εγκατάσταση ισχύος 20kW στον Κορινό Πιερίας, που είναι συνδεδεμένη με το δίκτυο από τις 6/9/2007. Κατά τη διάρκεια του πρώτου έτους λειτουργίας της εγκατάστασης η παραγωγή ήταν ιδιαίτερα υψηλή (1480 kWh/kWp), που αποδίδεται στη βέλτιστη διαστασιολόγηση του συστήματος, καθώς οι αντιστροφείς του συστήματος είναι συνολικής ισχύος 15kW, ίση με το 75% της ισχύος των συλλεκτών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων επιβεβαίωσαν τους θεωρητικούς υπολογισμούς της εργασίας, σε σχέση με τη βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης των αντιστροφών.

Τέλος, διαπιστώθηκε ότι η σύνδεση μίας φωτοβολταϊκής μονάδα προκαλεί αύξηση της τάσης δικτύου στο σημείο σύνδεσης της τάξης του 5%. Η αύξηση της τάσης του δικτύου σε περίπτωση σύνδεσης πολλαπλών φωτοβολταϊκών μονάδων είναι αντικείμενο περεταίρω διερεύνησης.

Βιβλιογραφία

- [1] European Commission – Joint Research Centre
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps/pvest.php?lang=en&map=europe>
- [2] “Planning And Installing Photovoltaic Systems: A guide for installers, architects and engineers”, James and James Ltd, 2006
- [3] Mukund R. Patel , “Wind And Solar Power Systems”, CRC Press LLC, 1999

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΥΨΕΛΙΔΩΝ

*Μ.-Ι. Καϊρή, Ε. Βογιατζής, Α. Γ. Παπαθανασίου, Ι. Α. Παλυβός
και Α. Γ. Μπουντουβής*

Μονάδα Ηλιακής Μηχανικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,
Αθήνα 15780, Ελλάδα, email: envog@mail.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ειδικά της ηλιακής, για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, μέσω συστημάτων συμπαραγωγής είναι μια ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία. Σ' αυτή την εργασία μελετάται υπολογιστικά η ψύξη μιας φωτοβολταϊκής κυψελίδας που επικάθεται σε μεταλλικό σωλήνα στο εσωτερικό του οποίου κυκλοφορεί ψυκτικό υγρό. Αναπτύσσεται ένα λεπτομερές πρότυπο μεταφοράς ορμής και θερμότητας για την περιγραφή του συστήματος ψύξης, που αποτελεί δομική μονάδα ενός ευρύτερου συστήματος τρι-παραγωγής ενέργειας. Εξετάζεται, μέσω παραμετρικής ανάλυσης, η επίδραση της παροχής ψυκτικού και του πλήθους των εσωτερικών πτερυγίων στην απόδοση του συστήματος ψύξης. Προβλέψεις του προτύπου συγκρίνονται με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα. Το ζητούμενο είναι η εύρεση “παραθύρων λειτουργίας”, μεταξύ διαφοράς πίεσης και πλήθους εσωτερικών πτερυγίων, όπου επιτυγχάνεται βέλτιστη θερμοδυναμική λειτουργία.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η προσομοίωση συστήματος ψύξης φωτοβολταϊκών (Φ/Β) κυψελίδων συγκεντρωτικού τύπου, το οποίο αποτελεί τμήμα συστήματος τρι-παραγωγής ενέργειας. Το σύστημα ηλιακής τρι-παραγωγής ενέργειας είναι στην ουσία μία υβριδική διάταξη η οποία παράγει ταυτόχρονα ηλεκτρική, θερμική και ψυκτική ενέργεια [1]. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, χρησιμοποιείται σύστημα συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, με χρήση κατόπτρων, και Φ/Β κυψελίδες συγκεντρωτικού τύπου.

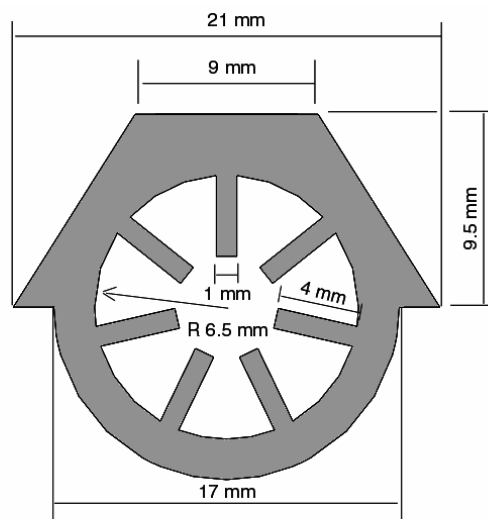
Το οπτικό σύστημα και οι κυψελίδες με τους σωλήνες ψύξης είναι τοποθετημένα πάνω σε ειδική πλατφόρμα αξιμουθιακής περιστροφής και ταυτόχρονα έχουν την δυνατότητα περιστροφής καθ' ύψος. Δημιουργείται έτσι ένα σύστημα παρακολούθησης του ήλιου ώστε τα κάτοπτρα του οπτικού συστήματος να βρίσκονται συνεχώς σε θέση κάθετη προς τις ακτίνες. Η μεγάλη συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας στις κυψελίδες είναι επιθυμητή διότι αυξάνεται η απόδοση τους. Όμως ταυτόχρονα αυξάνεται και η θερμοκρασία των Φ/Β κυψελίδων η οποία δεν πρέπει να υπερβαίνει ένα όριο, εν προκειμένω τους 369.5 K, εξαιτίας κατασκευαστικού περιορισμού. Είναι επομένως αναγκαία η ψύξη των κυψελίδων. Χρησιμοποιώντας κατάλληλη διάταξη, από την ψύξη των κυψελίδων παράγεται ζεστό νερό θερμοκρασίας 363 K, που οδηγείται σε έναν ψύκτη απορρόφησης αμμωνίας, ο οποίος αποδίδει τη θερμική ισχύ του για να παράγει ψυχρό νερό, κατάλληλο για κλιματισμό. Το σύστημα ψύξης χρησιμοποιεί νερό ως ψυκτικό ρευστό, που ανακυκλώνεται από αντλία θερμότητας σε θερμοκρασία 348 K. Το σύστημα ψύξης μελετάται υπολογιστικά με την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes συζευγμένων με τις εξισώσεις μεταφοράς ενέργειας σε τρι-διάστατες γεωμετρίες σωλήνων ψύξης σε μόνιμες συνθήκες. Εξετάζεται, μέσω παραμετρικής ανάλυσης, η επίδραση των κυριότερων λειτουργικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών, όπως η παροχή νερού και ο αριθμός πτερυγίων του σωλήνα, στην απόδοση του συστήματος ψύξης. Οι υπολογιζόμενοι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή συσχετίζονται με τους αδιάστατους αριθμούς Reynolds και Prandtl και συγκρίνονται με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα. Η μέθοδος της

ελαχιστοποίησης του ρυθμού παραγόμενης εντροπίας χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό πλεονεκτικών “παραθύρων λειτουργίας” του συστήματος ψύξης.

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Μελετάται η μεταφορά ορμής και θερμότητας σε ένα ειδικά πεπλατυσμένο κυλινδρικό σωλήνα με εσωτερικά πτερύγια. Η εγκάρσια διατομή του σωλήνα παρουσιάζεται στο Σχήμα 1, όπου απεικονίζονται τα κυριότερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Ο σωλήνας έχει κατασκευαστεί από αλουμίνιο και το μήκος του είναι 300 mm. Το πάνω του μισό έχει τραπεζοειδή μορφή έτσι ώστε η Φ/Β κυψελίδα να επικάθεται εύκολα στην επίπεδη εξωτερική επιφάνεια του.

Η βάση της Φ/Β κυψελίδας είναι τετράγωνη με πλευρά μήκους 7 mm και είναι τοποθετημένη στην άνω επίπεδη επιφάνεια του σωλήνα. Τα εσωτερικά πτερύγια, που ενισχύουν τη μεταφορά θερμότητας, είναι τοποθετημένα σε ίσα διαστήματα όπως φαίνεται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1. Η γεωμετρία του σωλήνα με εσωτερικά πτερύγια

Είναι διαμήκη, ορθογώνια και το πλήθος τους μεταβάλλεται από 5 έως 10 στη σχετική παραμετρική ανάλυση. Ως ψυκτικό ρευστό επιλέγεται νερό, που αφαιρεί το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας η οποία παράγεται από την Φ/Β κυψελίδα. Η ύπαρξη κατοπτρικής συμμετρίας ως προς επίπεδο παράλληλο με το διαμήκη άξονα επιτρέπει τον περιορισμό της υπολογιστικής ανάλυσης στο μισό χωρίο.

Η εξίσωση μεταφοράς ενέργειας με αγωγή σε μόνιμες συνθήκες στο στερεό είναι:

$$\nabla \cdot (k_s \nabla T_s) = 0 \quad (1)$$

όπου k_s και T_s η θερμική αγωγιμότητα και η θερμοκρασία του στερεού, αντίστοιχα. Η επιφάνεια του σωλήνα, όπου η Φ/Β κυψελίδα είναι τοποθετημένη, θεωρείται ότι δέχεται ποσό θερμότητας ίσο με 45 W ενώ τα υπόλοιπα εξωτερικά τοιχώματα είναι αδιαβατικά.

Οι εξισώσεις διατήρησης της μάζας, της ορμής, και της ενέργειας στο ρευστό, στην περίπτωση της μη-ισόθερμης, ασυμπίεστης, τυρβώδους ροής είναι οι ακόλουθες [2]:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\rho_f (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \rho_f \nabla \cdot (\overline{\mathbf{u}' \otimes \mathbf{u}'}) = -\nabla p + \nabla \cdot \eta_f (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T), \quad (3)$$

$$\rho_f C_{p,f} (\mathbf{u} \cdot \nabla) T_f - \nabla \cdot ((k_f + k_T) \nabla T_f) = 0 \quad (4)$$

όπου \mathbf{u} η μέση ταχύτητα του ρευστού, ρ_f η πυκνότητα του ρευστού, p η πίεση (συμπεριλαμβανομένης της συνεισφοράς από τη βαρύτητα), η_f το μοριακό δυναμικό ιξώδες, T_f η θερμοκρασία του ρευστού, k_f η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού, k_T η τυρβώδης θερμική αγωγιμότητα και $C_{p,f}$ η θερμοχωρητικότητα του ρευστού. Ο τανυστής των τάσεων Reynolds υπολογίζεται από το Realizable $k - \varepsilon$ μοντέλο τύρβης [2] που εξασφαλίζει ότι τα διαγώνια στοιχεία του τανυστή των τάσεων Reynolds δεν είναι αρνητικά. Το μοντέλο βασίζεται στην υπόθεση ιξώδους δίνης του Boussinesq και εισάγει δύο νέες εξισώσεις μεταφοράς: μία για την τυρβώδη κινητική ενέργεια, K , και μία για το ρυθμό σκέδασης τυρβώδους κινητικής ενέργειας, ε :

$$\rho_f \mathbf{u} \cdot \nabla K - \nabla \cdot [(\eta_f + \eta_T) \nabla K] = 0.5 \eta_T (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)^2 - \rho_f \varepsilon, \quad (5)$$

$$\rho_f \mathbf{u} \cdot \nabla \varepsilon - \nabla \cdot \left[\left(\eta_f + \frac{\eta_T}{1.3} \right) \nabla \varepsilon \right] = 0.72 \frac{\varepsilon}{K} \eta_T (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)^2 - 1.92 \rho_f \frac{\varepsilon^2}{K}, \quad (6)$$

$$\eta_T = \min \left(0.09 \frac{\rho_f K^2}{\varepsilon}, \frac{\rho_f K}{3 \max(\lambda_a)} \right) \quad (7)$$

$$\rho_f \overline{(\mathbf{u}' \otimes \mathbf{u}')} - \frac{\rho_f}{3} \text{trace}(\overline{\mathbf{u}' \otimes \mathbf{u}'}) \mathbf{I} = -\eta_T (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)^2 \quad (8)$$

όπου η_T το ιξώδες δίνης Boussinesq, \mathbf{I} ο μοναδιαίος τανυστής, και $\max(\lambda_a)$ η μέγιστη ιδιοτιμή του τανυστή ρυθμού παραμόρφωσης.

Η τυρβώδης θερμική αγωγιμότητα, k_T , είναι ανάλογη του ιξώδους δίνης Boussinesq:

$$k_T = C_{p,f} \eta_T / \text{Pr}_T \quad (9)$$

όπου Pr_T είναι ο τυρβώδης αριθμός Prandtl, ο οποίος, στην περίπτωση μας, είναι 0.85. Η διαφορά πίεσης στα άκρα του σωλήνα ποικίλλει από 10 έως 100 Pa ενώ η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού είναι 348 K. Η συνοριακή συνθήκη μη-ολίσθησης εφαρμόζεται στις ταχύτητες πολύ κοντά στον τοίχο. Οι απώλειες τριβής ρευστού-τοιχώματος και οι θερμοκρασιακές κατανομές κοντά στον τοίχο υπολογίστηκαν με την χρήση λογαριθμικών συναρτήσεων τοίχου. Η συνοριακή συνθήκη μηδενικής κλίσης εφαρμόζεται σε όλες τις μεταβλητές στην έξοδο του σωλήνα και στον άξονα συμμετρίας της γεωμετρίας. Οι φυσικές ιδιότητες του στερεού και του ρευστού, υπολογισμένες σε 348 K, δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Φυσικές ιδιότητες του νερού και του αλουμινίου σε θερμοκρασία 348 K

Πυκνότητα νερού ρ_f (kg / m ³)	971.8
Δυναμικό ιξώδες νερού η_f (Pa·s)	3.6 10 ⁻⁴
Θερμική αγωγιμότητα νερού k_f (W/ (m·K))	0.6984
Θερμοχωρητικότητα νερού $C_{p,f}$ (J/ (kg·K))	4200
Θερμική αγωγιμότητα αλουμινίου k_s (W/ (m·K))	160

Η αποδοτικότητα του συστήματος ψύξης ποσοτικοποιείται με τον υπολογισμό του ρυθμού παραγωγής εντροπίας. Οι ρυθμοί παραγωγής εντροπίας στο στερεό και στο ρευστό είναι [3],

$$\dot{S}_s = \int_{V_s} \frac{k_s}{T_s^2} (\nabla T_s)^2 dV \quad (10a)$$

$$\dot{S}_f = \sum_i \int_{V_f} \frac{k_f}{T_f^2} (\nabla T_f)^2 dV + \sum_i \int_{V_f} \frac{\eta_f}{T_f} 2 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 dV + \sum_{i,j} \int_{V_f} \frac{\eta_f}{T_f} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 dV + \int_{V_f} \frac{\rho_f \varepsilon}{T_f} dV \quad (10b)$$

όπου V_s και V_f είναι ο όγκος του στερεού και του ρευστού, αντίστοιχα. Οι δείκτες i και j στην εξίσωση (10b) αντιστοιχούν στις διευθύνσεις του συστήματος των χωρικών συντεταγμένων.

