



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΚΑΙ
ΒΙΩΣΙΜΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ ΚΟΚΚΑΛΗ ΜΕΛΑ ΠΕΡΙΚΛΗ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής ΘΕΟΧΑΡΗΣ ΤΣΟΥΤΣΟΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Καθηγητής ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΑΛΑΪΤΖΑΚΗΣ

Επ. Καθηγήτρια ΚΟΛΟΚΟΤΣΑ ΔΙΟΝΥΣΙΑ

ΧΑΝΙΑ, 2015



Ευχαριστίες,

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια ολοκλήρωσης των προπτυχιακών μου σπουδών στο Πολυτεχνείο Κρήτης για την απόκτηση του πτυχίου Μηχανικού Περιβάλλοντος. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή, Θεοχάρη Τσούτσο, για τη στήριξή του σε επιστημονικό και φιλικό επίπεδο. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω να εκφράσω στον υποψήφιο Διδάκτορα Νικόλαο Σαββάκη για την πολύτιμη βοήθειά και την καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Δεν μπορώ να μην ευχαριστήσω τους φίλους μου για την ηθική υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την υπομονή και την αμέριστη συμπαράσταση τους όλα αυτά τα χρόνια για την απόκτηση του πτυχίου μου.

Περικλής Κοκκάλης-Μελάς

Copyright © Περικλής Κοκκάλης-Μελάς, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης".

Περίληψη

Τα φωτοβολταϊκά αποτελούν τεχνολογία που μπορεί να μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Η απόδοση τους επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, ένας εκ των οποίων είναι και η θερμοκρασία. Είναι γνωστό πως με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται η απόδοση του Φ/Β οπότε και κρίνεται αναγκαία η αποτελεσματική ρύθμιση της. Η μέθοδος ψύξης που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία ήταν αυτή της παθητικής ψύξης του Φ/Β με τη χρήση παραφίνης στους 27°C (RT27 – σημείο τήξης 27°C) ως Υλικό Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ). Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός μηχανισμού που θα ενσωματώνει το ΥΑΦ αυτό καθώς και η πειραματική αξιολόγηση της θερμικής και ηλεκτρικής συμπεριφοράς του πλαισίου. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας μετρήθηκαν οι τιμές των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών(έντασης (I) και τάσης (V)) και της θερμοκρασίας λειτουργίας τόσο για το φωτοβολταϊκό αναφοράς όσο και για το σύστημα φωτοβολταϊκού-ΥΑΦ. Κατ' αυτόν τον τρόπο εξήχθησαν και οι αντίστοιχες αποδόσεις. Το τελικό συμπέρασμα ήταν ότι με την εφαρμοσθείσα μέθοδο μπορεί να ελεγχθεί η θερμοκρασία λειτουργίας του Φ/Β με άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης του.

Abstract

Photovoltaic panels are a continually evolving technology which can transform electromagnetic radiation into usable electric power. Their gain however is depends on various factors, temperature being one of them. It is known that temperature rise decreases the amount of energy produced so it is vital we find a solution to cool said panels. This paper is focused on limiting temperature rise with the use of phase change materials, Rubitherm's RT27 specifically. The purpose is to design and fabricate a system that integrates the PCM on the photovoltaic panel and to study its thermal and electrical behavior in order to observe the power gain of this passive cooling technique. After numeral tests it was proven that indeed PCM can be used as a cooling mechanism and there is a significant power augmentation in the produce of electricity.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	3
1. Εισαγωγή	6
1.1. Προσέγγιση του προβλήματος	6
1.2. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο και ψύξη Φωτοβολταϊκών	7
2. Ανασκόπηση διεθνούς βιβλιογραφίας	8
2.1. Η έννοια της θερμοκρασίας στα φωτοβολταϊκά συστήματα	8
2.1.1. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο	8
2.1.2. Σημείο μέγιστης ισχύος	9
2.2. Επίδραση της θερμοκρασίας στα φωτοβολταϊκά συστήματα	10
2.2.1. Συστήματα ψύξης	11
2.3. Θερμική αποθήκευση	12
2.4. Ιδιότητες υλικών αλλαγής φάσης	13
2.5. Κατηγοριοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης	15
2.5.1. Οργανικά υλικά	16
2.5.1.1. Παραφίνες	16
2.5.1.2. Λιπαρά οξέα	18
2.5.2. Ανόργανα υλικά	18
2.6. Εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης	19
2.6.1. Εφαρμογές σε κτήρια	19
2.6.2. Ηλιακά συστήματα	20
2.6.3. Ηλεκτρονικά εξαρτήματα	21
2.6.4. Μεταφορές αγαθών και ιατρικών προϊόντων	22
2.6.5. Εφαρμογές στο ρουχισμό	23
2.7. Διαθεσιμότητα υλικών αλλαγής φάσης στην αγορά	24
2.8. Εφαρμογές σε φωτοβολταϊκά	25

3. Μεθοδολογία προσέγγισης	29
3.1. Επιλογή μεθόδου.....	29
3.2. Επιλογή των μέσων που χρησιμοποιήθηκαν.....	32
3.2.1. Φωτοβολταϊκό πλαίσιο	32
3.2.2. Υλικό αλλαγής φάσης.....	34
3.2.3. Λογισμικό σχεδίασης.....	35
3.2.4. Πειραματικές διατάξεις μέτρησης.....	35
4. Σχεδίαση κατασκευής	36
4.1. Παράμετροι σχεδιασμού	36
4.2. Μεταφορά θερμότητας στο σύστημα ΥΑΦ-φωτοβολταϊκού	38
5. Ανάλυση αποτελεσμάτων	43
5.1 Πρώτη φάση, ποιοτική θερμική αποτίμηση	43
5.2 Δεύτερη φάση, ποσοτική θερμική αποτίμηση	45
5.3 Ηλεκτρικές μετρήσεις.....	58
6. Αποτελέσματα , συζήτηση	65
Κατάλογος εικόνων	67
Κατάλογος πινάκων.....	67
Κατάλογος διαγραμμάτων	68
7. Βιβλιογραφία.....	70
INTERNET SITES	73

1. Εισαγωγή

1.1. Προσέγγιση του προβλήματος

Τα τελευταία χρόνια η ανάγκη για ορθολογική χρήση και εξοικονόμηση ενέργειας εμφανίζεται μεγαλύτερη από ποτέ, καθώς η κοινωνική ευημερία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ικανότητα κατανάλωσης ενέργειας για την εξυπηρέτηση των αναγκών μας. Το γεγονός αυτό παρατηρείται εντονότερα, όταν μιλάμε για μια καθαρή και υψηλής ποιότητας ενέργεια όπως είναι η ηλεκτρική.

Από την ημέρα που εφευρέθηκε ο πρώτος λαμπτήρας και ο άνθρωπος κατάφερε να χρησιμοποιήσει αυτή την μορφή ενέργειας προς όφελος του, έως σήμερα η τεχνολογική του εξέλιξη βασίζεται στην παραγωγή αυτής. Γίνεται κατανοητή λοιπόν η προσπάθεια για παραγωγή ηλεκτρισμού. Την δεκαετία του 1830 εφευρέθηκε από τον M. Faraday ο τρόπος παραγωγής του ηλεκτρισμού με χρήση του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Οι βασικές αρχές του νόμου του M. Faraday χρησιμοποιούνται έως και σήμερα στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η μηχανές αυτές απαιτούν την προσφορά θερμικής – μηχανικής ενέργειας η οποία προέρχεται κυρίως από καύση ορυκτών. Όμως, από την δεκαετία 1970 που το κόστος της παραγωγής ενέργειας άρχισε να ανεβαίνει κατακόρυφα άρχισε η προσπάθεια για εξοικονόμηση ενέργειας. Οι αρνητικές επιπτώσεις της χρήσης ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας άρχισαν να φαίνονται και να έχουν σοβαρό αντίκτυπο στην ζωή των ανθρώπων. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε συνδυασμό με το συνεχώς αυξανόμενο κόστος εύρεσης και εξαγωγής ορυκτών καυσίμων οδήγησαν στην ανάπτυξη και χρήση νέων μεθόδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η έννοια ανανεώσιμη μορφή ενέργειας μπαίνει στη ζωή μας καθώς γίνεται κατανοητή η αναγκαιότητα να παράγουμε ενέργεια από πηγές που ανακυκλώνονται και δεν τελειώνουν. Έτσι ξεκίνησε η χρήση φωτοβολταϊκών πλαισίων τα οποία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια αξιοποιώντας την ηλιακή ακτινοβολία. Οι μηδενικές αρνητικές επιπτώσεις που έχουν στο περιβάλλον καθώς και η αφθονία της ηλιακής ακτινοβολίας τα καθιστούν εξαιρετική προοπτική επίλυσης του ενεργειακού, περιβαλλοντικού και οικονομικού προβλήματος. Η εξέλιξη της τεχνολογίας και κατάκτηση νέας τεχνογνωσίας βοηθά στην βελτίωση απόδοσης των

φωτοβολταϊκών τα οποία κάθε μέρα γίνονται όλο και πιο ανταγωνιστικός τρόπος παραγωγής ενέργειας σε σχέση με τις ρυπογόνους συμβατικούς. Στη παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η χρήση των ΥΑΦ για την ψύξη φωτοβολταϊκών πλαισίων για την βελτίωση της ενεργειακής τους απόδοσης. Ειδικότερα, μελετήθηκε η δυνατότητα σχεδιασμού και κατασκευής ενός κατάλληλου μηχανισμού για την αξιοποίηση ΥΑΦ ως μέσο ψύξης σε φωτοβολταϊκό πλαίσιο.[Φραγκιαδάκης, 2007]

1.2. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο και ψύξη Φωτοβολταϊκών