Το υπολογιστικό πλέγμα είναι μη δομημένο, αποτελούμενο από τριγωνικά στοιχεία και δημιουργήθηκε με χρήση ενός τροποποιημένου αλγόριθμου Delaunay. Ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων που αποτελούν το πλέγμα ποικίλει, ανάλογα με το πλήθος των εσωτερικών πτερυγίων του σωλήνα: από 347511 στοιχεία για την περίπτωση 5 πτερυγίων, σε 434077 για την περίπτωση 10 πτερυγίων. Οι εξισώσεις κίνησης επιλύθηκαν με μια μικτή μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων κατά Galerkin [4], δηλαδή υψηλότερης τάξης συναρτήσεις βάσης χρησιμοποιήθηκαν για την προσέγγιση του πεδίου ταχυτήτων και χαμηλότερης τάξης για την πίεση. Το πεδίο ταχυτήτων, η τυρβώδης κινητική ενέργεια, ο ρυθμός σκέδασης τυρβώδους κινητικής ενέργειας και τα θερμοκρασιακά πεδία προσεγγίστηκαν με τη χρήση διωνυμικών στοιχείων Lagrange, ενώ γραμμικά στοιχεία Lagrange χρησιμοποιήθηκαν για την προσέγγιση της πίεσης. Οι υπολογισμοί έγιναν με τον εμπορικό υπολογιστικό κώδικα COMSOL Multiphysics® στην 32 Gflops υπολογιστική συστοιχία Arion του Υπολογιστικού Κέντρου της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση μεταβάλλοντας τη διαφορά πίεσης στα άκρα του σωλήνα (ΔP), που είναι η κυριότερη λειτουργική μεταβλητή καθώς και το πλήθος των εσωτερικών πτερυγίων του σωλήνα, το οποίο είναι το χαρακτηριστικότερο γεωμετρικό μέγεθος για την εξεταζόμενη διαμόρφωση. Στόχος είναι η ρεαλιστική προσομοίωση της λειτουργίας του ψυκτικού σωλήνα και η περιγραφή με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια, σημαντικών μεγεθών για τη λειτουργία του συστήματος ψύξης, όπως η μέση θερμοκρασία της συγκεντρωτικής Φ/Β κυψελίδας και η μέση θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού ρευστού. Τα αποτελέσματα του προτύπου επικυρώνονται μέσω της σύγκρισης του προβλεφθέντος αριθμού Nusselt με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για διαμορφώσεις με παρόμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Τέλος, αναζητούνται οι θερμοδυναμικά βέλτιστες παράμετροι λειτουργίας, όπως το πλήθος των εσωτερικών πτερυγίων και η διαφορά πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου. Η αντικειμενική συνάρτηση “κόστους” είναι ο ολικός ρυθμός παραγωγής εντροπίας, το ελάχιστο της οποίας αντιστοιχεί στην ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών λόγω αναντιστρεπτοτήτων.

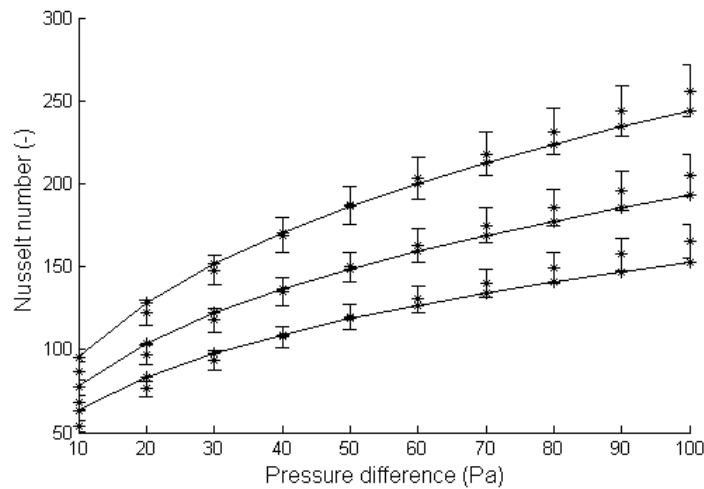
Όπως είναι γνωστό, ο αριθμός Nusselt χαρακτηρίζει τη μεταφορά θερμότητας μέσω της διεπιφάνειας ενός ρευστού με ένα στερεό, και ορίζεται ως το πηλίκο της αντίστασης μεταφοράς θερμότητας μέσα στο ρευστό προς την αντίσταση μεταφοράς θερμότητας στη διεπιφάνεια εναλλαγής θερμότητας ρευστού-στερεού. Το Σχήμα 2 απεικονίζει τη σύγκριση του αριθμού Nusselt που προβλέπει το προτεινόμενο πρότυπο με τα πειραματικά στοιχεία των Said και Trupp [5]. Για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt ακολουθήθηκε μία διαδικασία με δύο στάδια. Αρχικά, υπολογίζεται ο συντελεστής τριβής, f , χρησιμοποιώντας την εξίσωση (11):

$$f = \frac{4r_0 \rho_f \alpha_f^2}{\dot{m}_f^2} \left(-\frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (11)$$

όπου r_0 είναι η εσωτερική ακτίνα του σωλήνα, α_f είναι η επιφάνεια ροής στο σωλήνα με εσωτερικά πτερύγια και \dot{m}_f είναι η μαζική παροχή του ρευστού. Ο συντελεστής τριβής, f , συσχετίζεται με τον αριθμό Nusselt αξιοποιώντας την αναλογία Chilton- Colburn μεταξύ της μεταφοράς ορμής και θερμότητας. Η συναρτησιακή μορφή της συσχέτισης που προκύπτει ως αποτέλεσμα της ακολουθούμενης διαδικασίας είναι:

$$Nu = \alpha Re^b Pr_f^{0.4}, \quad Re = (2r_0 \dot{m}_f)/(\eta_f \alpha_f), \quad Pr_f = (\eta_f C_{p,f})/k_f \quad (12)$$

όπου Re και Pr_f είναι οι αδιάστατοι αριθμοί Reynolds και Prandtl, αντίστοιχα, ενώ οι παράμετροι α και β εξαρτώνται μόνο από το πλήθος των εσωτερικών πτερυγίων, n , σύμφωνα με τις σχέσεις

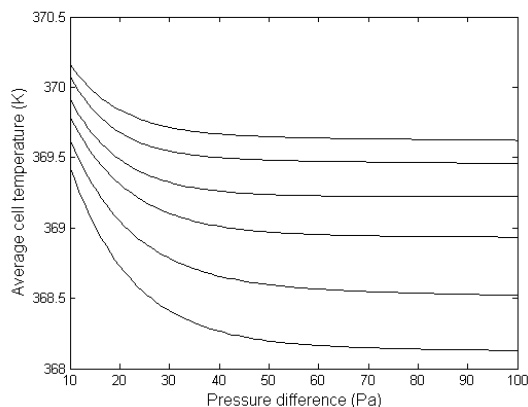


Σχήμα 2. Σύγκριση των προβλεφθέντων αριθμών Nusselt (συνεχής γραμμή) με τα πειραματικά δεδομένα των Said και Trupp [5] με μέση απόκλιση 6.1% για 5, 7 και 9 εσωτερικά πτερύγια, όπου το πλήθος των πτερυγίων αυξάνεται από κάτω προς τα πάνω.

$$\beta = 0.775 - 0.017n \quad (13a)$$

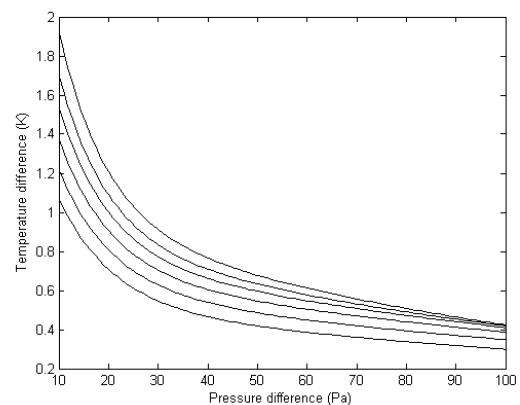
$$\alpha = (0.135 - 0.011n)\exp(0.274n) \quad (13b)$$

Σημαντικές γεωμετρικές ποσότητες είναι ο λόγος του ύψους πτερυγίων προς την εσωτερική ακτίνα και ο λόγος της μέσης απόστασης των πτερυγίων προς την ισοδύναμη υδραυλική διάμετρο. Η πρώτη γεωμετρική ποσότητα κυμαίνεται μεταξύ 0.2 και 0.8 στους Said και Trupp, ενώ στο υπό μελέτη σύστημα είναι σταθερή και ίση με 0.61. Ο λόγος της μέσης απόστασης μεταξύ των πτερυγίων προς την ισοδύναμη υδραυλική διάμετρο κυμαίνεται μεταξύ 0.31 και 0.77 στους Said και Trupp ενώ στο σύστημά μας μεταβάλλεται μεταξύ 1.31, για 5 πτερύγια, και 0.56, για 10 πτερύγια. Η μέση απόκλιση των πειραματικών δεδομένων



Σχήμα 3. Επίδραση της διαφοράς πίεσης στην μέση θερμοκρασία της Φ/Β κυψελίδας.

Το πλήθος των εσωτερικών πτερυγίων αυξάνεται από πάνω προς τα κάτω, παίρνοντας τιμές από 5 έως 10 πτερύγια.

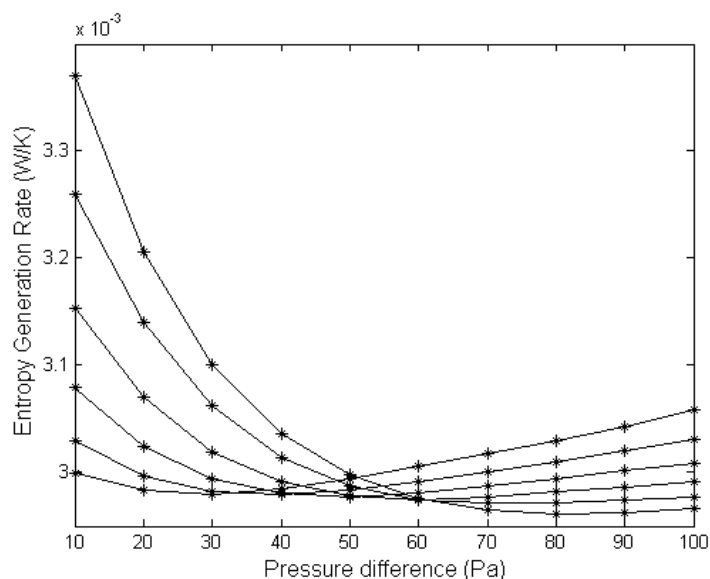


Σχήμα 4. Επίδραση της διαφοράς πίεσης στην άνοδο της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού. Το πλήθος των εσωτερικών πτερυγίων αυξάνεται από πάνω προς τα κάτω, κυμαινόμενος από 5 έως 10 πτερύγια.

είναι 6.1%. Διαπιστώνεται, συνεπώς, ικανοποιητική συμφωνία του προτεινόμενου προτύπου με τις πειραματικές μετρήσεις. Η μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας της συγκεντρωτικής Φ/Β κυψελίδας συναρτήσει της διαφοράς πίεσης στα άκρα του σωλήνα (ΔP) και του πλήθους των πτερυγίων απεικονίζεται στο Σχήμα 3. Σημειώνεται ότι, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, η μέση θερμοκρασία λειτουργίας της κυψελίδας πρέπει να διατηρηθεί χαμηλότερη από 369.5 K.

Αυτό επιτυγχάνεται μόνο όταν χρησιμοποιούνται περισσότερα από 6 πτερύγια στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα. Για ΔP μικρότερα από περίπου 40 Pa, παρατηρείται μία απότομη μείωση της μέσης θερμοκρασίας όταν αυξάνεται η διαφορά πίεσης. Η μέση θερμοκρασία της Φ/Β κυψελίδας φθάνει σε μια σταθερή τιμή για μεγάλα ΔP , διαφορετική για κάθε πλήθος πτερυγίων. Περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας της Φ/Β κυψελίδας είναι εφικτή μόνο μέσω της αύξησης της διαθέσιμης επιφάνειας για εναλλαγή θερμότητας με το ρευστό, δηλαδή με την προσθήκη περισσότερων εσωτερικών πτερυγίων δεδομένου ότι οι διαστάσεις τους διατηρούνται σταθερές.

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ εισόδου και εξόδου του ρευστού για μια σειρά διαφορών πίεσης στα άκρα του σωλήνα και πλήθους των εσωτερικών πτερυγίων. Η αύξηση του ΔP οδηγεί σε μικρότερη μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού, για μια δεδομένη γεωμετρική διαμόρφωση. Ο ρυθμός απομάκρυνσης θερμότητας από το σύστημα είναι μια μονότονη αύξουσα συνάρτηση του ΔP , δεδομένου ότι η ροή θερμότητας προς το σύστημα είναι σταθερή, ίση με 45 W. Η αντίστοιχη μέση θερμοκρασία κυψελίδας μειώνεται όταν αυξάνεται η διαφορά πίεσης (Σχήμα 3). Αυτές οι παρατηρήσεις σε συνδυασμό με το γεγονός ότι ο ρυθμός απομάκρυνσης θερμότητας είναι ανάλογος της μαζικής παροχής του ψυκτικού ρευστού υποδηλώνουν ότι η αύξηση του συνολικού ρυθμού απομάκρυνσης θερμότητας από το σύστημα οφείλεται στο μικρότερο χρόνο παραμονής του ψυκτικού ρευστού μέσα στο σωλήνα. Η μείωση είναι μεγαλύτερη στην περιοχή των μικρών ΔP (μικρότερων από 30 Pa). Το ολοκληρωμένο σύστημα τρι-παραγωγής απαιτεί την υψηλότερη δυνατή θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού ρευστού επειδή το ρευστό θα χρησιμοποιηθεί ως πηγή θερμότητας σε επόμενες διεργασίες. Αυτή η απαίτηση προτείνει τη χαμηλότερη δυνατή διαφορά πίεσης αλλά είναι αντίθετη με τον περιορισμό της χαμηλής μέσης θερμοκρασίας της συγκεντρωτικής κυψελίδας.



Σχήμα 5. Επίδραση της διαφοράς πίεσης και του πλήθους των εσωτερικών πτερυγίων στον ρυθμό παραγωγής εντροπίας. Ο αριθμός των εσωτερικών πτερυγίων αυξάνεται από κάτω προς τα πάνω στο αριστερό μέρος του σχήματος, και κυμαίνεται από 5 έως 10 πτερύγια.

Ο προβλεπόμενος ρυθμός παραγωγής εντροπίας ως συνάρτηση της διαφοράς πίεσης στα άκρα του σωλήνα και του πλήθους των εσωτερικών πτερυγίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.

Ο ρυθμός παραγωγής εντροπίας είναι μια κυρτή συνάρτηση της διαφοράς πίεσης, για δεδομένη γεωμετρική διαμόρφωση. Υπάρχει ένα ελάχιστο του ρυθμού παραγωγής εντροπίας όπου η εναλλαγή θερμότητας πραγματοποιείται στις βέλτιστες θερμοδυναμικές συνθήκες. Ωστόσο, πρέπει να ικανοποιούνται οι λειτουργικοί περιορισμοί που επιβάλλονται στο σύστημα, δηλαδή στη μέση θερμοκρασία της κυψελίδας και στη θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού ρευστού. Στην πράξη, όταν το σύστημα λειτουργεί πριν από το θερμοδυναμικό ελάχιστο, οι περισσότερες από τις αναντιστρεπτότητες οφείλονται στη μεταφορά θερμότητας, και προκαλούν μεγαλύτερες ανομοιομορφίες της κατανομής θερμοκρασίας. Όταν το σύστημα λειτουργεί μετά από το ελάχιστο, οι ενεργειακές απώλειες λόγω της μεταφοράς θερμότητας είναι μικρές σε σχέση με τις απώλειες λόγω τριβής. Συνεπώς, το ελάχιστο της συνάρτησης του ρυθμού παραγωγής εντροπίας είναι το αποτέλεσμα αντιστάθμισης μεταξύ των απωλειών λόγω τριβής και των απωλειών λόγω μεταφοράς θερμότητας. Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα του αλουμινίου συντελεί ώστε οι αναντιστρεπτότητες λόγω της αγωγής θερμότητας στο σωλήνα να έχουν μια σημαντική συμβολή στο συνολικό ρυθμό παραγωγής εντροπίας, επιταχύνοντας το ρυθμό με τον οποίο η εντροπία μειώνεται πριν από το ελάχιστο. Αύξηση της διαφοράς πίεσης ενισχύει τη μαζική παροχή του ρευστού και εντείνει τις τάσεις Reynolds, οδηγώντας σε απότομες αλλαγές στα αριστερά των θερμοδυναμικών βέλτιστων και ομαλότερες στα δεξιά. Επιπλέον, η χρήση περισσότερων πτερυγίων στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα οδηγεί σε πιο απότομες αλλαγές στα δεξιά των θερμοδυναμικών βέλτιστων και ομαλότερες στα αριστερά. Τα συμπεράσματα αυτά συμφωνούν με σχετικές θεωρητικές και πειραματικές μελέτες [6,7].

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει ένα λεπτομερές τρισδιάστατο πρότυπο στοχεύοντας στο να περιγράψει με ακρίβεια τα θερμικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος ψύξης για προηγμένες Φ/Β κυψελίδες συγκεντρωτικού τύπου. Η γεωμετρία του συστήματος ψύξης είναι περίπλοκη, λόγω της ύπαρξης εσωτερικών πτερυγίων και της ανώμαλης εξωτερικής επιφάνειάς του. Ο υπολογισμός του πεδίου ταχυτήτων βασίστηκε στο Realizable $k - \varepsilon$ πρότυπο τύρβης, ενώ η εκτίμηση των θερμικών χαρακτηριστικών του συστήματος πραγματοποιείται με την επίλυση του συζευγμένου προβλήματος μεταφοράς θερμότητας. Πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση των κυριότερων γεωμετρικών και λειτουργικών παραμέτρων, δηλαδή του πλήθους των εσωτερικών πτερυγίων και της διαφοράς πίεσης, αντίστοιχα. Το σύστημα ψύξης που εξετάζεται είναι μέρος ενός ολοκληρωμένου συστήματος τρι-παραγωγής ενέργειας. Το πρότυπο λύνεται με μια μικτή μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων κατά Galerkin και ο αριθμός Nusselt που προκύπτει, συγκρίνεται με διαθέσιμα πειραματικά στοιχεία [5]. Υπάρχει ποιοτική συμφωνία με τα δεδομένα για όλη τη σειρά των διαφορών πίεσης και το πλήθος των εσωτερικών πτερυγίων. Ο αριθμός Nusselt συσχετίζεται επίσης με τους αδιάστατους αριθμούς Reynolds και Prandtl. Οι προβλέψεις γίνονται για τη μέση θερμοκρασία της Φ/Β κυψελίδας και την άνοδο της θερμοκρασίας εισόδου του ψυκτικού ρευστού. Η μέση θερμοκρασία λειτουργίας της κυψελίδας διατηρείται κάτω από 369.5 K μόνο όταν υπάρχουν περισσότερα από 6 πτερύγια στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα και η διαφορά πίεσης είναι υψηλότερη από 40 Pa. Η μέση θερμοκρασία της κυψελίδας φθάνει μία σταθερή τιμή για μεγάλες διαφορές πίεσης, ανεξάρτητα από το πλήθος των εσωτερικών πτερυγίων. Η αύξηση της διαφοράς πίεσης οδηγεί σε μικρότερη άνοδο της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού, για μια δεδομένη γεωμετρική διαμόρφωση. Η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου είναι μεγαλύτερη στην περιοχή των μικρών διαφορών πίεσεων, δηλ. για λιγότερο από 30 Pa. Συμπεραίνεται ότι ο κώδικας υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι ένα αποτελεσματικό και

αξιόπιστο εργαλείο για τον υπολογισμό του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας, καθώς και της πτώσης πίεσης.

Επίσης, καθορίζονται βέλτιστα “παράθυρα λειτουργίας”, διαφοράς πίεσης – πλήθους περυγίων ελαχιστοποιώντας τις αντιστρεπτότητες στη λειτουργία του συστήματος ψύξης. Ωστόσο, η βέλτιστη λειτουργία του συστήματος ψύξης σύμφωνα με αυτήν την μέθοδο δεν εγγυάται ότι είτε η Φ/Β κυψελίδα, είτε ολόκληρο το σύστημα τρι-παραγωγής λειτουργεί αποτελεσματικά.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Μέτρου 8.3 του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα Γ’ Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης και συγχρηματοδοτείται κατά 80% της Δημόσιας Δαπάνης από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο και κατά 20% της Δημόσιας Δαπάνης από το Ελληνικό Δημόσιο – Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Hernandez-Santoyo J. and Sanchez-Cifuentes A., Trigeneration: an alternative for energy savings. *Applied Energy*, 76 (2003) 219-227
- [2] Wilcox D.C., *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries, 2006
- [3] Bejan A., *Entropy Generation Minimization*, CRC Press, 1996
- [4] Zienkiewicz O.C. and Taylor R.L., *The Finite Element Method: Fluid Dynamics*, Butterworth-Heinemann, 2000
- [5] Said M.N.A. and A.C. Trupp, Predictions of turbulent flow and heat transfer in internally finned tubes. *Chemical Engineering Communications*, 31 (1984) 65-99
- [6] Balaji C., Holling M., Herwig H., Entropy generation minimization in turbulent mixed convection flows. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 34 (2007) 544–552
- [7] Sahiti N., Krasniqi F., Fejzullahu Xh., Bunjaku J., Muriqi A., Entropy generation minimization of a double-pipe pin fin heat exchanger. *Applied Thermal Engineering* 28 (2008) 2337–2344

ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Π. Θέμελης και Ι. Τρυπαναγνωστόπουλος

Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 26500
Τηλ: 2610 997472, e-mail: yiantrip@physics.upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή αναφέρεται σε πειραματική διερεύνηση της βελτίωσης στην ηλεκτρική απόδοση φωτοβολταϊκών που ψύχονται με φυσική ροή αέρα διαμέσου αεραγωγού τοποθετημένου στην πίσω πλευρά τους. Εξετάζονται δυνατότητες αύξησης της εναλλαγής θερμότητας με την προσθήκη ενδιάμεσου μεταλλικού φύλλου (TMS) και με μεταλλικά πτερύγια (FIN) κατά μήκος του αεραγωγού. Η πειραματική μελέτη έγινε στο εργαστήριο ηλιακής ενέργειας του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών και χρησιμοποιήθηκαν φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου τοποθετημένα κατά μήκος σε μια σειρά, τα οποία διαμόρφωσαν μια μικρή εξομοιωτική εγκατάσταση επικλινούς στέγης κτιρίου. Τα πειράματα αφορούσαν λειτουργία της μικρής φωτοβολταϊκής μονάδας με φυσικό ηλιασμό και καταγραφή των διαφορών παραμέτρων προσδιορισμού της ηλεκτρικής και θερμικής συμπεριφοράς της. Παρατίθεται περιγραφή της πειραματικής διάταξης και παρουσιάζονται διαγράμματα πειραματικών αποτελεσμάτων όσον αφορά την θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών, την ηλεκτρική απόδοση της εγκατάστασης, την θερμοκρασία του τοίχου του αεραγωγού και την διαφορά θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου του αέρα στον αεραγωγό. Μελετήθηκαν οι περιπτώσεις λειτουργίας της διάταξης με τον αεραγωγό ερμητικά κλειστό, ανοιχτό χωρίς καμία βελτιωτική προσθήκη, με το ενδιάμεσο λεπτό μεταλλικό φύλλο (TMS) και με ανεπτυγμένα κατά μήκος της βάσης του μεταλλικά πτερύγια (FIN). Από τα αποτελέσματα προκύπτει βελτίωση στην ηλεκτρική απόδοση των φωτοβολταϊκών λόγω μείωσης της θερμοκρασίας τους από την απαγωγή θερμότητας με τη φυσική κυκλοφορία του αέρα, η οποία είναι αυξημένη για τις δύο περιπτώσεις προσθετικών στοιχείων (TMS και FIN) στον αεραγωγό. Στην εργασία αυτή μελετήθηκε επίσης και το ενεργειακό όφελος σε ηλεκτρισμό από μια ευρεία εφαρμογή των φωτοβολταϊκών στα σχολικά κτίρια της Ελλάδας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια ενδιαφέρουσα διάταξη φωτοβολταϊκών συλλεκτών με ειδικό ενδιαφέρον για τις κτιριακές εφαρμογές είναι η διάταξη υβριδικών φωτοβολταϊκών θερμικών συλλεκτών (PV/T). Τα συστήματα PV/T μπορούν ταυτόχρονα να παρέχουν τόσο ηλεκτρική όσο και θερμική ενέργεια. Σκοπός τους είναι να πετύχουν ψύξη του φωτοβολταϊκού συλλέκτη και να βελτιώσουν την ηλεκτρική του απόδοση. Η αρχή σχεδίασής τους είναι η χρήση του φωτοβολταϊκού πλαισίου ως απορροφητή θερμικού ηλιακού συλλέκτη, ώστε να αξιοποιείται η εξαγόμενη θερμότητα από το φβ συλλέκτη με ένα κυκλοφορούν ρευστό (νερό, αέρας), το οποίο να χρησιμοποιηθεί για τις θερμικές ανάγκες του κτηρίου πάνω στο οποίο υπάρχει η εγκατάσταση του συλλέκτη PV/T. Δύο είναι οι κύριοι τύποι συστημάτων PV/T'' ο τύπος PV/T με χρήση νερού (PVT/WATER) και ο τύπος PV/T με χρήση αέρα (PVT/AIR).