Τα φωτοβολταϊκά στην ουσία είναι τεχνητοί ημιαγωγοί , συνήθως από πυρίτιο ,οι οποίοι τοποθετούνται σε σειρά για να δημιουργήσουν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Οι ημιαγωγοί αυτοί απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και την μετατρέπουν σε ηλεκτρική τάση, το φαινόμενο αυτό λέγεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο . Όπως παρατηρήθηκε από τον Α. Ε. Becquerel η πρόσπτωση φωτονίων σε μία επιφάνεια προκαλεί αύξηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων της εξωτερικής στοιβάδας με αποτέλεσμα την αύξηση της κινητικότητάς τους. Στη περίπτωση που η επιφάνεια αυτή είναι ένας ημιαγωγός τα διεγερμένα ηλεκτρόνια αποκολλώνται από την αρχική τους θέση και κινούνται προς θέσεις στην άλλη μεριά του ημιαγωγού θετικά φορτισμένες. Η κίνηση των ηλεκτρονίων αυτών είναι το ηλεκτρικό ρεύμα που προσπαθούμε να αξιοποιήσουμε. Έχει μελετηθεί πως η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε αξιοποιήσιμη ηλεκτρική είναι της τάξης από 10% έως 20%. Αυτό συμβαίνει διότι ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας ανακλάται από το φωτοβολταϊκό και επιστρέφει στην ατμόσφαιρα και ένα άλλο μετατρέπεται σε θερμότητα αυξάνοντας την θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει αρνητικές επιπτώσεις στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο και στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, συγκεκριμένα περίπου 0,2% με 0,5% μειώνεται η απόδοση τους για αύξηση θερμοκρασίας κατά 1 K [Hendricks and van Sark 2002]. Το ποσό αυτό δεν είναι διόλου αμελητέο καθώς τους καλοκαιρινούς μήνες η θερμοκρασία των πλαισίων μπορεί να φτάσει τους 60 - 70 °C. Δημιουργείται λοιπόν, η ανάγκη να βρεθούν ικανοί μηχανισμοί και τεχνικές ψύξης των πλαισίων. Η παρούσα εργασία έχει σαν στόχο τον σχεδιασμό ενός τέτοιου

συστήματος ο οποίος χρησιμοποιεί ΥΑΦ και την ιδιότητα τους να απορροφούν μεγάλα ποσά θερμότητας με την μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Υλοποιήθηκε ο σχεδιασμός ενός δοχείου, κατάλληλα διαμορφωμένου , για την πλήρωση με ΥΑΦ καθώς και η ενσωμάτωση του στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Η διάταξη του δοχείου μελετήθηκε αναλυτικά λαμβάνοντας υπόψη ένα σύνολο διαφορετικών παραμέτρων .

2. Ανασκόπηση διεθνούς βιβλιογραφίας

2.1. Η έννοια της θερμοκρασίας στα φωτοβολταϊκά συστήματα

2.1.1. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι διατάξεις η οποίες προσλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία και παράγουν συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα (DC). Το βασικό στοιχείο της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είναι το φωτοβολταϊκό στοιχείο (PV cell). Το στοιχείο αυτό είναι μια σειρά επαφών P-N δηλαδή η επαφή δύο διαφορετικών ημιαγωγών . Τα περισσότερα φωτοβολταϊκά κατασκευάζονται από πυρίτιο (Si) και μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες :

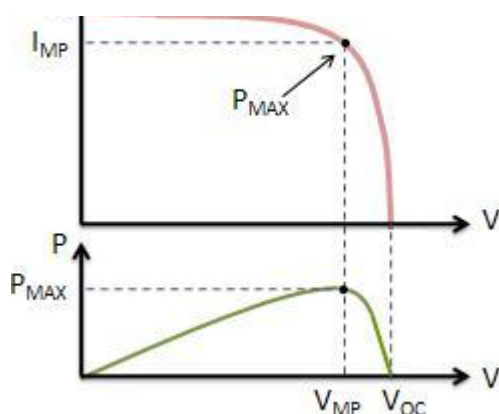
- Κρυσταλλικού Πυριτίου
 - Μονοκρυσταλλικού πυριτίου, με ονομαστικές αποδόσεις πλαισίων 14,5% έως 21%,
 - Πολυκρυσταλλικού πυριτίου, με ονομαστικές αποδόσεις πλαισίων 13% έως 14,5%.2.
- Λεπτών Μεμβρανών
 - Άμορφου Πυριτίου, ονομαστικής απόδοσης ~7%.
 - Χαλκοπυριτών CIS / CIGS, ονομαστικής απόδοσης από 7% έως 11%.

Η κάθε κατηγορία έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που αφορούν την απόδοσή τους, την κατασκευή τους, το κόστος, καθώς και την ανοχή τους στους παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την απόδοσή τους.[Φραγκιαδάκης, 2007]

2.1.2. Σημείο μέγιστης ισχύος

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο όταν εκτεθεί στη ηλιακή ακτινοβολία παράγει ένα δυναμικό V_{oc} στα άκρα του και σε περίπτωση που κλείσουμε το κύκλωμα με έναν ιδανικό αγωγό μηδενικής αντίστασης παράγει ρεύμα έντασης I_{sc} . Το V_{oc} (open circuit) λέγεται τάση ανοιχτού κυκλώματος και το I_{sc} (short circuit) λέγεται ρεύμα βραχυκύκλωσης. Σύμφωνα με το διάγραμμα 1, το V_{oc} και το I_{sc} είναι η μέγιστη τάση και ένταση αντίστοιχα.

Διάγραμμα 1: Χαρακτηριστικές καμπύλες-
 V και $P-V$ [National Instruments, 2014]



Για την καλύτερη εκμετάλλευση της ενέργειας που προσφέρεται από το φωτοβολταϊκό πρέπει να προσαρμόσουμε την αντίσταση του τροφοδοτούμενου κυκλώματος ώστε η τάση και η ένταση του ρεύματος να αντιστοιχούν στο σημείο μέγιστης λειτουργίας. Αυτό γίνεται εμφανές παρατηρώντας το διάγραμμα 1.

[Τσούτσος, 2008]

Για να μελετηθεί η συνεισφορά των φωτοβολταϊκών στην ηλεκτροπαραγωγή έχει εισαχθεί η έννοια της αποδοτικότητας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου (η), η οποία ορίζεται ως το πηλίκο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που μπορεί να προσφέρει το στοιχείο προς την προσπίπτουσα φωτεινή ηλιακή ισχύ:

(2.1)

Όπου,

P_{out} η παραγόμενη ισχύς

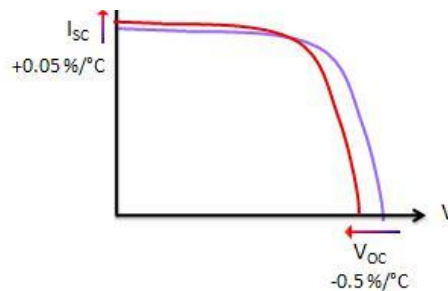
P_{in} η προσφερόμενη ισχύς από τον ήλιο.

[Τσούτσος και Κανάκης, 2013]

2.2. Επίδραση της θερμοκρασίας στα φωτοβολταϊκά συστήματα

Το φωτοβολταϊκά αποτελούνται από κρύσταλλα πυριτίου τα οποία όντας ημιαγωγοί είναι ευαίσθητοι στις αλλαγές θερμοκρασίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας ειδικότερα επιδρά αρνητικά στην λειτουργία των πλαισίων.

Διάγραμμα 2: Μεταβολή του διαγράμματος I-V με την αύξηση της θερμοκρασίας [National Instruments, 2014]



Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2 η αύξηση της θερμοκρασίας κατά έναν βαθμό προκαλεί μικρή αύξηση της έντασης(0,05%) αλλά μεγάλη μείωση της τάσης(0,5%). Γνωρίζοντας ότι

(2.2)

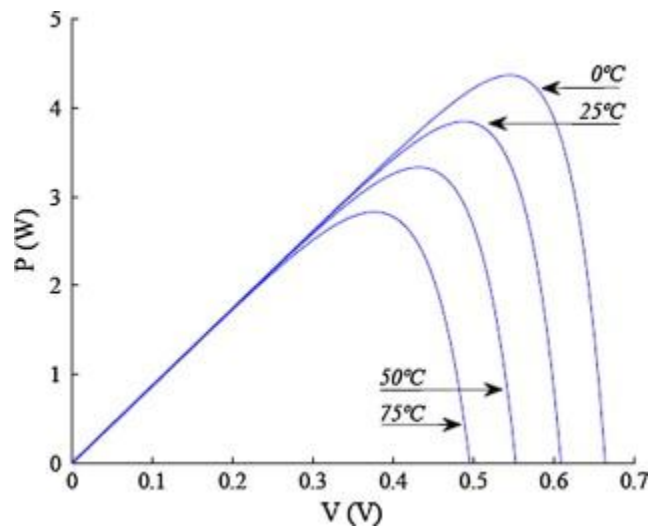
Όπου,

I η τάση του παραγόμενου ρεύματος

I η ένταση του παραγόμενου ρεύματος

Στο διάγραμμα 3 παρουσιάζεται αναλυτικά η μείωση της ισχύος με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Διάγραμμα 3: Γραφικές παραστάσεις P-V σε διάφορες θερμοκρασίες [National Instruments, 2014]



2.2.1. Συστήματα ψύξης

Σε πρόσφατη μελέτη ο Ahmad Hasan έδειξε πως σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C και ισχύ ηλιακής ακτινοβολίας 1000 Wm^{-2} η θερμοκρασία των πλαισίων ανεβαίνει δραματικά το οποίο προκαλεί μείωση της απόδοσης 0,4-0,65% ανά βαθμό K. Αν αναλογιστούμε πως η θερμοκρασία του πλαισίου μπορεί να αγγίξει τιμές έως και 70 °C καταλαβαίνουμε την αναγκαιότητα εύρεσης βιώσιμης λύσης ψύξης αυτών. [Hassan, 2010]

Όπως αναλύθηκε από τους Huang et al. οι οποίοι μελέτησαν την αποδοτικότητα της ψύξης με χρήση της κίνησης του αέρα στο πίσω μέρος του πλαισίου, ο περιβαλλοντικός αέρας επιτυγχάνει να διατηρήσει την θερμοκρασία στα επιθυμητά χαμηλά επίπεδα μόνο σε ευνοϊκές συνθήκες δηλαδή 23°C και ηλιακή ακτινοβολία 400 Wm^{-2} , όμως η πληθώρα των φωτοβολταϊκών πλαισίων παγκοσμίως εκτίθενται σε σαφώς πιο ζεστά κλίματα και δέχονται πολύ μεγαλύτερη ισχύ ακτινοβολίας. Γνωρίζοντας αυτά τα δεδομένα τροφοδοτείται έρευνα για εύρεση ενεργητικής ψύξης. Διάφορες έρευνες έχουν γίνει πάνω στη χρήση ρευστού (ατμοσφαιρικού αέρα και νερού) για την ψύξη των πλαισίων, οι οποίες αντιμετώπισαν προβλήματα που αφορούν την σπατάλη νερού, την αποθήκευση του ψυκτικού μέσου σε χαμηλή θερμοκρασία. [Huang et al., 2011]