Στις συσκευές PVT/AIR (Σχ. 1) περιλαμβάνεται ένας κατάλληλα κατασκευασμένος αεραγωγός που εφαρμόζεται συνήθως κάτω από το επίπεδο της επιφανείας απορρόφησης πάνω στην οποία βρίσκονται οι φωτοβολταϊκές κυψελίδες, ή είναι απλά το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Ο

αέρας μπορεί να κυκλοφορεί είτε με εξαναγκασμένη ροή (με χρήση αεραντλίας ή ανεμιστήρα) είτε με φυσική ροή καθορίζοντας έτσι δυο διαφορετικούς τύπους (PVT/AIR forced flow, PVT/AIR natural flow) ηλιακών συσκευών. Η φυσική κυκλοφορία του αέρα-ρευστού συνιστά μια απλή και χαμηλού κόστους μέθοδο απαγωγής θερμότητας, αλλά έχει μικρότερη απόδοση. Από την άλλη, η εξαναγκασμένη κυκλοφορία του αέρα-ρευστού παρά το ότι η θερμική της απόδοση είναι μεγαλύτερη, απαιτεί πρόσθετη ηλεκτρική ενέργεια για την τροφοδοσία μιας αντλίας ή ενός ανεμιστήρα, γεγονός που ελαττώνει την ηλεκτρική απόδοση της εγκατάστασης [1, 2]. Επίσης όταν το βάθος του καναλιού είναι σχετικά μικρό και η ταχύτητα ροής του ρευστού μεγαλύτερη, έχουμε αύξηση της θερμικής αποδοτικότητας αλλά στην εξαναγκασμένη ροή αυτό οδηγεί σε αύξηση της διαφοράς πίεσης. Η αυξημένη διάφορα πίεσης που δημιουργείται έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει η αντλία ή ο ανεμιστήρας και επομένως πτώση της ηλεκτρικής απόδοσης της όλης διάταξης.



Σχήμα 1. Τυπικό σύστημα PV/T τύπου αέρα (PVT/AIR)

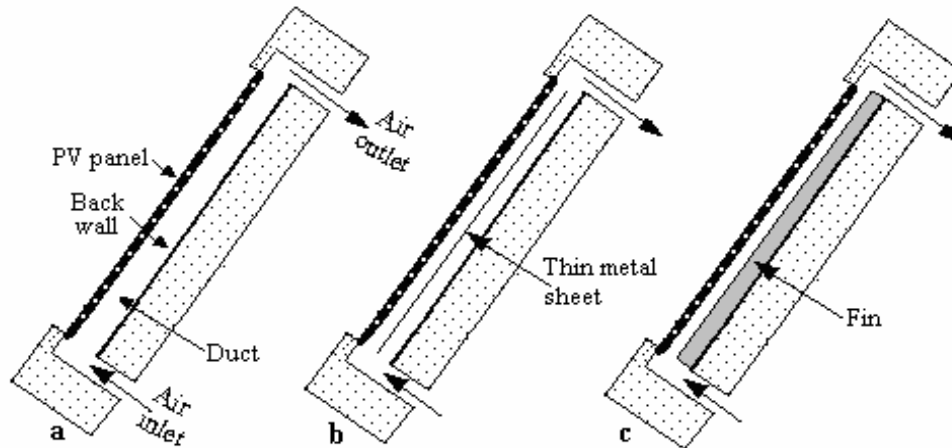
Όλα αυτά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι στην περίπτωση της εξαναγκασμένης ροής του αέρα-ρευστού για την σωστή εκτίμηση του καθαρού ενεργειακού κέρδους θα πρέπει να συνυπολογίζεται πάντα και η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται για την επίτευξη της.

Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς συναρτάται και από την θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συλλεκτών και είναι μεγαλύτερη όταν η θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι μικρότερη σε δοσμένες συνθήκες έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας και ταχύτητας άνεμου. Η απαίτηση για χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας των PV οδηγεί στην απαίτηση ο αέρας-ρευστό να είναι πολύ χαμηλότερης θερμοκρασίας από αυτά και για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται μεγαλύτερη ταχύτητα ροής του. Όμως αυτό με την σειρά του έχει σαν αποτέλεσμα την ελάττωση του θερμικού κέρδους της εγκατάστασης αφού η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού θα είναι μικρότερη.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ

Η πειραματική εγκατάσταση περιελάμβανε τρία φβ πλαίσια, τύπου pc-Si (πολυκρυσταλλικό πυρίτιο), μήκους 1m και ενεργού επιφάνειας 0,4 m² το καθένα και τοποθετημένα σε σειρά κατά μήκος, διαμορφώνοντας μια επίμηκη εγκατάσταση 3m. Τα φωτοβολταϊκά τοποθετήθηκαν με κλίση 40° πάνω σε μεταλλική κυλιόμενη βάση. Κάτω από την επιφάνεια της κατά μήκος διάταξης των φωτοβολταϊκών, διαμορφώθηκε αεραγωγός σχήματος παραλληλεπίπεδου, κατασκευασμένος από μονωτικές πλάκες πάχους 3cm. Ο αεραγωγός που δημιουργήθηκε με τον τρόπο αυτό είχε πλάτος 41cm και ύψος 17cm. Η συσκευή αυτή ήταν η πιο απλή από τις τρεις συσκευές και αποτελούσε τη συσκευή αναφοράς (REF). Για τη διαμόρφωση της συσκευής με την απλή αύξηση της επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας εντός του αεραγωγού, χρησιμοποιήθηκε λεπτό φύλλο αλουμινίου (Thin Metal Sheet, TMS) που βάρθηκε μαύρο (για την απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας του φβ) και απλώθηκε κατά μήκος του αεραγωγού, χωρίζοντάς τον στη μέση ώστε ο αέρας να κυκλοφορήσει τόσο πάνω από αυτό όσο και από κάτω [1, 2]. Για τη διαμόρφωση της συσκευής με τα πτερύγια (FIN) χρησιμοποιήθηκε λεπτό φύλλο αλουμινίου και δημιουργήθηκαν 8 ανάστροφα Π πάνω σε ένα φύλλο

αλουμινίου και σε μια σειρά, με το καθένα να έχει πλάτος 5cm και ύψους 5cm ώστε ο αέρας που θα κυκλοφορούσε μέσα στον αεραγωγό να έρχεται σε επαφή με την επιφάνειά τους. Η διάταξη πτερυγίων βάφτηκε μαύρη (για την απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας του φβ) και τοποθετήθηκε στην εσωτερική πλευρά του αεραγωγού απέναντι από την σειρά των φβ πλαϊσίων. Οι τρεις τύποι των συσκευών PVT/AIR δείχνονται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2 Πλάγια όψη των τριών τύπων συσκευών PVT/AIR (a: REF, b: TMS, c: FIN)

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Αρχικά πραγματοποιήθηκε σειρά πειραμάτων στις εξής περιπτώσεις:

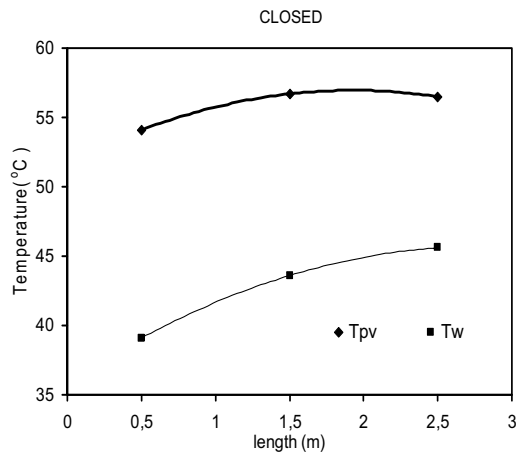
- Με τον αεραγωγό κλειστό (CLOSED).
- Με τον αεραγωγό ανοιχτό (REF).
- Με προσθήκη λεπτού μεταλλικού φύλλου στη μέση των αεραγωγών (TMS).
- Με προσθήκη πτερυγίων βάσης (FIN).

Στην σειρά των πειραμάτων αυτών μετρήθηκαν:

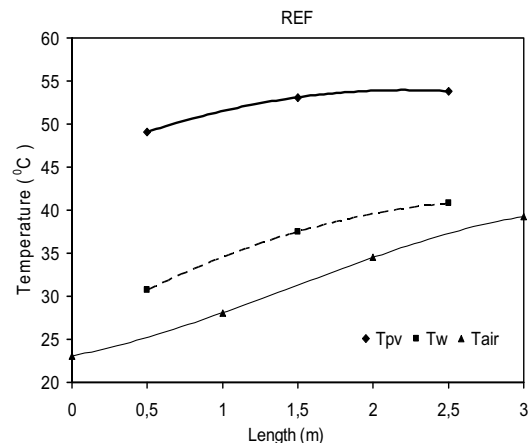
- Οι χαρακτηριστικές καμπύλες των φωτοβολταϊκών ξεχωριστά σε διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ηλιακής ακτινοβολίας και ανέμου.
- Οι θερμοκρασίες τόσο της φωτιζόμενης επιφάνειας όσο και της πίσω πλευράς των φωτοβολταϊκών.
- Οι θερμοκρασίες στον τοίχο των αεραγωγών.
- Οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του αέρα-ρευστού στους αεραγωγούς.

Για κάθε μια περίπτωση πραγματοποιήθηκαν πολλές σειρές πειραμάτων, μετρώντας τις παραμέτρους: ένταση ηλιακής ακτινοβολίας G , θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a , θερμοκρασία συλλεκτών T_{rn} , θερμοκρασία μονωτικού τοίχου T_w του αεραγωγού, θερμοκρασία εισόδου του αέρα στον αεραγωγό T_{in} και η θερμοκρασία εξόδου του αέρα T_{out} . Πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις κατά την διάρκεια της ημέρας υπήρχε φροντίδα ώστε η φωτιζόμενη επιφάνεια των φωτοβολταϊκών να είναι σταθερά προσανατολισμένη προς τον ήλιο.

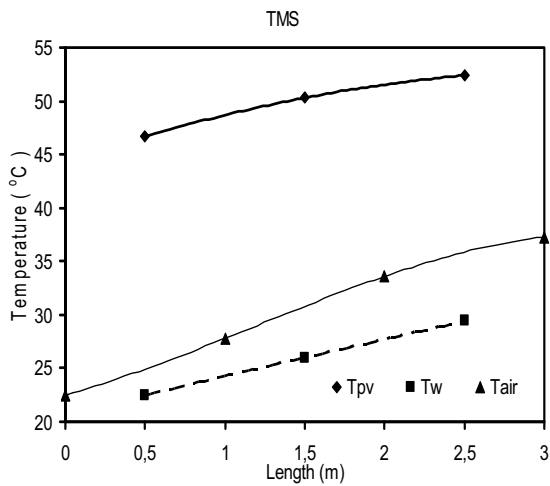
Η μελέτη των τριών συσκευών έγινε ξεχωριστά και για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων λήφθηκαν οι μετρήσεις που έγιναν κάτω από παρόμοιες συνθήκες ηλιασμού (Σχήματα 3-6). Θα ήταν βέβαια καλύτερα να υπήρχαν διαφορετικές κατασκευές για κάθε μια από τις περιπτώσεις (REF, TMS και FIN), οι οποίες και να τοποθετούνταν παράλληλα σε ακριβώς ίδιες συνθήκες, αλλά αυτή η δυνατότητα δεν μπορούσε να υλοποιηθεί στα πλαίσια αυτής της εργασίας για οικονομικούς λόγους.



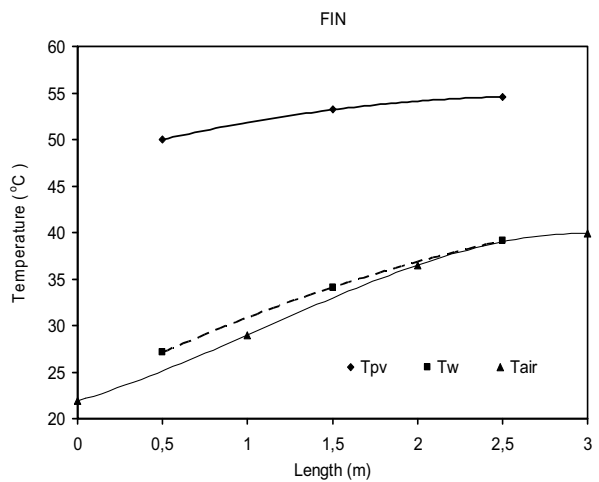
ΣΧΗΜΑ 3: Θερμοκρασία φβ και τοίχου κατά μήκος της συσκευής για κλειστή διάταξη



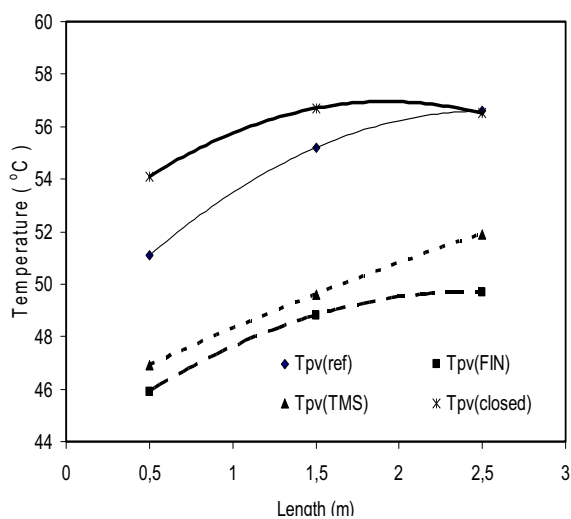
ΣΧΗΜΑ 4: Θερμοκρασία φβ, τοίχου και αέρα κατά μήκος της συσκευής για την περίπτωση REF



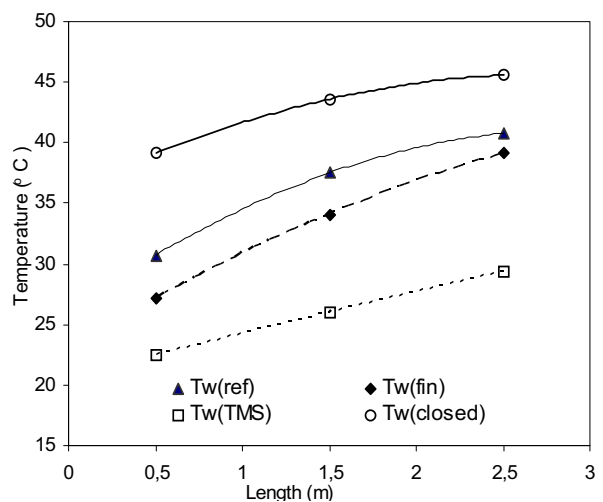
ΣΧΗΜΑ 5: Θερμοκρασία φβ, τοίχου και αέρα, κατά μήκος της συσκευής για την περίπτωση TMS.