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η προτεινόμενη λύση από τους [Moharram et al. 2012] ,καθώς η ψύξη των πλαισίων επιτυγχάνεται με την χρήση σταγονιδίων νερού στην επάνω επιφάνεια των φωτοβολταϊκών κατά τις ώρες που η θερμοκρασία ανεβαίνει πάνω από τους 40 °C. Με αυτό το σύστημα λύνεται το πρόβλημα της σπατάλης νερού καθώς χρησιμοποιείται μικρή ποσότητα και ταυτόχρονα καθαρίζεται η άνω επιφάνεια από σκόνη και βρώμες που μείωναν την ισχύ εισόδου εμποδίζοντας τις ακτίνες του ήλιου να φτάσουν στα κρύσταλλα του πυριτίου. Η μέθοδος που εξετάζεται στην παρούσα εργασία κάνει χρήση υλικών αλλαγής φάσης για την απορρόφηση θερμότητας από τα πλαίσια, παρακάτω αναλύονται δοκιμασμένες εφαρμογές αυτής της τεχνικής ψύξης. [Moharram et al., 2013]

2.3. Θερμική αποθήκευση

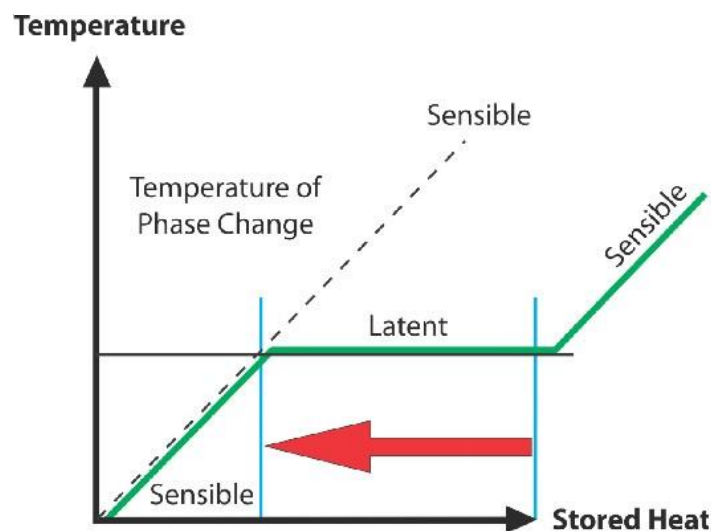
Κατά την μεταφορά θερμότητας σε ένα υλικό δύναται να αυξηθεί η θερμοκρασία του ή να χρησιμοποιηθεί αυτή η ενέργεια για την αλλαγή της φάσης του , τέτοιες αλλαγές είναι από:

- στερεό σε υγρό → τήξη
 - στερεό σε αέριο → εξάχνωση
 - υγρό σε στερεό → στερεοποίηση
 - υγρό σε αέριο → βρασμός/ατμοποίηση
 - αέριο σε στερεό → εναπόθεση
 - αέριο σε υγρό → συμπύκνωση
 - αέριο σε πλάσμα → ιονισμός
 - πλάσμα σε αέριο → ανασυνδυασμός
- [Γκέκας, 2000]

Οι κυριότεροι τρόποι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας , υπό την μορφή αισθητής θερμότητας όπου η προσφορά προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού και υπό την μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Λανθάνουσα θερμότητα, ονομάζεται το ποσό θερμότητας που πρέπει να απορροφηθεί ή να εκλυθεί, ώστε 1 gr ουσίας να αλλάξει φάση. Όταν απορροφάται θερμική ενέργεια από ένα υλικό, η θερμοκρασία του μειώνεται. Αντίστοιχα, όταν προσφέρεται θερμότητα σε ένα υλικό, η

θερμοκρασία του αυξάνει. Στο σημείο μετάβασης μεταξύ στερεής και υγρής φάσης, απαιτείται περισσότερη θερμότητα. Για να υπάρξει μετάβαση από υγρό σε στερεό, τα μόρια της ουσίας πρέπει να τοποθετηθούν αυστηρώς διατεταγμένα, και για να γίνει αυτό, θα πρέπει να αφαιρεθεί θερμότητα, ώστε να μεταπέσει το σύστημα σε μία χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη. Αντίθετα, για να έχουμε την αντίστροφη διαδικασία και τη μετάβαση από την στερεή κρυσταλλική μορφή στην υγρή χρειάζεται απορρόφηση θερμότητας έτσι ώστε να σπάσουν οι δεσμοί και να αποδεσμευθούν τα μόρια του υλικού. Στο διάγραμμα 4 βλέπουμε ότι στη θερμοκρασιακή περιοχή που γίνεται η αλλαγή φάσης παρότι συνεχίζει να προσφέρεται θερμότητα η θερμοκρασία του υλικού δεν ανεβαίνει και αυτό συμβαίνει μέχρι όλη η μάζα του υλικού να έχει αλλάξει φάση. [Γκέκας, 2000]

Διάγραμμα 4: Σχέση θερμοκρασίας και θερμότητας σε ένα υλικό κατά την θέρμανση του [Mehling et al., 2008]



Σε ορισμένα υλικά το ποσό της λανθάνουσας θερμότητας παρουσιάζεται ιδιαίτερα αυξημένο, ιδιότητα την οποία μπορούμε να αξιοποιήσουμε για να «εξουδετερώσουμε» μεγάλα ποσά θερμότητας, χωρίς να αυξήσουμε την θερμοκρασία του συστήματος.

2.4. Ιδιότητες υλικών αλλαγής φάσης

Τα υλικά που αλλάζουν φάση αποθηκεύοντας ενέργεια σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας σε ένα μέρος του θερμοκρασιακού τους εύρους και συναλλάσσοντας θερμότητα με τη μορφή αισθητής θερμότητας σε ένα άλλο μέρος, ονομάζονται

ΥΑΦ ή Phase Change Materials (PCMs). Όλα τα υλικά κατά την αλλαγή κατάστασης τους μεταξύ φάσεων αποθηκεύουν ή αποδίδουν ενέργεια προς το περιβάλλον. Μόνο όμως ένας μικρός αριθμός τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές σε συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας. Η κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης και η μεγάλη ενθαλπία τήξης είναι οι βασικές απαιτήσεις που πρέπει να καλυφθούν από ένα ΥΑΦ. Υπάρχουν όμως και άλλες ιδιότητες που πρέπει να διαθέτει ένα υλικό για να θεωρείτε κατάλληλο και αποτελεσματικό ΥΑΦ τέτοιες είναι:

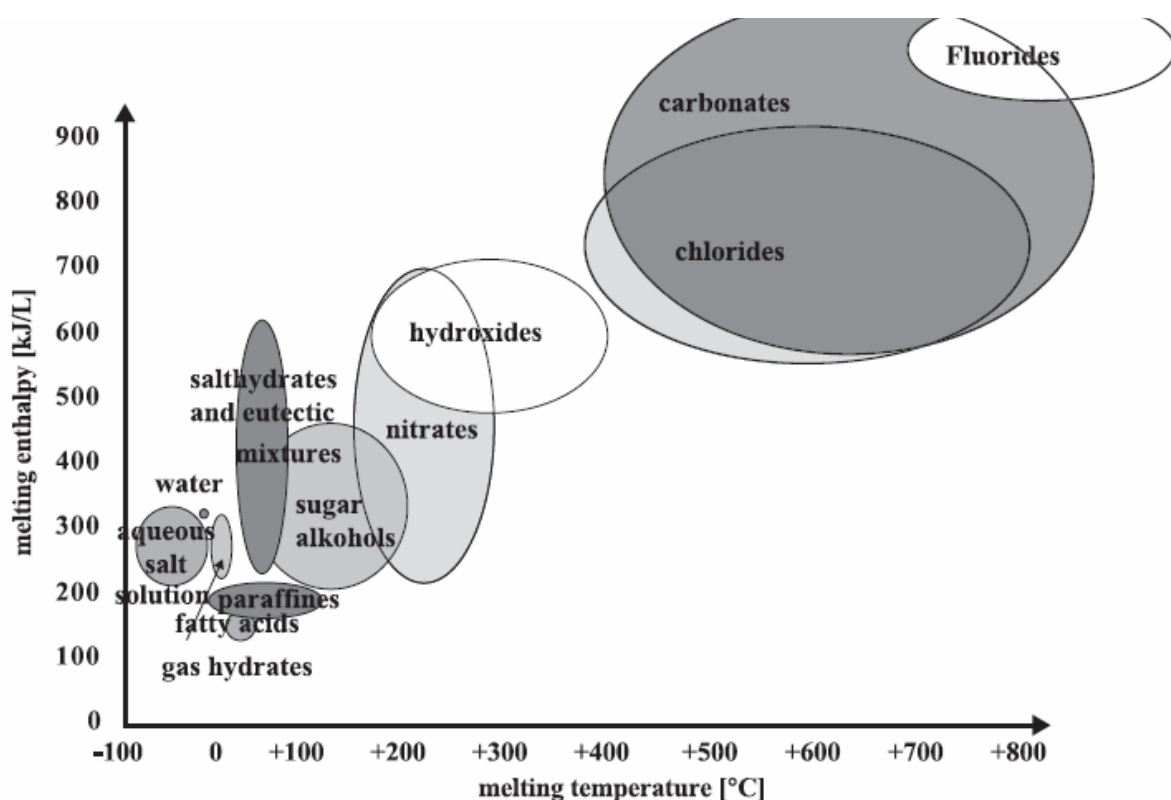
- Κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, ώστε να εξασφαλισθεί η αποθήκευση και στη συνέχεια η απελευθέρωση της θερμότητας σε μια εφαρμογή, με σταθερό θερμοκρασιακό εύρος.
- Μεγάλο ποσό ενθαλπίας αλλαγής φάσης (ΔH), για να επιτευχθεί υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας σε σχέση με την αποθήκευση που θα γινόταν αν είχαμε αποθήκευση ενέργειας με αισθητή θερμότητα.
- Μεγάλη τιμή της θερμικής αγωγιμότητας, ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή/εισαγωγή της αποθηκευμένης θέρμανσης ή ψύξης
- Δυνατότητα αναστρεψιμότητας των αλλαγών φάσεων, ώστε το υλικό να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί πολλές φορές. Είναι ιδιαίτερα σημαντική η σταθερότητα του κύκλου του υλικού .
- Μικρό ποσό υπέρψυξης (supercooling), ώστε να βεβαιωθούμε ότι το υλικό τήκεται και στερεοποιείται στις ίδιες θερμοκρασίες.
- Μικρή τιμή της πίεσης ατμών, σε περίπτωση που μας ενδιαφέρει η αέρια φάση του υλικού, για να μειωθούν οι απαιτήσεις μηχανικής αντοχής στο δοχείο που θα βρίσκεται το ΥΑΦ.
- Μικρή μεταβολή του όγκου κατά την αλλαγή φάσης, για να μειωθούν οι απαιτήσεις μηχανικής αντοχής στο δοχείο που θα φέρει το ΥΑΦ.

- Φυσική και χημική σταθερότητα του υλικού για να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής.
- Συμβατότητα με άλλα υλικά, ώστε να εξασφαλίζεται η μακροχρόνια διάρκεια ζωής του στο δοχείο, χωρίς να επηρεάζεται η δομή και η σύστασή του από τα υλικά των τοιχωμάτων του δοχείου και αντιστρόφως.
- Χαμηλή τιμή πώλησης, ώστε να είναι ανταγωνιστικό σε σχέση με άλλα προϊόντα τα οποία προσφέρουν αποθήκευση θερμότητας .
- Μη τοξικά, για περιβαλλοντικούς λόγους και λόγους ασφάλειας .
- Ανακυκλώσιμα, για περιβαλλοντικούς και οικονομικούς λόγους.
[Pharmaceutical Outsourcing, 2011]

2.5. Κατηγοριοποίηση των υλικών αλλαγής φάσης

Η βασική παράμετρος κατηγοριοποίησης των ΥΑΦ είναι τα συστατικά από τα οποία αποτελούνται ,οργανικά ή ανόργανα.

Διάγραμμα 5: Τυπικές τιμές θερμοκρασίας κι ενθαλπίας τήξης ΥΑΦ, [Paksoy, 2007]



2.5.1.Οργανικά υλικά

Τα οργανικά υλικά αποτελούνται κυρίως από παραφίνες και μικροκρυσταλλικά κεριά, τα οποία είναι μίγματα παραφινών με αριθμό ατόμων άνθρακα από 19 έως 25. Σημαντικές κατηγορίες οργανικών υλικών είναι τα λιπαρά οξέα, εστέρες και αλκοόλες λιπαρών οξέων ή και μίγματα αυτών. Τα εμπορικά προϊόντα οργανικών υλικών είναι αρκετά φθηνότερα από τα ένυδρα άλατα με μέτριες όμως τιμές λανθάνουσας θερμότητας (περίπου 150 kJ/kg) και δυνατότητα παραγωγής για σχεδόν όλο το εύρος των θερμοκρασιών. Η εμφάνιση supercooling είναι αμελητέα, είναι χημικά αδρανή και σταθερά, χωρίς να παρουσιάζεται διαχωρισμός φάσεων ή εκφυλισμός των ιδιοτήτων τους. Η χαμηλή τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (περίπου 0,2 W/m*K) που παρουσιάζουν, αποτελεί αρνητικό παράγοντα αφού περιορίζει τις εφαρμογές τους καθώς δεν διευκολύνουν την ροή θερμότητας. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος έχουν εξεταστεί πολλές περιπτώσεις εμπλουτισμού του υλικού με μεταλλικά στοιχεία διαφόρων σχημάτων ή χρήση δοχείων και σωλήνων με πτερύγια με σκοπό την αύξηση της ροής θερμότητας μέσα στο υλικό. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στα οργανικά υλικά επηρεάζεται αρκετά η πυκνότητα του υλικού από τη φάση, ώστε είναι δυνατόν όταν το υλικό στερεοποιηθεί και αυξηθεί η πυκνότητά του, να αποκολληθεί από τα τοιχώματα του δοχείου που τα περιέχει, γεγονός που θα επηρεάσει αρκετά το φαινόμενο της αγωγής θερμότητας. Ένα ακόμη μειονέκτημα είναι η πιθανή αναφλεξιμότητα τους. [Lane,1983]

2.5.1.1. Παραφίνες

Παραφίνη είναι το σύνηθες όνομα για μια ομάδα αλκανικών υδρογονανθράκων μεγάλου μοριακού βάρους, με γενικό μοριακό τύπο C_nH_{2n+2} , με $n>20$. Οι παραφίνες είναι ιδανικά υλικά για χρήση ως ΥΑΦ. Έχουν μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος τήξης και μπορούν να δημιουργηθούν, μέσω μιγμάτων, υλικά κατάλληλα να καλύψουν οποιοδήποτε εύρος θερμοκρασιών, ανάλογα με την εκάστοτε εγκατάσταση. Είναι οργανικές ουσίες, επομένως είναι φτηνές και άφθονες. Έχουν

αρκετά καλή αποθηκευτική ικανότητα σε σχέση με άλλα υλικά, όπως επίσης έχουν το πλεονέκτημα να μην υπερψύχονται, δηλαδή όλο το υλικό στερεοποιείται, χωρίς εμφάνιση υπέρψυξης, άρα το υλικό αποδίδει τη μέγιστη αποθηκευτική ικανότητά του. Επίσης, σαν οργανικές ουσίες, δεν εμφανίζουν το φαινόμενο του διαχωρισμού των φάσεων, πράγμα που σημαίνει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Οι παραφίνες παρουσιάζουν χαμηλή πίεση ατμοποίησης, ελαχιστοποιώντας απώλειες υλικού σε βάθος χρόνου χρήσης. Το πλεονέκτημα αυτό κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό για τις εφαρμογές όπου απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός κυκλικών φορτίσεων του υλικού. Επιπλέον δεν είναι διαβρωτικά και μπορούν να συσκευαστούν σε μεταλλικές κατασκευές. Θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο ότι οι παραφίνες πραγματοποιούν ολοκληρωμένα την αλλαγή φάσης σε θερμοκρασιακό εύρος περίπου 10 K (περίπου 9K πριν το Σημείο Τήξης και 1K μετά από αυτό). Αν δεν ληφθεί υπ' όψη το φαινόμενο αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μη σωστή εκλογή υλικού με αποτέλεσμα μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με τις αναμενόμενες τιμές. Η ύπαρξη πληθώρας ουσιών (διάγραμμα 6) με διαφορετικά σημεία τήξης λύνει τα χέρια των μελετητών και δίνει τη δυνατότητα σχεδιασμού και ανάπτυξης αποδοτικότερων και οικονομικότερων συστημάτων.

Διάγραμμα 6 Ευρέως χρησιμοποιούμενες παραφίνες [Pharmaceutical Outsourcing, 2011]

Compound Name	# of Carbon Atoms	Melting Point (°C.)
n- Octacosane	28	61.4
n-Heptacosane	27	59.0
n-Hexacosane	26	56.4
n-Pentacosane	25	53.7
n-Tetracosane	24	50.9
n-Tricosane	23	47.6
n-Docosane	22	44.4
n-Heneicosane	21	40.5
n-Eicosane	20	36.8
n-Nonadecane	19	32.1
n-Octadecane	18	28.2
n-Heptadecane	17	22.0
n-Hexadecane	16	18.2
n-Pentadecane	15	10.0
n-Tetradecane	14	5.9
n-Tridecane	13	-5.5

Υπάρχει ακόμα χώρος για μελέτη και βελτίωση αυτών των συστημάτων, λόγω του υπαρκτού κινδύνου ανάφλεξης της υγρής φάσης της παραφίνης, καθώς επίσης και για την ανάπτυξη μεθόδων ακόμη καλύτερης ενσωμάτωσης της παραφίνης στα υλικά για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου διαφυγής ΥΑΦ, όταν αυτό βρίσκεται στην υγρή φάση.[Boese et al.,1999]

2.5.1.2. Λιπαρά οξέα

Τα λιπαρά οξέα χαρακτηρίζονται από τον γενικό μοριακό τύπο $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$. Εμφανίζουν σημεία τήξης και λανθάνουσα θερμότητα παρόμοια με αυτά των παραφινών. Τα λιπαρά οξέα χαρακτηρίζονται από πολύ σταθερό κύκλο φόρτισης και αποφόρτισης. Επίσης, παρουσιάζεται ελάχιστα ή καθόλου το φαινόμενο του supercooling όμως, όπως οι παραφίνες έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Ένα μειονέκτημα αυτής της ομάδας υλικών είναι η κακοσμία, γεγονός που όπως γίνεται κατανοητό περιορίζει δραματικά τη χρήση του χώρου στον οποίο αυτά εγκαθίστανται. Τα παραπάνω προβλήματα θα μπορούσαν να ξεπεραστούν κάνοντας χρήση κάποιου είδους συσκευασία, δίνοντας έτσι ένα ΥΑΦ φτηνό, χημικά σταθερό, ιδανικό για εφαρμογές κατά τις οποίες υπάρχει συχνή ανθρώπινη παρουσία. [Sari et al., 2003]

2.5.2.Ανόργανα υλικά

Τα ένυδρα άλατα είναι ο κύριος εκπρόσωπος ανόργανων υλικών και παρουσιάζουν αρκετά καλές ιδιότητες (τιμή λανθάνουσας θερμότητας περίπου 250 kJ/kg και αγωγιμότητας 0,6 W/m²K περίπου), μέτριο κόστος παραγωγής σε σχέση με τις παραφίνες αλλά υψηλό κόστος πώλησης σε σχέση με τις τιμές πώλησης των παραφινών λόγω της επιβεβλημένης ενσωμάτωσής τους σε προστατευτικό κάλυμμα καθώς και χρήση πρόσθετων ουσιών σταθεροποίησης των ιδιοτήτων τους. Τα ένυδρα άλατα μελετήθηκαν σε αρκετές έρευνες σχετικά με τη δυνατότητα χρησιμοποίησής τους σαν ΥΑΦ. Ο κύριος λόγος είναι το σχετικά μεγάλο εύρος σημείων τήξης που διαθέτουν, σχεδόν από 0 έως 120oC, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για θερμικές εφαρμογές πολλών ειδών . Ο γενικός χημικός τύπος είναι $\text{M} \cdot n\text{H}_2\text{O}$, όπου M είναι μία ανόργανη ουσία, ενυδατωμένη με n μόρια νερού, και

σχηματίζει μία σύνθετη ουσία ικανή να αποθηκεύσει μεγάλο ποσό θερμότητας υπό μορφή λανθάνουσας. Η αρχή λειτουργίας των ένυδρων αλάτων, βασίζεται στην απομάκρυνση του κρυσταλλικού νερού, το οποίο αποβάλλεται όταν προσδοθεί θερμότητα στο άλας σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Με τον τρόπο αυτό, αποθηκεύεται θερμότητα στο ΥΑΦ, η οποία αποβάλλεται με επανακρυστάλλωση του νερού του άλατος. Βασικά μειονεκτήματα των ανόργανων ΥΑΦ είναι, κυρίως για τα ένυδρα άλατα, η ασυμβατότητα του ΥΑΦ με τα υλικά συσκευασίας διότι η διαβρωτική τους ιδιότητα δημιουργεί προβλήματα στην εύρεση υλικών συσκευασίας και το γεγονός ότι ο όγκος τους αλλάζει πολύ κατά την αλλαγή της θερμοκρασίας τους καθώς έχουν υψηλό συντελεστή θερμικής διαστολής.