ΣΧΗΜΑ 6: Θερμοκρασία φβ, τοίχου και αέρα, κατά μήκος της συσκευής για την περίπτωση FIN



ΣΧΗΜΑ 7: Σύγκριση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών κατά μήκος της πειραματικής διάταξης



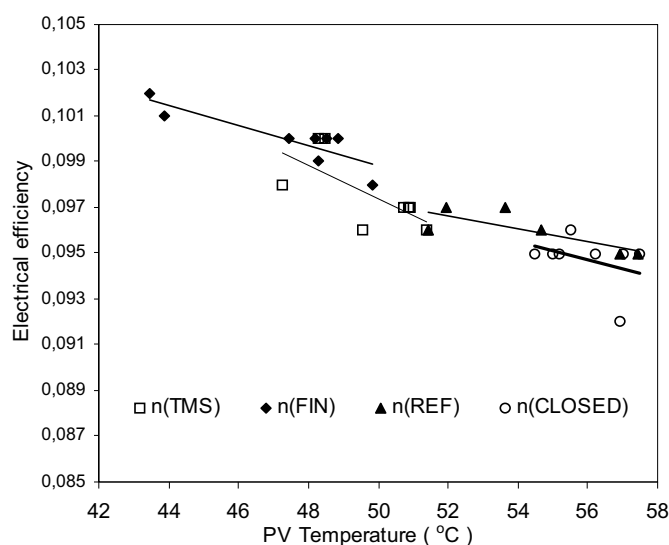
ΣΧΗΜΑ 8: Θερμοκρασία του τοίχου κατά μήκος της πειραματικής διάταξης στις περιπτώσεις CLOSED, REF, TMS και FIN

Έτσι από το σύνολο των μετρήσεων επελέγησαν οι μετρήσεις στις οποίες η πειραματική διάταξη βρισκόταν σε σχεδόν ίδιες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας (G), θερμοκρασίας περιβάλλοντος (T_a) και ταχύτητας πνέοντος ανέμου (u_w). Με την διαδικασία αυτή δημιουργήθηκαν διαγράμματα για την θερμοκρασία των φβ πλαισίων (T_{pv}), του τοίχου (T_w) και την ηλεκτρική απόδοση (η) σε κάθε περίπτωση, καθώς και συγκριτικά μεταξύ τους (Σχήματα 7-9).

Στη συνέχεια η υβριδική φβ/θ διάταξη των 3 m συγκρίθηκε με μια διάταξη μήκους 1 m, αλλά ίδιου τύπου φβ πλαισίου και με ίδια γωνία κλίσης, με τις φωτιζόμενες επιφάνειες των φωτοβολταϊκών παράλληλες ώστε να υπάρχουν κατά το δυνατόν ίδιες συνθήκες ηλιασμού και στα δύο (Σχήμα 10). Διεξήχθησαν ταυτόχρονα πειράματα και σε όλα υπήρξε φροντίδα ώστε οι διατάξεις να είναι προσανατολισμένες προς τον ήλιο. Τα πειράματα επανελήφθησαν σε διαφορετικές μέρες και δοκιμάστηκαν τόσο η απλή περίπτωση φβ/θ συσκευής (REF) όσο και η συσκευή με προσθήκη πτερυγίων (FIN). Στα πειράματα αυτά καταγράφονταν ταυτόχρονα οι θερμοκρασίες των φωτοβολταϊκών (τόσο στην φωτιζόμενη επιφάνεια τους όσο και πίσω από αυτήν), η θερμοκρασίες στον τοίχο του αεραγωγού, οι θερμοκρασίες του αέρα-ρευστού στην είσοδο και την έξοδο του αεραγωγού και οι χαρακτηριστικές I-V των φωτοβολταϊκών και στις δύο διατάξεις. Με τις μετρήσεις που πάρθηκαν καταστρώθηκαν πίνακες με την βοήθεια των οποίων πραγματοποιήθηκαν διαγράμματα παραδείγματα των οποίων βλέπουμε στα Σχήματα 11-12, που ακολουθούν.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΑ ΣΧΟΛΙΚΑ ΚΤΙΡΙΑ

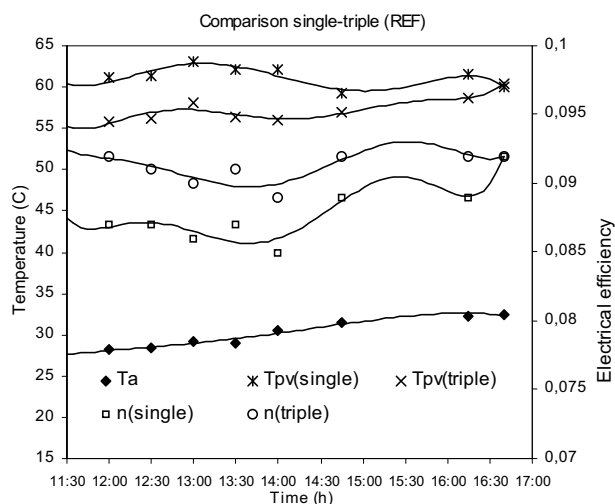
Η πρώτη εγκατάσταση μιας πλήρους και σχετικά μεγάλης φωτοβολταϊκής μονάδας σε σχολικό κτίριο έγινε το 1997 στο 5^ο Γυμνάσιο Νίκαιας (Αττική), με την μονάδα 4,5 kW στην στέγη του σχολικού κτιρίου. Η εγκατάσταση λειτουργεί χωρίς προβλήματα μέχρι και σήμερα, αποτελείται από 60 φβ πλαίσια κρυσταλλικού Si, με ισχύ 75W το καθένα, τοποθετημένα σε δύο παράλληλες σειρές, με νότιο προσανατολισμό και κλίση 40°. Με την βοήθεια έξι μετατροπέων (inverters) των 850W, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς διοχετεύεται στο δίκτυο της ΔΕΗ.



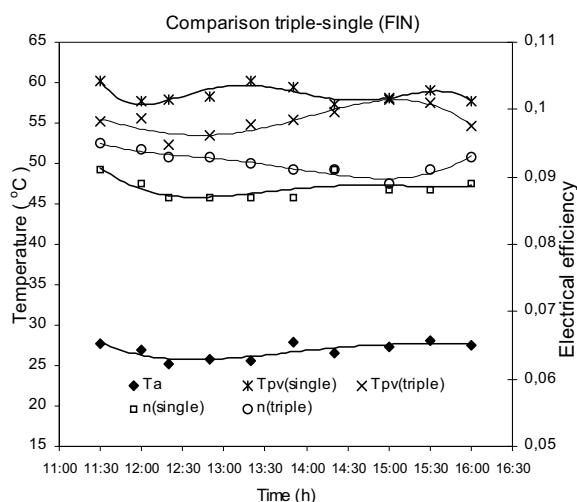
ΣΧΗΜΑ 9: Απόδοση της πειραματικής διάταξης στις περιπτώσεις CLOSED, REF, TMS και FIN



ΣΧΗΜΑ 10: Διατάξεις μονού (1m) και τριπλού (3m) συλλέκτη



ΣΧΗΜΑ 11: Θερμοκρασία του φβ και απόδοση της μονής (1m) και τριπλής (3m) διάταξης για την περίπτωση REF



ΣΧΗΜΑ 12: Θερμοκρασία του φβ και απόδοση της μονής (1m) και τριπλής (3m) διάταξης για την περίπτωση FIN

Η εμπειρία της εγκατάστασης αυτής στο 5^ο Γυμνάσιο Νίκαιας, ήταν ωφέλιμη σε πολλά επίπεδα:

- Καλύπτει περίπου το 25% των ηλεκτρικών αναγκών του σχολικού κτιρίου.
- Συμβάλλει καθοριστικά στην περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση των μαθητών.
- Έχει σημαντική συμβολή σε διδακτικό επίπεδο αφού το 5^ο Γυμνάσιο Νίκαιας έχει ενταχθεί σε ευρωπαϊκό δίκτυο ηλιακών σχολείων μέσω του οποίου ανταλλάσσει πολύτιμες εμπειρίες.

Σε ολόκληρη την Ελληνική επικράτεια υπάρχουν 18.145 δημόσια σχολικά κτίρια (Εθνική Στατιστική Υπηρεσία) και κατανέμονται κατά νομούς όπως φαίνεται στον περιεχόμενο πίνακα του Σχ. 13, όπου η πλειονότητά τους βρίσκεται στην περιοχή της Μακεδονίας, παρόλο που ο περισσότερος πληθυσμός της χώρας μας βρίσκεται στον νομό Αττικής. Εν τούτοις τα σχολικά κτίρια του νομού Αττικής είναι μεγαλύτερα σε έκταση και διαθέτουν μεγαλύτερες επιφάνειες στεγών [3]. Αν υποθέσουμε ότι θα μπορούσε να γίνει εγκατάσταση σε ένα ποσοστό 75%, τότε θα έχουμε ένα αριθμό 13.608 σχολικών κτιρίων.

Μια εγκατάσταση ισχύος 5 kW αποτελούμενη από φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου απαιτεί μια διαθέσιμη επιφάνεια 50 m² περίπου, την οποία φαίνεται να διαθέτουν όλα τα σχολικά κτίρια αφού διαθέτουν στέγες με επιφάνειες πάνω από 200 m². Υποθέτοντας λοιπόν μια εγκατάσταση ισχύος 5 kW σε καθένα από αυτά, φτάνουμε σε μια συνολική εγκατεστημένη ισχύ 63 MW, που είναι εξαπλάσια από την συνολικά εγκατεστημένη ισχύ (10 MW) φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα σήμερα. Για κάθε kW εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα τα φωτοβολταϊκά αποδίδουν περίπου 1200kWh ετησίως κατά μέσον όρο (στον χάρτη του Σχ. 13 δείχνεται η κατανομή της ετήσιας ηλιακής ενέργειας στις περιοχές της χώρας μας). Η συνολική ενεργειακή απόδοση μιας τέτοιας εγκατάστασης θα είναι 82 GWh ανά έτος, που αντιπροσωπεύει το 0,15% της ετήσιας ενεργειακής ζήτησης, ενώ η ενέργεια αυτή αντιστοιχεί σε εκπομπή 94 κιλοτόνων CO₂ στην ατμόσφαιρα αν θα παραγόταν με τον συμβατικό τρόπο καύσης υδρογονανθράκων.

Η παραγόμενη από τις εγκαταστάσεις αυτές ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να διοχετευτεί είτε στο τοπικό δίκτυο είτε στο εθνικό με κατάλληλους μετατροπείς (inverters). Πρέπει να επισημανθεί στο σημείο αυτό ότι κατά τους θερινούς μήνες που η ηλιοφάνεια είναι μεγάλη και ε-

ΘΡΑΚΗ	820
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	3698
ΘΕΣΣΑΛΙΑ	1452
ΗΠΕΙΡΟΣ	1085
ΙΟΝΙΑ ΝΗΣΙΑ	472
ΣΤΕΡΕΑ ΕΛΛΑΔΑ	1738
ΑΤΤΙΚΗ	2758
ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	2315
ΝΗΣΙΑ	2465
ΚΡΗΤΗ	1342
ΣΥΝΟΛΟ	18.145

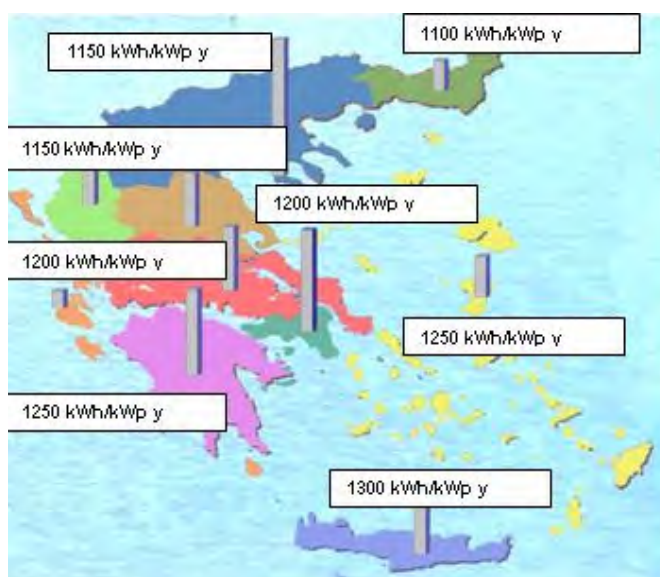
πομένως η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια θα είναι μεγαλύτερη, παρόλο που τα σχολεία δεν λειτουργούν, η ενέργεια αυτή θα είναι πολύ χρήσιμη γιατί μπορεί να καλύψει φορτία αιχμής από τη χρήση κλιματιστικών.

Οι στέγες των σχολικών κτιρίων είναι στην πλειονότητα τους επικλινείς κεραμοσκεπές (ιδίως οι πιο σύγχρονες κατασκευές) ενώ λίγες είναι επίπεδες-οριζόντιες (ταράτσες). Στην περίπτωση της εγκατάστασης φωτοβολταϊκής μονάδας σε κεραμοσκεπή η απαγωγή της θερμότητας από την πίσω πλάτη των συλλεκτών εμποδίζεται από τα μονωτικά υλικά που συνήθως υπάρχουν, με άμεσο αποτέλεσμα η θερμοκρασία τους να αυξάνεται (μπορεί να φτάσει και 70°C) και έτσι να λειτουργούν με μειωμένη ηλεκτρική απόδοση.

Μια φθηνή και αξιόπιστη λύση στην περίπτωση αυτή μπορούν να προσφέρουν τα υβριδικά PVT/AIR. Ο αέρας μπορεί να οδηγηθεί με φυσική ροή μέσα από το κανάλι ενός αεραγωγού στον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ της πίσω πλευράς των συλλεκτών και της κεραμοσκεπής, ώστε να απάγει την θερμότητα των συλλεκτών και να ελαττώσει την θερμοκρασία λειτουργίας τους. Ταυτόχρονα ο αέρας αυτός θα έχει ανεβάσει την θερμοκρασία του, έχοντας πάρει με την μορφή θερμότητας ένα μέρος της ηλιακής ενέργειας που δεν μετατράπηκε από την φωτοβολταϊκή εγκατάσταση σε ηλεκτρική.

Με κατάλληλο τρόπο θα μπορούσε ο αέρας αυτός να οδηγηθεί στο εσωτερικό του σχολικού κτιρίου ώστε η θερμική ενέργεια που μεταφέρει να αξιοποιηθεί, κατά την χειμερινή περίοδο που είναι και η μεγαλύτερη χρονικά περίοδος λειτουργίας του σχολείου. Βέβαια κατά την διάρκεια των θερινών μηνών, όπου τα σχολεία δεν λειτουργούν, η θερμική αυτή ενέργεια του αέρα δεν είναι χρήσιμη και θα αποβάλλεται στο περιβάλλον ψύχοντας απλά τα φθ πλαίσια.

Η εγκατάσταση υβριδικού PVT/AIR φαίνεται να είναι προτιμότερη λύση σε σχέση με ένα σύστημα PVT/WATER. Οι σχολική δραστηριότητα δεν έχει πολλές απαιτήσεις σε ενέργεια με την μορφή ζεστού νερού κι έτσι η διοχέτευση της θερμικής ενέργειας στο νερό δεν φαίνεται να έχει ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον.



Σχήμα 13 Αριστερά: Κατανομή σχολικών κτιρίων στην Ελληνική Επικράτεια (Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδος). Δεξιά: Ηλιακό δυναμικό κατά περιοχή.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάστηκαν τρεις συσκευές υβριδικών φωτοβολταϊκών/θερμικών συλλεκτών αέρα, η μία ήταν η απλή συσκευή αναφοράς (REF) και οι άλλες δύο ήταν οι συσκευές με δύο βελτιωτικές προσθήκες μεταλλικών στοιχείων εντός του αεραγωγού. Η μία είχε ένα λεπτό φύλλο αλουμινίου στο μέσον του αεραγωγού (συσκευή TMS) και η δεύτερη περιείχε πτερύγια πάνω στον αεραγωγό και στην απέναντι του φβ πλαισίου επιφάνεια (συσκευή FIN). Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν πως με τις προτεινόμενες βελτιώσεις, κυρίως με τη συσκευή FIN, επιτυγχάνεται μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σχέση με το σύστημα αναφοράς και κατά συνέπεια βελτίωση της ηλεκτρικής απόδοσης. Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής θεωρήθηκαν ικανοποιητικά σε σχέση με την απλότητα των πρόσθετων στοιχείων στο αεραγωγό και πως μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν. Επίσης η τρίμετρη διάταξη έδωσε καλύτερα αποτελέσματα της απλής μονόμετρης, επιτυγχάνοντας καλύτερη μείωση της θερμοκρασίας του φβ και κατά συνέπεια μεγαλύτερη απόδοση. Μεταξύ των διαφόρων πιθανών εφαρμογών, υπολογίστηκε το ενεργειακό και περιβαλλοντικό όφελος από την ευρεία εφαρμογή των φωτοβολταϊκών στις σχολικές μονάδες της Ελλάδας. Παρά το μικρό του μέγεθος, το όφελος αυτό είναι ικανό να περιορίσει τυχόν προβλήματα υπερφόρτωσης του ηλεκτρικού δικτύου, ιδίως κατά τους θερινούς μήνες με την υπερβολική χρήση των κλιματιστικών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. J. K. Tonui and Y. Tripanagnostopoulos. "Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation". *Renewable Energy* 32, 623-637, (2007).
2. K. Tonui and Y. Tripanagnostopoulos. "Performance Improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation". *Solar Energy* 82, 1-12, (2008).
3. Y. Tripanagnostopoulos and P. Themelis. "The potential of effective PV application to schools in Greece" *International Workshop EPEQUB, Milos, Greece, 12-13 July (2007).*

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΧΩΡΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΣΕ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΚΛΙΜΑ

Β.Περράκη, και Α.Κοσκινάς

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Πατρών, 26110 Πάτρα, Ελλάς
Τηλ: +30 2610 994667 Fax: +30 2610 996811 email: perraki@ece.upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αυτή η εργασία αξιολογεί τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από πειραματική φωτοβολταϊκή εγκατάσταση που λειτουργεί στην οροφή του κτιρίου του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχ/κών & Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών, σε τόπο γεωγραφικού πλάτους 38° . Λαμβάνοντας υπόψη την ηλιακή ακτινοβολία, και τη γωνία κλίσης, αναλύονται οι φωτοβολταϊκές παράμετροι των πλαισίων μονοκρυσταλλικού, πολυκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου, καθώς και του δισελινιούχου ινδιούχου χαλκού CIS που καταδεικνύουν την πραγματική λειτουργία των φωτοβολταϊκών αυτών πλαισίων σε μια περιοχή με μεγάλες εντάσεις αέρα το χειμώνα και πολύ υψηλές θερμοκρασίες το καλοκαίρι. Φαίνεται η επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών στην αποδιδόμενη ισχύ και απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων στη συγκεκριμένη περιοχή.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

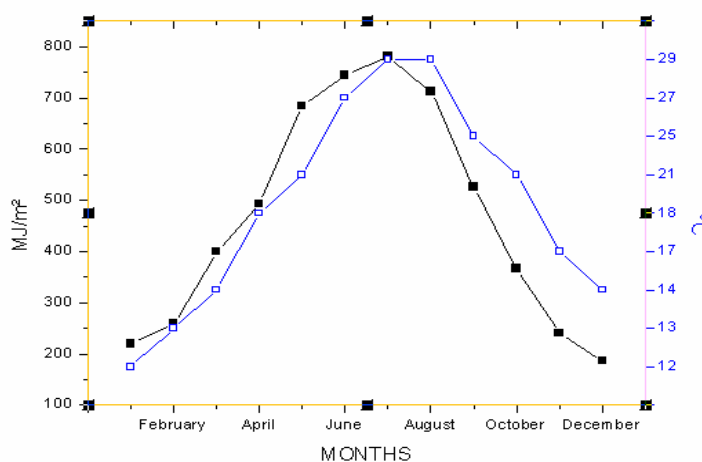
Για κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο που κυκλοφορεί στην αγορά δίδονται οι προδιαγραφές του υπό συνθήκες δοκιμής σταθερές (STC). Αυτές οι συνθήκες χρησιμοποιούνται για εργαστηριακές δοκιμές και τον έλεγχο της ποιότητας κατασκευής και αποκλειστικά για σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών κατασκευής. Συχνά και για διαφορετικούς λόγους, υπάρχει απόκλιση στις ονομαστικές από τις αληθείς τιμές. Όμως, υπό πραγματικές συνθήκες, λειτουργία όμοια με τις STC είναι σπάνια λόγω των ειδικών συνθηκών λειτουργίας σε κάθε ιδιαίτερη περιοχή. Η διαφορά στις μετρούμενες τιμές ενός πλαισίου συνδέεται επομένως με τον τόπο εγκατάστασης και φυσικά με τις κλιματικές συνθήκες. Έτσι μια εγκατάσταση σε μεσογειακό κλίμα διαφέρει αισθητά από μια αντίστοιχη σε άλλη περιοχή. Κάθε διαφορά από τις στάνταρ συνθήκες έχει επίδραση στην απόδοση των πλαισίων και στην παραγόμενη ενέργεια. Έχειδειχθεί ότι πλαίσια με ίδιες αποδόσεις μπορούν να έχουν διαφορές έως 50% στην παραγόμενη ενέργεια [1]. Επίσης έχειδειχθεί πως ο συνδυασμός 1000W/m^2 και θερμοκρασία πλαισίου 25°C παρατηρήθηκε μόνο για το 0.29% της διάρκειας της ημέρας σε περιοχή του UK για το έτος 2003. Όταν δε ληφθεί υπόψη και το ηλιακό φάσμα, αυτές οι ειδικές συνθήκες δεν υφίστανται. Κατ'επέκταση οι διαφοροποιήσεις λόγω τοποθεσιών και πραγματικών συνθηκών πρέπει να είναι αντικείμενο μελέτης και προβληματισμού καθώς ο μελετητής καλείται να επιλέξει την καταλληλότερη τεχνολογία Φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σχέση με την τιμή και την απόδοση των.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η ισχύς και ο βαθμός απόδοσης των Φωτοβολταϊκών πλαισίων και η μεταβολή τους σε σχέση με κάποιες παραμέτρους παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις διαφορετικές τεχνολογίες με πρακτικό ενδιαφέρον για μελέτη τους.

Η πειραματική διάταξη που πραγματοποιήθηκε για τη μελέτη της συμπεριφοράς υπό πραγματικές συνθήκες τεσσάρων από τους κυριότερους τύπους φωτοβολταϊκών πλαισίων αποτελείται από το εκάστοτε μελετώμενο πλαίσιο, και τα απαραίτητα όργανα μέτρησης. Τα πλαίσια που μελετώνται είναι πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου (mono-Si), πολυκρυσταλλικού πυριτίου (poly-Si), άμορφου πυριτίου (a-Si), και λεπτού φιλμ δισελινιούχου ινδιούχου χαλκού (CIS). Η συνολική ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο των Φ/Β πλαισίων μετρείται με ένα πυρανόμετρο υψηλής ακρίβειας, το οποίο είναι ευαίσθητο στο εύρος μήκους κύματος από 0.3 έως 3 μm , ενώ οι θερμοκρασίες των πλαισίων με θερμοηλεκτρικά ζεύγη. Η διάταξη περιλαμβάνει επίσης αμπερόμετρο, βολτόμετρο, ανεμόμετρο κατάλληλα συνδεδεμένα με ένα ηλεκτρονικό φορτίο το οποίο παίζει το ρόλο ρυθμιστικής αντίστασης. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια αντίσταση ως φυσικό φορτίο, αλλά καλύτερο αποτέλεσμα προκύπτει με τη χρησιμοποίηση ενός ηλεκτρονικού ενεργού φορτίου (γραμμικού) [2], που προσφέρει καλύτερο έλεγχο στο χρήστη και αποφεύγονται οποιαδήποτε προβλήματα που προκαλούνται από την επίδραση της υψηλής θερμοκρασίας σε αντίσταση. Τα πλαίσια για να δίδουν αξιόπιστα αποτελέσματα καθαρίζονται τουλάχιστον μία φορά την εβδομάδα. Το σύστημα αυτό βρίσκεται στην οροφή του κτηρίου του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών εκτεθειμένο σε όλες τις καιρικές συνθήκες έτσι ώστε να είναι δυνατή η μελέτη της συμπεριφοράς του υπό πραγματικές συνθήκες. Και οι πραγματικές αυτές συνθήκες δεν εμπόδισαν κάποιους από το να κλέψουν τμήμα της πειραματικής μας διάταξης πράγμα το οποίο εμπόδισε για μεγάλο χρονικό διάστημα την διεκπεραίωση πειραματικών μετρήσεων.

Στη συνέχεια παραθέτουμε ιστόγραμμα στο οποίο παρουσιάζονται στατιστικά μετεωρολογικά δεδομένα στην διάρκεια ενός έτους και αφορούν στην ετήσια κατανομή ακτινοβολίας [3] και θερμοκρασίας για την περιοχή της Πάτρας (Σχήμα 1). Για κάθε μήνα δίνονται οι τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο μετρούμενη σε MJ/m^2 , καθώς και η μέση θερμοκρασία του αέρα στην διάρκεια της μέρας σε $^{\circ}\text{C}$.



Σχήμα 1. Κατανομή της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας ανά μήνα στην περιοχή της Πάτρας

Υψηλές τιμές ηλιοφάνειας συνεπάγονται όπως παρατηρούμε και υψηλές θερμοκρασίες. Πληρέστερη μελέτη και ανάλυση για περισσότερα έτη και για συγκεκριμένα φωτοβολταϊκά θα οδηγήσει σε πιο ασφαλές συμπέρασμα σε σχέση με την επιλογή και την καταλληλότητα των σε μια πραγματική τοπική εγκατάσταση.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι τιμές των φωτοβολταϊκών παραμέτρων των μελετουμένων πλαισίων δηλαδή του ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{sc} (A), της τάσης ανοικτού κυκλώματος V_{oc} (V), του μέγιστου ρεύματος I_{mp} (A), της μέγιστης τάσης V_{mp} (V), της μέγιστης ισχύος P_{max} (W), του παράγοντα ποιότητας FF (%), και του συντελεστή απόδοσης η (%)), υπό στάνταρ συνθήκες δοκιμών- μετρήσεων (STC) παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

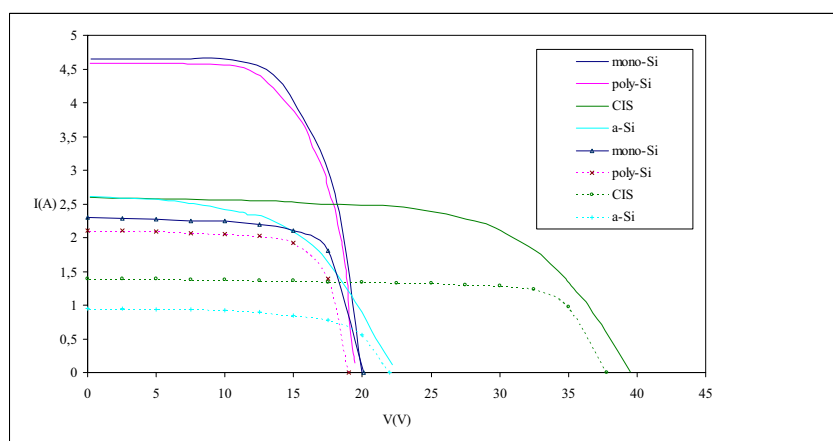
Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά των μελετουμένων πλαισίων διδόμενα από τους κατασκευαστές.