[Robynne Murray et al., 2011]

2.6. Εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης

2.6.1.Εφαρμογές σε κτήρια

Η εφαρμογή τους γίνεται με δύο τρόπους , ενεργητικά όταν απαιτείτε μηχανολογικός εξοπλισμός για την φόρτιση και αποφόρτιση του υλικού είτε παθητικά όπου τα υλικά ενσωματώνονται στα δομικά στοιχεία του κτηρίου και η μεταβολή τους από την μία φάση στην άλλη γίνεται χωρίς την βοήθεια επιπλέον εξοπλισμού. Τα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν επίσης να τοποθετηθούν σε δεξαμενές εντός των κτηρίων ως τμήμα των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης. Η εφαρμογή των ΥΑΦ στα δομικά υλικά μπορεί να γίνει είτε με χρήση των ΥΑΦ αυτούσιων (σαν στρώμα υλικού μέσα στα υλικά του τοίχου), ή σαν συστατικό σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο ή το γύψο (γυψοσανίδες ή σοβάς με ΥΑΦ). [Mehling et al ,2008]. Ένας ακόμα τρόπος ενσωμάτωσης των ΥΑΦ στα κτήρια είναι με την χρήση μικροκαψούλων . Οι εν λόγω μικροκάψουλες δύναται να τοποθετηθούν μέσα στο σκυρόδεμα , μέσα σε γυψοσανίδες μέχρι και στις τρύπες των τούβλων. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 1 έχει δοκιμαστεί και η τοποθέτηση

τους στην ψευδοροφή κτηρίων, καθώς έχει παρατηρηθεί μεγάλη απώλεια ενέργειας από το ταβάνι κτηρίων .

*Εικόνα 1: Τοποθέτηση ΥΑΦ στην ψευδοροφή κτηρίων
[Building. CO, 2012]*



2.6.2. Ηλιακά συστήματα

Κατά την διάρκεια μιας ημέρας, φτάνουν στην γη μεγάλα ποσά ενέργειας από τον ήλιο το οποία μπορούμε να εκμεταλλευτούμε. Η χρήση των ΥΑΦ μας επιτρέπουν να αποθηκεύσουμε αυτήν την ενέργεια με την μορφή θερμότητας και να την χρησιμοποιήσουμε κατά τις ώρες οπότε δεν υπάρχει ηλιοφάνεια. Η λειτουργία των συστημάτων αυτών είναι σχετικά απλή , το ΥΑΦ τοποθετείτε σε ένα δοχείο και λειτουργεί ως θερμική αποθήκη . Κατά την διάρκεια της ημέρας το υλικό φορτίζεται δηλαδή αλλάζει η φάση του αποθηκεύοντας μεγάλα ποσά θερμότητας ως λανθάνουσα αλλά και αισθητή θερμότητα. Για την ανάκτηση της αποθηκευμένης ενέργειας το εργαζόμενο μέσο , ΥΑΦ, οδηγείται στον εναλλάκτη όπου μεταφέρει την θερμότητα του σε ένα άλλο μέσο (συνήθως νερό),καθώς το ΥΑΦ ψύχεται αποδίδει την θερμότητα που είχε αποθηκεύσει. Η ηλιακή ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη κάθε στιγμή οπότε αυτά τα ηλιακά συστήματα απαιτούν μια επιπλέον συσκευή , ένα σύστημα μεταφοράς της θερμικής ενέργειας συνήθως με νερό (όπως ο γνωστός ηλιακός θερμοσίφωνας κλειστού τύπου). Ένα τέτοιο σύστημα με ΥΑΦ έχει πλεονεκτήματα σε σχέση με ένα συμβατικό καθώς η δεξαμενή είναι μικρότερου όγκου για την ίδια απόδοση . Επίσης απαιτείτε μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της φόρτισης και αποφόρτισης του υλικού . Τα

πλεονεκτήματα αυτά πηγάζουν από την μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα που απορροφά το ΥΑΦ. Συνδυασμός συμβατικών συστημάτων με ΥΑΦ αποτελούν εξαιρετική λύση καθώς παρέχουν μεγαλύτερο έλεγχο της θερμοκρασίας του νερού. [Λύκος, 2007]

2.6.3. Ηλεκτρονικά εξαρτήματα

Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στις υψηλές θερμοκρασίες, επηρεάζοντας την εύρυθμη λειτουργία τους, την απόδοσή τους και τον χρόνο ζωής τους. Όταν το ρεύμα διαπερνά ηλεκτρικά κυκλώματα συναντά αντιστάσεις (μέσα στα καλώδια, τα τρανζίστορ, και τις πλακέτες πυριτίου) οι οποίες αυξάνουν την θερμοκρασία τους. Στόχος των κατασκευαστών είναι η διατήρηση των εξαρτημάτων στη χαμηλή θερμοκρασία όπου έχει μελετηθεί η μέγιστη απόδοσή τους. Συνήθως τα συστήματα ψύξης που χρησιμοποιούνται κάνουν χρήση κάποιου συστήματος ενεργητικής ψύξης με ανεμιστήρες ή αντλίες νερού όμως αυτό αυξάνει την ενεργειακή κατανάλωση και τον παραγόμενο θόρυβο. Αντιθέτως η χρήση των ΥΑΦ δεν απαιτεί προσθήκη ηλεκτρομηχανολογικού εξαρτήματος αφού το ΥΑΦ αυτό ανανεώνεται και επανέρχεται στην φυσική του κατάσταση. Κατά την λειτουργία το ΥΑΦ απορροφά την επιπλέον θερμότητα και διατηρεί την συνολική θερμοκρασία στα επιθυμητά επίπεδα. Με το πέρας της λειτουργίας το ΥΑΦ ψύχεται αποδίδοντας στο περιβάλλον την θερμότητα που είχε απορροφήσει και επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση.

Εικόνα 2: Α Χρήση ΥΑΦ για ψύξη ηλεκτρονικών server [Finoric LLC, 2010]



Οι εφαρμογές των ΥΑΦ στην ψύξη των επεξεργαστών των ηλεκτρονικών υπολογιστών, έχουν αρχίσει να προτιμώνται από τις συμβατικές με τα ανεμιστηράκια και τα μεταλλικά πτερύγια. Παρόλο που το κόστος τους είναι αυξημένο, κυρίως λόγω του μικρού μεγέθους τους, η λειτουργία τους είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και συμφέρουσα από άποψη ενεργειακής κατανάλωσης και θορύβου, ιδίως όσο αυξάνεται η υπολογιστική ισχύς και είναι σημαντικό να μην μειώνεται η απόδοση των επεξεργαστών. Έχουν αναπτυχτεί μικρές εύκαμπτες επιφάνειες (εικόνα 3) αποτελούμενες από ΥΑΦ για να τοποθετούνται επάνω στους επεξεργαστές κρατώντας τους σε θερμοκρασία μέγιστης απόδοσης.

Εικόνα 3: Μικροφίλμ από υλικό αλλαγής φάσης τοποθετημένο πάνω στον επεξεργαστή ηλεκτρονικού υπολογιστή [Bergquistcompany, 2013]



2.6.4.Μεταφορές αγαθών και ιατρικών προϊόντων

Η μεταφορά αγαθών είναι ζωτικής σημασίας για την οικονομία μας και ορισμένα από αυτά τα αγαθά , όπως ευπαθή τρόφιμα , φάρμακα ακόμα και ανθρώπινα όργανα ,είναι σημαντικό να παραμένουν σε χαμηλές θερμοκρασίες συντήρησης καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας τα αλλοιώνει. Η συμβατική μέθοδος μεταφοράς είναι με φορητά ψυγεία τα οποία όμως καταναλώνουν τεράστια ποσά ενέργειας αυξάνοντας το κόστος μεταφοράς των εν λόγω προϊόντων. Η εφαρμογή των ΥΑΦ σε τέτοιες περιπτώσεις αποτελεί πολύ καλή επιλογή. Τα φορητά ψυγεία παράγουν την απαραίτητη ψύξη καταλαλώντας ντίζελ μια μέθοδος εξαιρετικά ακριβή και ρυπογόνα, αντίθετα τα ΥΑΦ μπορούν να φορτίζονται σε ψυγεία καταναλώνοντας ηλεκτρική ενέργεια μη αιχμής που ως γνωστό είναι κατά πολύ φθηνότερη. Τα ανθρώπινα όργανα και παράγωγα όπως το αίμα πρέπει να διατηρούνται αυστηρά σε ακριβές θερμοκρασιακό εύρος γιατί η μη επίτευξη αυτού

οδηγεί σε αλλοίωση τους και καθίστανται ακατάλληλα για χρήση. Σε τέτοιες περιπτώσεις κατασκευάζονται ειδικά δοχεία και τα ΥΑΦ που τοποθετούνται (εικόνα 4) επιλέγονται αυστηρά με βάση την θερμοκρασία τήξης τους ώστε να υπάρχει ακριβής έλεγχος της θερμοκρασίας. Τα ΥΑΦ μπορούν να αντικαταστήσουν τα περίπλοκα και ακριβά συστήματα ψύξης που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα. [Rubitherm, 2011]