Τεχνολογία κυττάρου	Mono-crystalline (mono-Si)	Poly-crystalline (m-Si)	Amorphus (a-Si)	Copper-Indium-Deselenide (CIS)
Διαστάσεις, W x H, (m x m)	1.19 x 0.50	1.15 x 0.51	0.98 x 0.58	1.29 x 0.64
I_{sc} (A)	4.95	5.15	2.5	2.85
I_{mp} (A)	4.58	4.63	1.92	2.4
V_{oc} (V)	21.9	21.6	22.8	44.1
V_{mp} (V)	17.5	17.3	16.8	31.3
P_{max} (W)	80.15	80.1	32.3	75.1
FF (%)	73.9	72.0	56.7	59.8
η (%)	13.46	13.65	5.8	9.1

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Χαρακτηριστικές τάσης-ρεύματος I-V.

Αρχικά παρουσιάζουμε στο σχήμα 2, τις χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης-ρεύματος I-V που χαράσσονται υπό δύο διαφορετικές τιμές της ηλιοφάνειας (400W/m^2 και 1000W/m^2).



Σχήμα 2. Χαρακτηριστικές τάσης-ρεύματος I-V των τεσσάρων πλαισίων με ηλιοφάνεια 400Watt/m^2 , και 1000W/m^2 . Οι πραγματικές συνθήκες υπό τις οποίες διενεργήθηκαν οι πειραματικές αυτές μετρήσεις είναι για την ακτινοβολία 400W/m^2 , θερμοκρασία περιβάλλοντος

27-31 °C, γωνία κλίσης 50°-80°, χρόνος από τις ώρες 9.30- 12 το μεσημέρι και από την 18^η- 30^η εβδομάδα του 2008. Για την ακτινοβολία 1000 W/m² η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν γύρω στους 37 °C, γωνία κλίσης 40°-45°, διενεργήθηκαν κατά τις ώρες από 14- 14.30, και από την 25^η έως την 30^η εβδομάδα του ιδίου έτους.

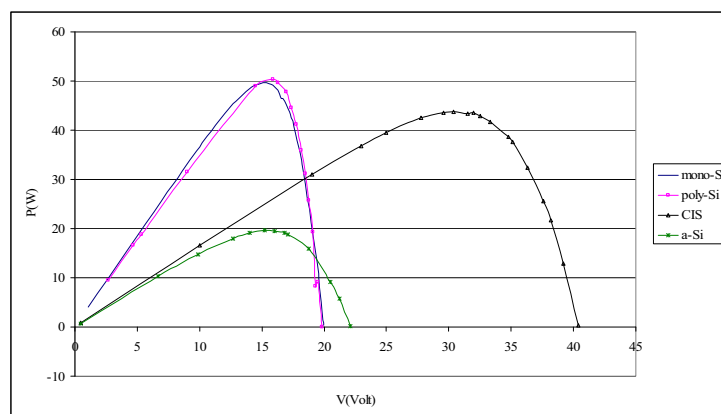
Η σύγκριση των διαφορετικών πλαισίων απεικονίζεται, στο σχήμα 2 στο οποίο παρουσιάζονται οι καμπύλες για τα 4 ηλιακά πλαίσια και για τις 2 τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας μαζί. Στο σχήμα αυτό παρατηρούμε ότι οι καμπύλες του πολυκρυσταλλικού και του μονοκρυσταλλικού πλαισίου είναι παρόμοιες και αρκετά κοντά σε τιμές. Αντιθέτως των άλλων δύο είναι αρκετά διαφορετικές από τις προηγούμενες. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν και το CIS έχει μικρότερη ισχύ, η τάση ανοιχτοκυκλώσεώς του είναι πολύ μεγαλύτερη από την τάση των υπολοίπων, το ρεύμα βραχυκύκλωσης του έχει τιμή πολύ χαμηλότερη. Αυτό το καθιστά εξαιρετικά χρήσιμο σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή τάση όμως αδυνατεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις φορτίων που χρειάζονται μεγάλο ρεύμα. Το πλαίσιο του a-Si δίδει χαμηλότερες τιμές από τα άλλα, όπως αναμένεται και από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

Συμπληρώνοντας την ανάλυση, παρουσιάζουμε τα διαγράμματα που αφορούν στις I-V χαρακτηριστικές, υπό ηλιοφάνεια 1000 Watt/ m² συνθήκη που υπάρχει γύρω από το μεσημέρι και κυρίως τις καλές ημέρες. Οι τιμές όλων είναι ασθητά υψηλότερες όσον αφορά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης, πολύ λιγότερο ως προς τάση ανοικτού κυκλώματος και όμοιας μορφής με τις αντίστοιχες χαμηλής ακτινοβολίας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των διαγραμμάτων CIS και του άμορφου πυριτίου όπου μπορούμε να δούμε εκτός των άλλων ότι με την αύξηση της ακτινοβολίας οι καμπύλες τους πλησιάζουν μεταξύ τους ειδικότερα στην περιοχή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως, πιθανά λόγω της καλύτερης συμπεριφοράς του a-Si σε αυξημένη ακτινοβολία - θερμοκρασία.

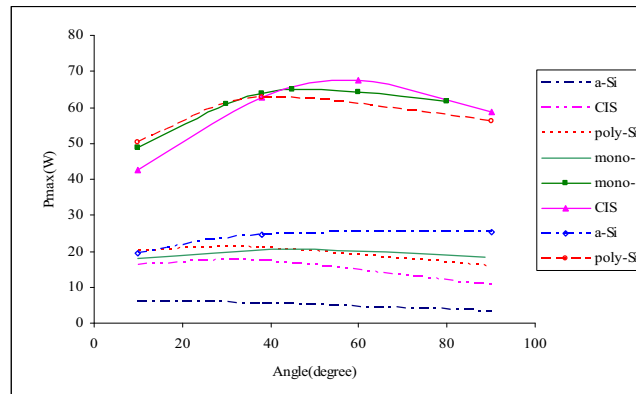
3.2. Ισχύς.

Αυτό που είναι ευκολότερα αντιληπτό, δεν είναι οι I-V χαρακτηριστικές, όσο το αποτέλεσμα που προκύπτει από την αποδιδόμενη από τα πλαίσια ισχύ ανά περίπτωση. Πρώτα παρουσιάζουμε τα διαγράμματα της ισχύος σε συνάρτηση με την τάση.



Σχήμα 3: Μεταβολή της μέγιστης παρεχόμενης ισχύος από κάθε τύπο φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει της τάσης.

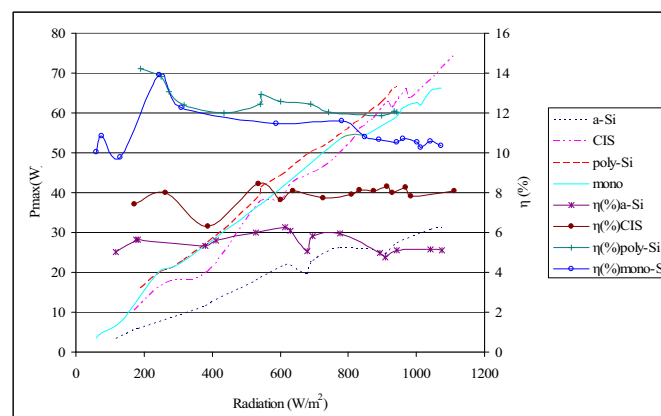
Σ' αυτό το σχήμα παρατηρείται εμφανώς η όμοια συμπεριφορά μονοκρυσταλλικού και η διαφορά CIS και a-Si. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε τα διαγράμματα της ισχύος σε συνάρτηση με την γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, για ηλιόλουστη και για συννεφιασμένη ημέρα, φθινοπωρινή. Η περίπτωση αυτή δίνει πληροφορία για τις αποδόσεις των πλαισίων όταν αυτά ζητείται να τοποθετηθούν υπό γωνία διαφορετική από την βέλτιστη.



Σχήμα 4: Μεταβολή της μέγιστης παρεχόμενης ισχύος από κάθε τύπο φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι συνεχείς γραμμές αναφέρονται σε ηλιόλουστη ημέρα την 1^η εβδομάδα Νοεμβρίου 12 ώρα το μεσημέρι ενώ οι διακεκομμένες αναφέρονται σε συννεφιασμένη ημέρα κατά την ίδια εβδομάδα και 12 ώρα το μεσημέρι.

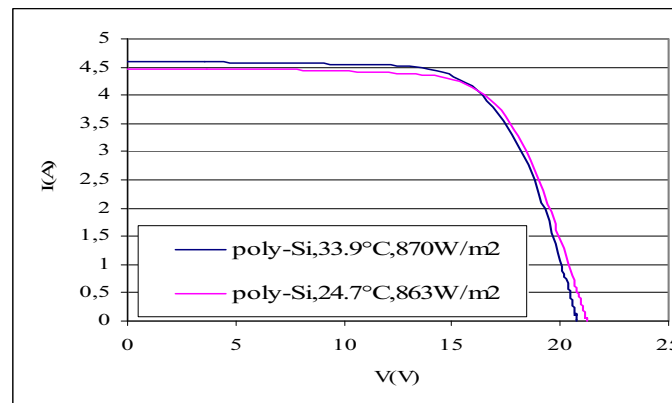
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η λειτουργία του πλαισίου CIS στην περίπτωση αυτή εαν συγκριθεί με το πολυκρυσταλλικό και το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Παρουσιάζει παρα πολύ καλές επιδόσεις και για γωνία πρόσπτωσης 60⁰ παρουσιάζει υψηλότερες τιμές από τα άλλα δύο, με πιθανή αιτιολογία την καλύτερη συμπεριφορά του σε υψηλότερη θερμοκρασία, που συνεπαγωγικά φαίνεται να υπάρχει τότε, έναντι των άλλων. Για την περίπτωση συννεφιάς φαίνονται οι αρκετά χαμηλότερες τιμές για όλα τα πλαίσια, κατά σειρά από το μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό, CIS και άμορφο, που όμως δεν είναι αμελητέες.

Η ονομαστική ισχύς των πλαισίων είναι διαφορετική σε μεγάλο βαθμό από αυτή που ο κατασκευαστής δίδει ακόμα και σε υψηλές τιμές ηλιοφάνειας. Αυτό είναι λογικό καθώς τα δεδομένα λήφθηκαν για πραγματικές συνθήκες και σε διαφορετική θερμοκρασία από τους 25°C (που έχουν γίνει οι μετρήσεις δοκιμής τους).



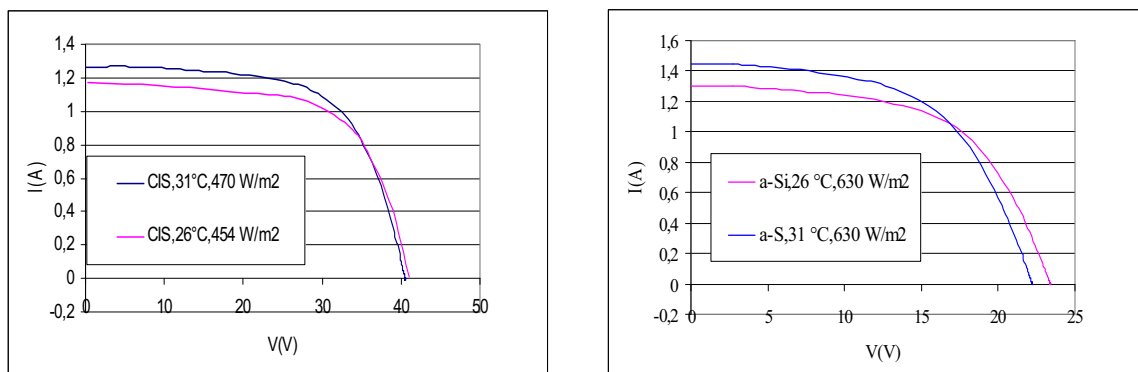
Σχήμα 5. Ισχύς και απόδοση κάθε πλαισίου συναρτήσει της ακτινοβολίας.

Στο σχήμα 5 παρουσιάζουμε την μεταβολή της ισχύος και του συντελεστή απόδοσης συναρτήσει της ακτινοβολίας. Τα πλαίσια με την υψηλότερη ονομαστική ισχύ είναι του μονοκρυσταλλικού και του πολυκρυσταλλικού πυριτίου ισχύος 80W το καθένα. Το CIS (75W) για υψηλές τιμές ακτινοβολίας παρουσίασε μεγαλύτερη ισχύ από τα προηγούμενα λόγω της μικρότερης επίδρασης σ' αυτό των υψηλών θερμοκρασιών, που εκτελέστηκαν τα πειράματα. Μεγάλη επίδραση της θερμοκρασίας φαίνεται στο πολυκρυσταλλικό πλαίσιο (80W) το οποίο απέδωσε μόλις 66W για υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια του θέρους. Το πλαίσιο άμορφου πυριτίου μπορεί να δώσει ισχύ πολύ κοντά στην ονομαστική του αλλά ο πολύ μικρός βαθμός απόδοσης και η σταδιακή υποβάθμισή του στην συνεχή έκθεση στο φως το καθιστούν προβληματικό υλικό για μακροχρόνια χρήση [4]. Περαιτέρω μελέτη απαιτείται για να δώσει ολοκληρωμένα συμπεράσματα σχετικά με την αποδιδόμενη ισχύ για το σύνολο του έτους. Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται και η εξάρτηση του βαθμού απόδοσης από την ακτινοβολία. Τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης παρουσιάζει το πολυκρυσταλλικό πλαίσιο. Τα πλεονεκτήματα του υλικού αυτού καθώς και του μονοκρυσταλλικού πυριτίου δεν περιορίζονται μόνο στον υψηλό βαθμό μετατροπής της ηλιακής ενέργειας αλλά και στον μεγάλο χρόνο ζωής και την αξιοπιστία των [4].