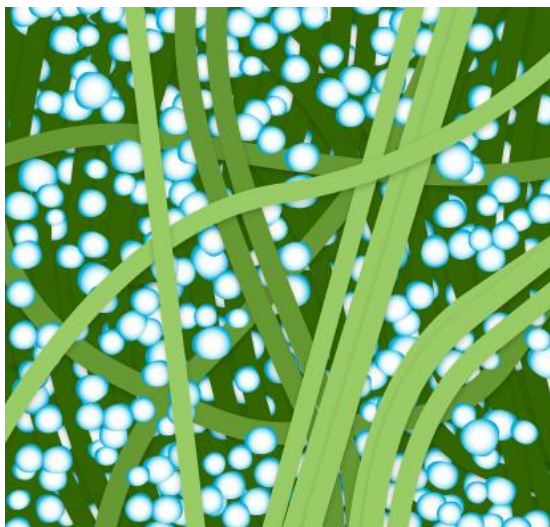
Εικόνα 4: ΥΑΦ που τοποθετούνται σε Θέρμο μονωμένα δοχεία μεταφοράς αγαθών [Rubitherm ,2011]



2.6.5.Εφαρμογές στο ρουχισμό

Η εισαγωγή ΥΑΦ στον ρουχισμό ξεκίνησε ως τρόπος αντιμετώπισης των απότομων θερμοκρασιακών μεταβολών με τις οποίες επερχόντουσαν αντιμετώπιζον αστροναύτες και κατ επέκταση πυροσβέστες . Η τεχνική ενσωμάτωσης των υλικών στις ίνες των ρούχων γίνεται με χρήση μικροσκοπικών καψουλών οι οποίες «πλέκονται» μέσα στα ρούχα. Σήμερα αρκετές εταιρίες δραστηριοποιούνται στον τομέα αυτό καθώς η ενσωμάτωση των ΥΑΦ δεν εφαρμόζεται μόνο σε ειδικευμένο ρουχισμό για συγκεκριμένες εργασίες αλλά και σε καθημερινά αθλητικά ρούχα. Το σκεπτικό είναι ότι το όταν το ανθρώπινο σώμα αθλείται παράγεται θερμότητα ως παραπροϊόν την μεταβολικής διεργασίας , αυτή η θερμότητα οδηγεί στη εφίδρωση η οποία είναι ανεπιθύμητη. Τα ρούχα αυτά προβλέπονται και για το αντίστροφο φαινόμενο , κατά το οποίο το άτομο μεταφέρεται από ένα θερμό περιβάλλον (σπίτι τον χειμώνα) σε ένα πολύ ψυχρότερο, τα ΥΑΦ φορτίζονται κατά την εξωτερική αλλαγή και κάνουν την μετάβαση πιο ομαλή για τον ίδιο.

Εικόνα 5: Ενσωμάτωση μικροσκοπικών καψουλίων παραφίνης σε ύφασμα ρουχισμού [Staedter, 2013]



2.7. Διαθεσιμότητα υλικών αλλαγής φάσης στην αγορά

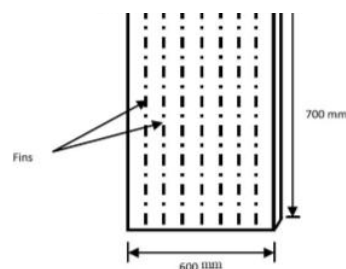
Έχει γίνει κοινώς αποδεκτό ότι τα ΥΑΦ αρχίζουν να χρησιμοποιούνται σε όλο και περισσότερες εφαρμογές. Η αύξηση της εμπιστοσύνης στην αποτελεσματικότητα τους έχει αυξήσει τις πωλήσεις τους δραματικά. Η εταιρία MarketsandMarkets σε μελέτη της που έγινε το 2013 εκτίμησε ότι η βιομηχανία των ΥΑΦ θα αγγίξει τα 1150 εκατομμύρια \$ εν έτη 2018 . Πρόκειται για ετήσια αύξηση της τάξης του 20% . Το γεγονός αυτό είναι εξαιρετικά ελπιδοφόρο για την αγορά καθώς η αύξηση του μεγέθους της αγοράς θα ρίξει την τιμή των υλικών με αποτέλεσμα να μειωθεί ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των ΥΑΦ , αυτό του υψηλού τους κόστους. Η πτώση των τιμών θα επιτρέψει να γίνουν περισσότερες έρευνες, περισσότερα πειράματα και περισσότερες δοκιμές με τα υλικά αυτά αυξάνοντας την τεχνογνωσία μας πάνω στο θέμα. Σήμερα οι εταιρίες που ηγούνται της αγοράς είναι η Cristopia (Γαλλία), TEAP Ενέργειας (Αυστραλία), Rubitherm GmbH (Γερμανία), EPS Ltd (UK), PCM Thermal Solutions (ΗΠΑ), Climator (Σουηδία) και η Mitsubishi Chemical (Ιαπωνία). Κάθε μία από αυτές τις εταιρίες ειδικεύονται στην κατασκευή και ενσωμάτωση των ΥΑΦ σε διάφορες εφαρμογές. Το κόστος τους έχει μεγάλες διακύμανσης που εξαρτώνται από την ποσότητα αγοράς , από την μέθοδο συσκευασίας τους (κάψουλες, πάνελ , πλαστικά δοχεία). Για παράδειγμα η απλές μικρού αριθμού

ανθράκων παραφίνες πωλούνται γύρω στα 2 €/kg ενώ το καθαρό εικοσάνιο $C_{20}H_{42}$ πωλείται 53 €/kg. Γενικότερα μπορούμε να υπολογίζουμε ότι το κόστος ανέρχεται στα 5 €/kg για τα πιο ευρέως διαδομένα ΥΑΦ. Η αμερικανική κυβέρνηση εκτιμά ότι σε 10 χρόνια το μέσο κόστος θα είναι στα 2,2€/kg [National Renewable Energy Laboratory, 2014]

2.8. Εφαρμογές σε φωτοβολταϊκά

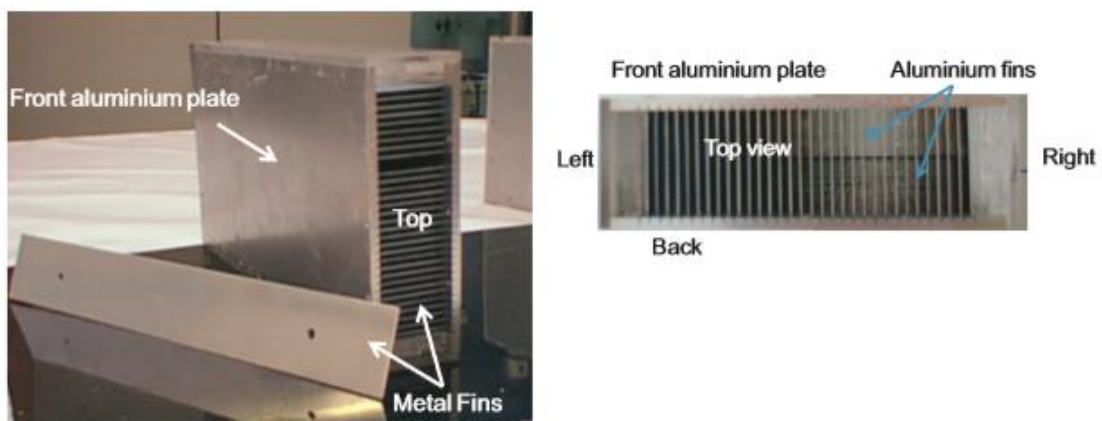
Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες ενσωμάτωσης των ΥΑΦ στην «πλάτη» των φωτοβολταϊκών πλαισίων για ρύθμιση της θερμοκρασία τους. Όμως παρά το γεγονός ότι έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες και έρευνες για την επιρροή της αύξησης θερμοκρασίας στα φωτοβολταϊκά οι αρνητικές επιπτώσεις είναι γνωστές, δεν έχει δοθεί η απαιτούμενη βαρύτητα στο σχεδιασμό συστημάτων ψύξης. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν συνοπτικά η μελέτες και τα πρωτότυπα σχέδια πάνω στην ψύξη των φωτοβολταϊκών πλαισίων με χρήση ΥΑΦ. Ο [Hendricks et al.] μελέτησαν μια απλή πειραματική διάταξη , απλό δοχείο με ΥΑΦ στην πλάτη ενός πλαισίου, σε δύο περιοχές με διαφορετικές κλιματικές συνθήκες (Ουτρέχτη και Μάλαγα) . Σκοπός του ήταν να ερευνήσει το πιθανό ενεργειακό καθώς και οικονομικό κέρδος ενός τέτοιου συστήματος. Τα αποτελέσματα του δεν ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά αφού στην διάρκεια ενός έτους το ενεργειακό κέρδος ήταν της τάξης του 1,7% στη Μάλαγα ενώ στην Ουτρέχτη ήταν πρακτικά αμελητέο. Η οικονομική απόσβεση μιας τέτοιας επένδυσης ξεπερνά κατά πολύ το διάστημα της εικοσαετίας με συμπέρασμα η λύση να μην θεωρείτε οικονομικά βιώσιμη. Εξαιρετικό ενδιαφέρον έχει όμως το θεωρητικό μοντέλο που συνέταξε σύμφωνα με το οποίο , αν καταφέρουμε να κρατήσουμε την θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών στα επίπεδα που προτείνει ο κατασκευαστής , μπορούμε να έχουμε αύξηση των ενεργειακών αποδοχών κατά 72%.[Hendricks et al., 2011].

Εικόνα 6: Η διαστασιολόγηση της συσκευής με τα μεταλλικά πτερύγια στο εσωτερικό της [Hasan et al,2010]

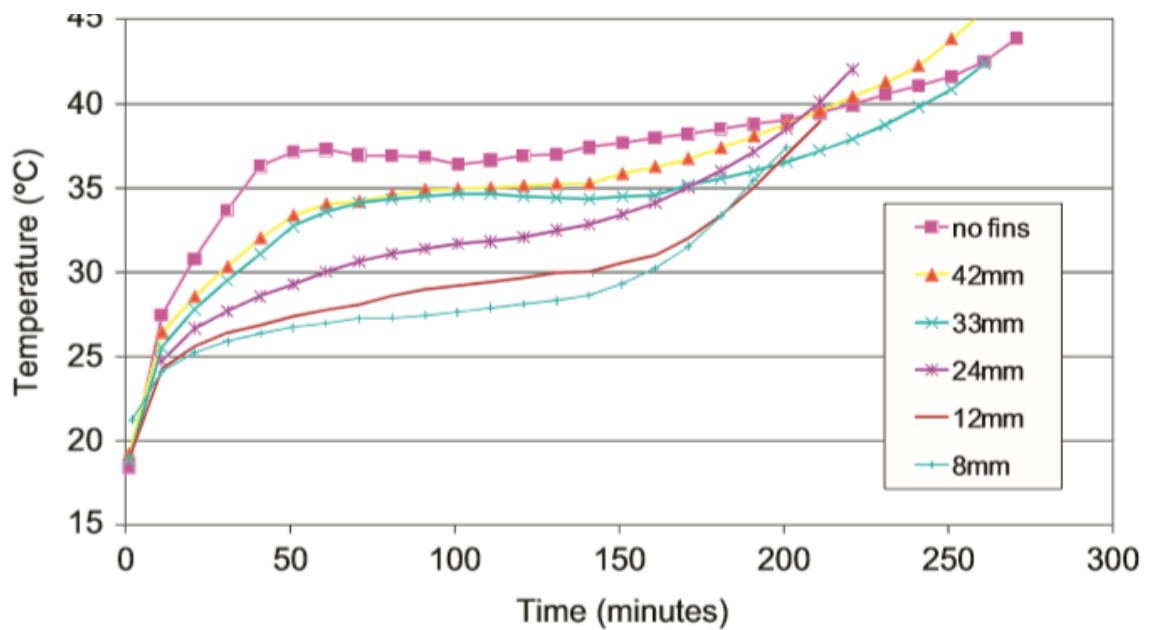


Οι Hasan et al. πηγαίνοντας την παγκόσμια έρευνα ένα βήμα πιο μπροστά τοποθέτησε εντός του δοχείου , που περιέχει το ΥΑΦ, μεταλλικά πτερύγια [εικόνα 6] για να υπάρχει καλύτερη αγωγή της θερμότητας από το πλαίσιο στο ΥΑΦ. Η μελέτη έγινε πάλι σε δύο περιοχές με διαφορετικά κλίματα, Πακιστάν και Ιρλανδία, Το αποτέλεσμα ήταν πως η απόδοση ήταν καλύτερη στο θερμό κλίμα του Πακιστάν σχεδόν διπλάσια από αυτή της Ιρλανδίας. Επίσης προχωρά και σε μια κοστολόγηση των συστημάτων. Παρ ότι τα δύο συστήματα που κατασκεύασε έχουν μεγάλο κόστος (430 \$ το καθένα) μελέτησε το κόστος που θα είχαν σε περίπτωση μαζικής παραγωγής. Η εκτίμηση είναι ελπιδοφόρα καθώς το κόστος πέφτει στα 30\$ το κομμάτι, τιμή διόλου απαγορευτική και οικονομικά βιώσιμη. Ο συντάκτης της έρευνας επισημαίνει πως συστήματα με ΥΑΦ έχουν μέλλον σε θερμά κλίματα όπως αυτό του Πακιστάν. [Hasan et al., 2010] Η μελέτη των Huang et al επικεντρώθηκε στην διαστασιολόγηση των μεταλλικών πτερύγιων. Κατασκεύασε την συσκευή της εικόνας 7 στην οποία μπορούσε να μετακίνηση τα εσωτερικά μεταλλικά πτερύγια και να πολλές κάνει μετρήσεις για διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ αυτών.[Huang et al.,]

Εικόνα 7: Μεταλλική κατασκευή με αφαιρούμενα πτερύγια [Huang et al., 2011]



Διάγραμμα 7: Θερμοκρασία ως προς τον χρόνο για διαφορετικές αποστάσεις πτερυγίων [Huang et al., 2011]

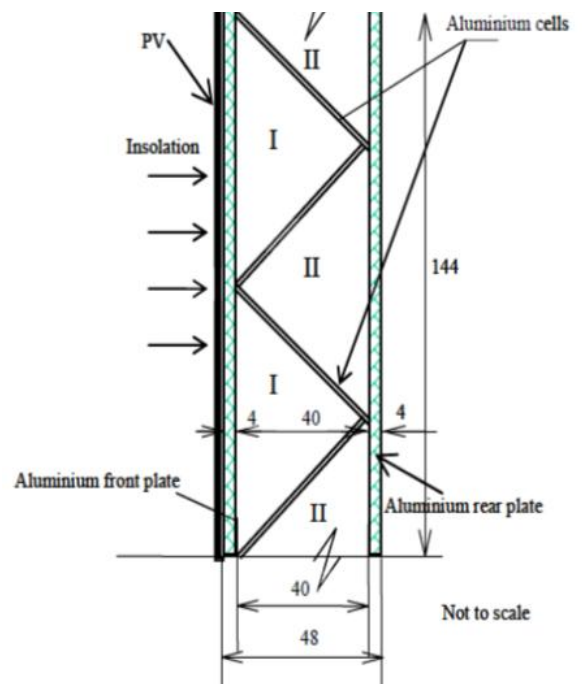


Μετά το πέρας των μετρήσεων κατασκεύασε ένα συνοπτικό γράφημα [γράφημα 6] στο οποίο φαίνεται η θερμοκρασιακή συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού για διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των πτερυγίων.

Ως πιο αποτελεσματικά στην διατήρηση της θερμοκρασίας σε χαμηλά επίπεδα για τον μεγαλύτερο χρόνο φαίνονται τα πτερύγια με απόσταση 8mm και 12mm. Δεν ισχύει όμως πως η μείωση της απόστασης τους συνεπάγει την αύξηση της απόδοσης τους καθώς βλέπουμε ότι αυτά των 8mm είναι λιγότερο αποδοτικά σε βάθος χρόνου από αυτά των 12 mm.

Ένα μαθηματικό μοντέλο κατασκευάστηκε από τους Henry Biwole et al. χρησιμοποιώντας ένα φύλλο αλουμινίου αντί για φωτοβολταϊκό. Τα συμπεράσματα από αυτή την μελέτη είναι πως το ΥΑΦ που χρησιμοποιήθηκε (RT25) καταφέρνει να διατηρήσει το πλαίσιο σε θερμοκρασία 40°C για 80 λεπτά ενώ το πλαίσιο χωρίς ΥΑΦ ξεπέρνα αυτή τη θερμοκρασία σε μόλις 5 λεπτά. [Henry Biwole et al., 2011]

Εικόνα 8: Η κατασκευή των Huang και Hewitt με τα δυο κελιά που θα υποδεχτούν τα διαφορετικά ΥΑΦ



Μια ακόμη εφαρμογή αποτελεί αυτή των Huang και Hewitt, η μελέτη των οποίων είχε ως στόχο τη βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας των ΥΑΦ ώστε να επιτευχθεί ρύθμιση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, σε συστήματα φωτοβολταϊκών – ΥΑΦ ενσωματωμένα σε κτίρια. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα τροποποιημένο φωτοβολταϊκό – ΥΑΦ στο οποίο ενσωματώθηκαν δύο τύποι ΥΑΦ. Με τη βοήθεια ενός μοντέλου, διεξήχθησαν μια σειρά αριθμητικών προσομοιώσεων για πραγματικές συνθήκες. Το σύστημα φωτοβολταϊκών – ΥΑΦ σχεδιάστηκε με μικρά μεταλλικά κελιά ώστε να είναι δυνατή η εισαγωγή δύο διαφορετικών ΥΑΦ ώστε να ενισχυθεί η μετάδοση θερμότητας. Τα διαφορετικά χαρακτηριστικά θερμικής αγωγιμότητας των ΥΑΦ έδωσαν τη δυνατότητα διατήρησης μιας χαμηλότερης θερμοκρασίας στο φωτοβολταϊκό για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Τα ΥΑΦ που διερευνήθηκαν ήταν τα RT21, RT27, RT31 και RT60 της εταιρείας Rubitherm, τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον πίνακα 1

Πίνακας 1: ΥΑΦ που χρησιμοποιήθηκαν [Rubitherm]

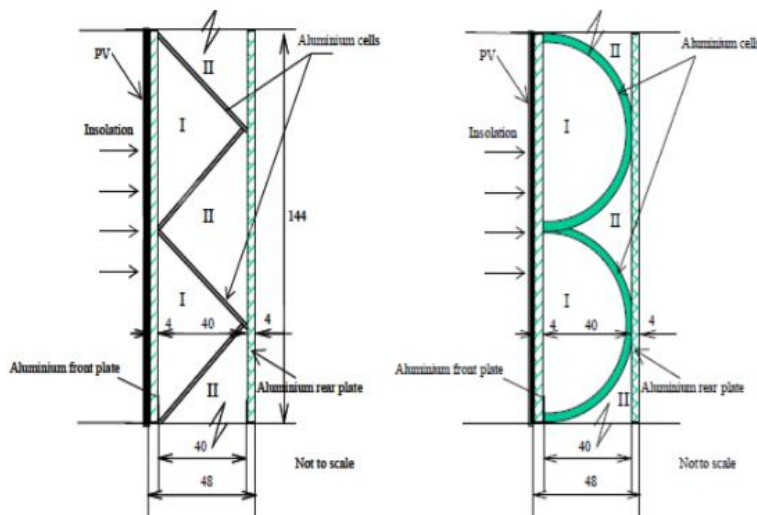
		RT21	RT27	RT31	RT60
Property	Melting temperature	21	27	29	60
	Latent heat (kJ/kg)	134	184	169	144
	Density (kg/l)				
	Liquid	0.76	0.75	0.77	0.78
	Solid	0.84	0.84	0.89	0.95
	Thermal conductivity (W/mK)	0.2	0.2	0.2	0.2
	Viscosity (mm ² /s)	25.71	26.32	28.57	37.05

Σε αυτή τη μελέτη αποδείχθηκε πως είναι εφικτή η περεταίρω ρύθμιση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού. Ο συνδυασμός υλικών με τις μικρότερες θερμοκρασίες τήξης (21 °C και 27 °C) ήταν εκείνος όπου, για ένα μικρό χρονικό διάστημα διατήρησε το φωτοβολταϊκό στις χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας, ενώ για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, η πλήρωση της διάταξης μόνο με Rubitherm RT27, έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα [Huang and Hewitt, 2011].