Σχήμα 6: I-V χαρακτηριστική πλαισίου πολυκρυσταλλικού πυριτίου συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Στις διαφορετικές θερμοκρασίες του πειράματος το πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου, σχήμα 6, παρουσίασε μια μείωση της τάσης της τάξης του $-0.52\% / ^\circ\text{K}$ ενώ ο κατασκευαστής έδινε $-0.37\% / ^\circ\text{K}$. Για τα πλαίσια άμορφου πυριτίου η μείωση τάσης ήταν $-0.42\% / ^\circ\text{K}$ με τον κατασκευαστή να δίδει $-0.33\% / ^\circ\text{K}$, και για το CIS $-0.21\% / ^\circ\text{K}$ με τον κατασκευαστή να δίδει $-0.18\% / ^\circ\text{K}$, σχήμα 7.



Σχήμα 7: I-V χαρακτηριστική πλαισίων a-Si και CIS συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Το κόστος αυτών των πλαισίων είναι ένας λόγος που μελέτες για εύρεση νέων υλικών με ανάλογα χαρακτηριστικά συνεχίζονται με γρήγορους ρυθμούς. Το CIS είναι ένα πολλά υποσχόμενο υλικό [5], διότι ο βαθμός απόδοσης του παρέμεινε σχετικά καλός για όλες σχεδόν τις ακτινοβολίες και η αξιοπιστία του σε εγκαταστάσεις είναι ανάλογη των 2 άλλων υλικών. Ο πολύ μικρός βαθμός απόδοσης του άμορφου πυριτίου αλλά και η χαμηλή τιμή του είναι ένας επίσης λόγος που το υλικό αυτό παραμένει μια επιλογή σε εφαρμογές με χαμηλότερες απαιτούμενες τάσεις.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι εκτιμήσεις των φωτοβολταϊκών παραμέτρων των πλαισίων περιγράφουν την πραγματική λειτουργία τους σε εξωτερικό χώρο με τις πολύ υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και τους ανέμους του φθινοπώρου και του χειμώνα. Γι' αυτό το σκοπό παρουσιάστηκαν τα χαρακτηριστικά τάσης-ρεύματος, υπό φυσική ηλιακή ακτινοβολία, ηλιακών πλαισίων μονοκρυσταλλικού, πολυκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου, καθώς και του δισηλινιούχου ινδιούχου χαλκού CIS. Έχει μελετηθεί η μεταβολή της ισχύος των πλαισίων όταν αλλάζει η γωνία κλίσης των. Η επίδραση επίσης της ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζεται, στις P-V χαρακτηριστικές και στο βαθμό απόδοσης των μελετουμένων πλαισίων καθώς και η επίδραση της θερμοκρασίας στις I-V χαρακτηριστικές των.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πολλές ευχαριστίες θα θέλαμε να εκφράσουμε στους φοιτητές του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών κ.Δήμητρα Συγκρίδη για την ευγενική παραχώρηση κάποιων μετρήσεων της, και κ. Γεώργιο Γιαννόπουλο ο οποίος συμμετείχε ως ένα βαθμό στο ξεκίνημα αυτής της εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. CN.Jardine, et al., "PV-Compare: Direct Comparison of Eleven PV Technologies at Two locations in Northern and Southern Europe" 17th EUPVSEC, 2001, pp724-727.]
2. D. Anderson, J.Bishop, E.Dunlop 16th EUPVSEC Glasow,UK, 2000,PD 1.4
3. Τιμές από το πρόγραμμα PV Sol.
4. Time strategies, Innovation and Environmental Policy. Edited by Christian Santorius, Stefan Zundel.
5. Recent Developments in Solar energy. Editor Tom. P. Hough

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΥΓΓΡΑΦΕΩΝ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΥΓΓΡΑΦΕΩΝ

- Αγγελής-Δημάκης Α. 333
Αγραφιώτης Χ. 699
Αηδόνης Α. 159
Αθανασίου Κ. 715
Αλεξανδρή Ε. 101, 201, 209
Αλεξόπουλος Σ. 387
Αλιβάνης Κ. 633
Ανδρέου Ε. 251
Ανδρίτσος Ν. 533, 541
Ανδρουτσόπουλος Α. 125, 159
Αντωνιάδου Μ. 673
Αξάοπουλος Π. 325, 707, 741
Αξαρχή Κ. 117, 167, 175, 251
Αραβαντινός Δ. 69, 217
Αραβαντινού-Τζε Π. 29
Αραμπατζής Γ. 333
Αρβανίτης Α. 541
Ασημακόπουλος Δ. 333
Βαϊτση Χ. 117
Βαλσαμάκης Γ. 217
Βαρκαρακία Ε. 317
Βεζυράκης Γ. 665
Βικάτος Γ. 349
Βογιατζής Ε. 765
Βορόπουλος Κ. 393
Βουρδουμπάς Γ. 367, 509
Βουτετάκης Σ. 665
Βραχόπουλος Μ. 143, 549, 647
Γαγλία Α. 37, 45
Γεωργίου Γ. 747
Γεωργίου Μ. 725
Γεωργοπούλου Ε. 45
Γιαννακούδης Γ. 665, 781
Γιαρμά Χρ. 135, 151
Γκαράκης Κ. 467, 475, 483
Γκέκας Β. 583
Γκέρτζος Κ. 457
Γκουραμάνης Κ. 755
Γκρατσία Ε. 367
Γονίδης Α. 143, 647
Δασκαλάκη Ε. 37
Δημούδη Α. 53
Δημουλιάς Χ. 755
Διακουλάκη Δ. 341
Δρακάκης Ε. 747
Δρούτσα Π. 37
Ευμορφοπούλου Α. 109
Ευρυπίδου Χ. 311
Ευσταθίου Α. 639
Ζούλιας Ε. 317
Ζαμπανιώτου Α. 609, 615, 715
Ζαφείρης Θ. 599
Ζαχαριάδης Θ. 303
Ζέρβας Π. 269, 657, 681
Ζιώγου Χ. 665
Ζόλκου Π. 583
Ζυγογιάννη Α. 699
Θέμελης Π. 773
Θεοδωρίδης Μ. 741
Θεοδωρίδου Ι. 29
Ιερείδης Β. 233
Ιψάκης Δ. 665
Ιωαννίδου Ο. 715
Καΐρη Μ.-Ι. 765
Καλδέλλης Ι. 349, 483
Καλογήρου Σ. 417, 423, 439
Καλούδης Ε. 409, 447
Κανταρέλης Ε. 609, 615
Καούρης Ι. 409, 457
Καραγιαννίδης Α. 295, 625
Καραγιώργης Γ. Ν. 689
Καραγιώργης Ν. 689
Καραλής Γ. 317
Καραμήτσιου Β. 217
Καράμπελας Α. Α. 725
Καρλάκη Ε. 367
Καρτέρης Μ. Μ. 77
Κατσιφαράκης Κ. 565
Κατώπης Κ. 475
Κίκηρα Μ. 209
Κιτσάκης Κ. 733
Κίττας Κ. 85, 243
Κοϊνάκης Χ. 225
Κοντογιάννη Σ. 295
Κοντογιαννίδης Σ. 37
Κοντολέων Κ. 109, 151
Κοντολέων Κ. 151
Κορωγιαννάκης Π. 317
Κορωνάκη Ε. 125
Κοσκινάς Α. 781
Κοσμόπουλος Π. 53
Κουδουμάς Ε. 747

Κούκου Μ. 143, 549, 647
 Κουλουμπής Β. 599
 Κουσουλίδου Μ. 591
 Κουφοδήμος Γ. 615
 Κυριάκης Ν. 193, 359, 379, 431, 573
 Κωνσταντινίδου Χ. 53
 Κωνσταντίνου Δ. 639
 Κωνσταντίνου Κ. 665
 Κωνσταντόπουλος Α. 699
 Κώστογλου Μ. 533
 Κωστοπούλου Χ. 69
 Κωστούλας Α. 185
 Λαζάρου Γ. 467
 Λαζάρου Μ. 475
 Λάλας Δ. 45
 Λαμνάτου Χρ. 379
 Λαμπροπούλου Λ. 209
 Λάσκος Κ. 175
 Λιανός Π. 673
 Λιαράκος Α. 367
 Λορέντζου Σ. 699
 Λουκίδης Κ. 467, 475
 Μάγος Κ. 209
 Μαθιουλάκης Ε. 359, 393, 401, 409, 515
 Μακρίδης Γ. 747
 Μαλακός Κ. 509
 Μαλαμάκης Α. 625
 Μανταδάκης Μ. 77
 Μάργαρης Δ. 491
 Μαρκάτος Ν. 269, 657, 681
 Μαρτινόπουλος Γ. 287, 431
 Μαυροματάκης Φ. 747
 Μαυρομμάτης Θ. 193
 Μενάγιας Κ. 185
 Μερέση Α. 167
 Μερτζής Δ. 615
 Μεσημέρης Θ. 311
 Μέχλερη Ε. 269
 Μιχαήλ Α. 7, 233
 Μιχάλαϊνα Ε. 279
 Μιχαλακάκου Π. 59
 Μιχόπουλος Α. 573
 Μοιρασγεντής Σ. 45
 Μπαλαράς Κ. 37, 45
 Μπαξεβάνου Α. 85, 93, 243
 Μπαρτζάνας Θ. 85, 243
 Μπελεσιώτης Β. 359, 379, 393, 401, 409, 447, 515
 Μπίκας Δ. 135, 151
 Μπιλαδέρης Δ. 193
 Μποέμη Σ. 59, 295
 Μπουντουβής Α. 765
 Νεοφύτου Μ. 259
 Νίνος Ν. 733
 Νούκα Α. 367
 Ξανθόπουλος Σ. 557
 Οξυζίδης Σ. 77
 Παγκούρα Χ. 699
 Παλυβός Ι. 269, 657, 765
 Παναγιώτου Γ. 325, 707
 Πανάγου Ν. 201
 Πανάρας Γ. 359, 515
 Πανίδης Θ. 447
 Παπαδόπουλος Α. Ι. 665
 Παπαδόπουλος Α. Μ. 29, 59, 77, 295
 Παπαθανασίου Α. 765
 Παπακώστας Κ. 193
 Παπαλεξάνδρου Μ. 151
 Παπαμανώλης Ν. 23
 Παπανικολάου Η. 379, 447
 Παπασταμούλος Κ. 325
 Παπασταύρος Κ. 311
 Παπασταύρου Μ. 311
 Παπαχρήστου Μ. 541
 Παπαχρήστου Δ. 325
 Παρασκευοπούλου Α. 209
 Πενταλιώτης Α. 311
 Περάκης Χ. 499
 Περράκη Β. 781
 Ποτηράκης Α. 747
 Πουλλικκάς Α. 689
 Πουλoupάτης Π. 525
 Πρίφτης Α. 725
 Ρελάκης Γ. 499
 Σακελλάρης Ι. 225
 Σαμαράς Ζ. 591, 615
 Σαραφίδης Ι. 45
 Σαρίμβεης Χ. 269, 657, 681
 Σεργίδη Δ. 15, 475
 Σεφερλής Π. 665
 Σιδηρόπουλος Χ. 311
 Σκουλού Β. 609, 615
 Σουλιώτης Μ. 417
 Σπανουδάκη Ι. 509
 Σπύρογλου Ο. 151
 Σπύρου Σ. 557
 Σταματάκης Ε. 317
 Σταματόπουλος Β. 143, 647
 Σταυλάς Δ. 143, 647
 Στεφανάκης Ι. 349

Στρατάκη Ν. 673
Συρίμπεης Ν. 457
Τάσσου Σ. 525
Τάχος Ν. 491
Τζαμαλής Γ. 317
Τζανακάκη Ε. 201
Τζαχάνης Α. 93, 185, 733
Τουρκολιάς Χ. 341
Τρυπαναγνωστόπουλος Ι. 279, 417, 773
Τσελεπής Ε. 209
Τσελεπίδου Κ. 565
Τσικαλάκης Α. 317
Τσικαλουδάκη Κ. 117, 135, 151
Τσιλιγκιρίδης Γ. 287, 311, 431
Τσιουτής Χ. 439
Τσιπάς Δ. 417
Τσούτσος Θ. 583, 599
Φείδαρος Δ. 85, 93, 243
Φιλίος Α. 491
Φλωρίδης Γ. 417, 525
Φονταράς Γ. 591

Φραγκιαδάκης Γ. 747
Φυτίκας Μ. 541
Φωκαΐδης Π. 259
Φωκάς Μ. 7
Φωτείνης Σ. 599
Χασάπης Δ. 159
Χάσικος Ι. 681
Χατζηαργυρίου Ν. 317
Χατζηαυγουστής Θ. 715
Χατζηιορδάνη Ι. 633
Χατζούδης Γ. 633
Χόφσμιντ Μ. 387
Χριστοδούλου Χ. Χ. 689
Χριστοφορίδης Α. 557
Χρυσάφης Ν. 533

Delenta Μ. -Ε. 317
Ekhrawat Μ. 417
Henriquezd D. 317
Suarez Garevad S. 317