Η Μ. J. Huang , σε παρόμοια εφαρμογή συνέκρινε θεωρητικά την θερμοκρασία που αναπτυσσόταν σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο με ΥΑΦ της εταιρείας

Rubitherm, τοποθετημένα μέσα σε μια τριγωνική αρχικά διάταξη και ύστερα σε μία ημικυκλική. Οι δύο διατάξεις παρουσιάζονται παρακάτω.

Εικόνα 8: Οι τριγωνική και η ημικυκλική διάταξη [Huang, 2011]



Από αυτήν την προσομοίωση, η M. J. Huang κατέληξε πως η διαφορά στη θερμική ρύθμιση που μπορεί να επιτύχει το ΥΑΦ σε μια ημικυκλική διάταξη δεν έχει ιδιαίτερες διαφορές από αυτή που παρέχει η τριγωνική διάταξη.

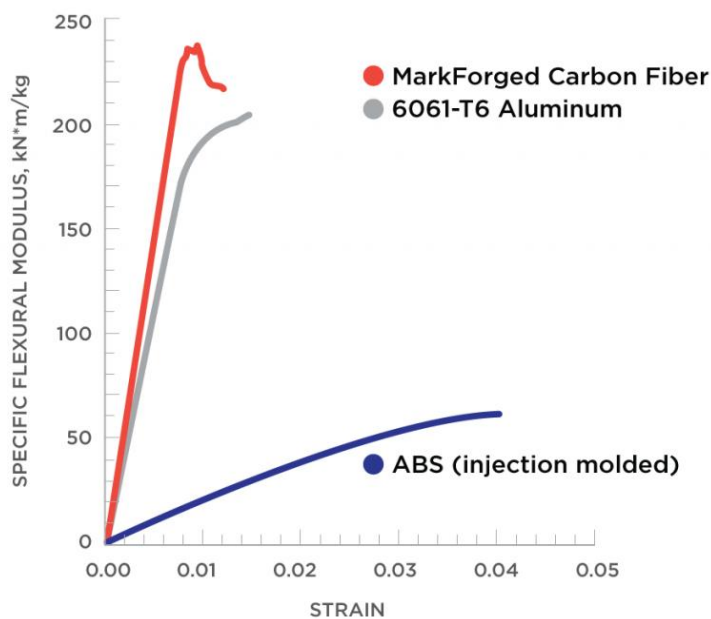
3. Μεθοδολογία προσέγγισης

3.1. Επιλογή μεθόδου

Ύστερα από προσεκτική ανάλυση και μελέτη των προϋπαρχόντων σχεδίων καταλήγουμε στην βέλτιστη κατασκευή λαμβάνοντας υπόψη διάφορες παραμέτρους όπως, το κόστος, η ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες και μηχανικές τάσεις, η θερμική αγωγιμότητα του υλικού και φυσικά η απόδοση του συστήματος. Το υλικό που επιλέχτηκε είναι το μέταλλο λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας και της ευκολίας κατασκευής ενός ανθεκτικού μηχανισμού. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετήθηκε η πιθανή χρήση και άλλων υλικών όπως θερμοπλαστικά και ανθρακονήματα. Τα πρώτα ήταν πολλά υποσχόμενα λόγω της πλήρους στεγανοποίησης που προσφέρουν καθώς και της αντοχής τους στις καιρικές συνθήκες (υγρασία, κατακρημνίσεις) παρουσίαζαν όμως προβλήματα ανθεκτικότητας καθώς μια τόσο μεγάλη επιφάνεια πλαστικού θα αντιμετώπιζε

προβλήματα στήριξης και αντοχής. Τα ανθρακονήματα έμοιαζαν ιδανική λύση καθώς είναι εξαιρετικά ανθεκτικά και πολύ ελαφριά, δεν θα επιβάρυναν με επιπλέον βάρος το πλαίσιο. Επίσης η τεχνολογία της εκτύπωσης σε τρεις διαστάσεις μας επιτρέπει να κατασκευάσουμε όλη την κατασκευή ως ενιαία διάταξη χωρίς ενώσεις και συγκολλήσεις.

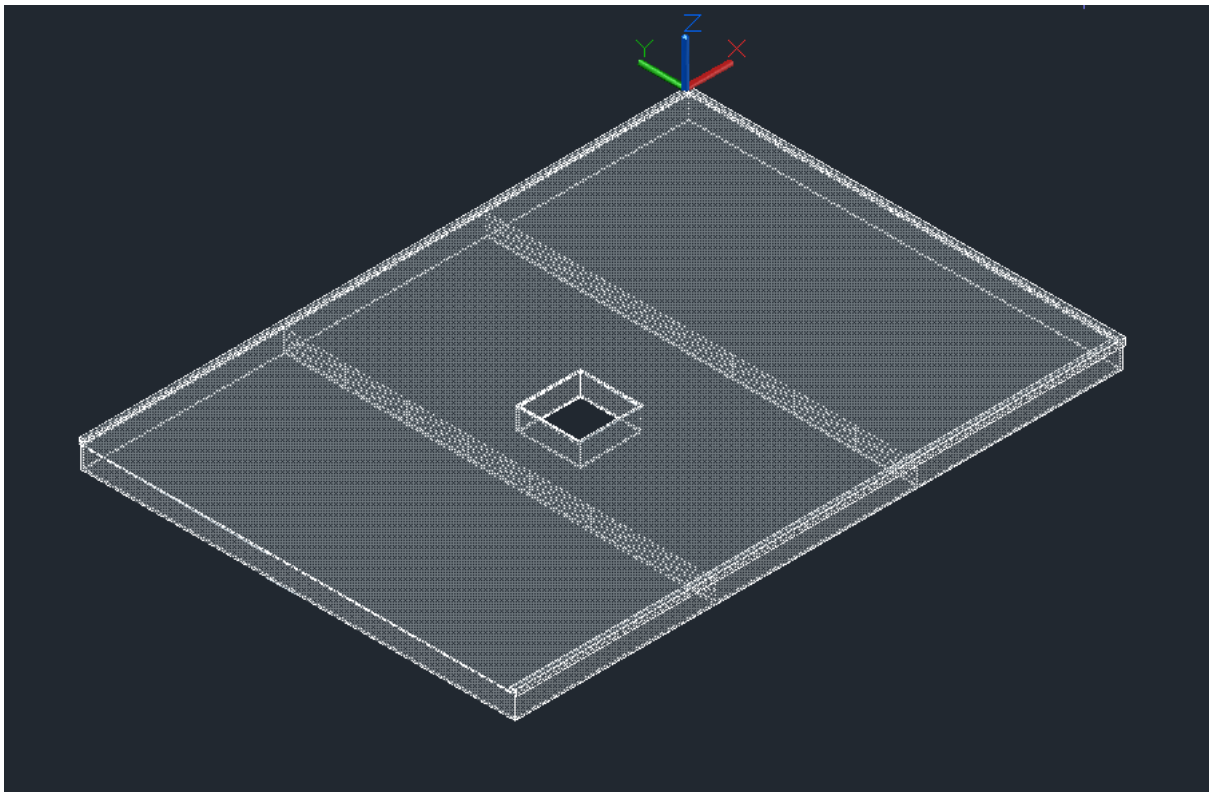
Διάγραμμα 8: Η διαφορά αντοχής των ανθρακονημάτων από το πλαστικό ABS [Markforged,2014]



Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 8 τα ανθρακονήματα είναι πέντε φορές πιο ανθεκτικά από το πλαστικό και είκοσι φορές πιο συμπαγής. Η τεχνολογία αυτή όμως βρίσκεται σε αρχικό στάδιο ανάπτυξης και το κόστος μιας τέτοιας εκτύπωσης είναι απαγορευτικό. Σύμφωνα με την έρευνα αγοράς που διεξήχθητε η εκτύπωση για 1 cm³ κοστίζει 1,55 \$ με αποτέλεσμα η όλη κατασκευή να ανέρχεται κοντά στα 8000\$. Το κόστος αυτό θα καθιστούσε την κατασκευή μη βιώσιμη. Περαιτέρω μελέτη συνίσταται πάνω στη τεχνολογία αυτή όταν το κόστος της τρισδιάστατης εκτύπωσης μειωθεί σημαντικά [Markforged, 2015] .

Το υλικό που προτιμήθηκε είναι το μέταλλο πάχους 3 mm. Είναι εξαιρετικός αγωγός της θερμότητας και διευκολύνει την διάδοση της θερμότητας από το πλαίσιο στο ΥΑΦ και από το ΥΑΦ στον ατμοσφαιρικό αέρα που βρίσκεται πίσω από το πλαίσιο. Η κατασκευή είναι σχήματος ορθογωνίου το οποίο θα καταλαμβάνει όλο το εμβαδό του πλαισίου για να υπάρχει μεγιστοποίηση της μεταφοράς θερμότητας από το πλαίσιο στο ΥΑΦ. Επιλέξαμε ο χώρος τοποθέτησης του ΥΑΦ να χωρίζεται σε τρεις ξεχωριστές δεξαμενές για λόγους στήριξης, αντοχής, ευκολότερης πλήρωσης και αδειάσματος καθώς και για να υπάρχει η δυνατότητα πλήρωσης με διαφορετικά ΥΑΦ χωρίς να υπάρχει

Εικόνα 9: Απεικόνιση της τελικής κατασκευής με διαπερατό το άνω μέρος για να φαίνεται η διαμερισματοποίηση



πρόβλημα ανάμειξης τους.

Η κατασκευή πραγματοποιήθηκε από τη εταιρία Νιταδώρας Α.Ε. Το χαμηλό κόστος η αντοχή στις καιρικές συνθήκες και βεβαίως η καλή θερμική αγωγιμότητα μας οδήγησαν σε αυτή την επιλογή. Περαιτέρω αιτιολογημένη ανάλυση της γεωμετρίας του σχήματος παρατίθεται στα επόμενα κεφάλαια.

3.2. Επιλογή των μέσων που χρησιμοποιήθηκαν

3.2.1. Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

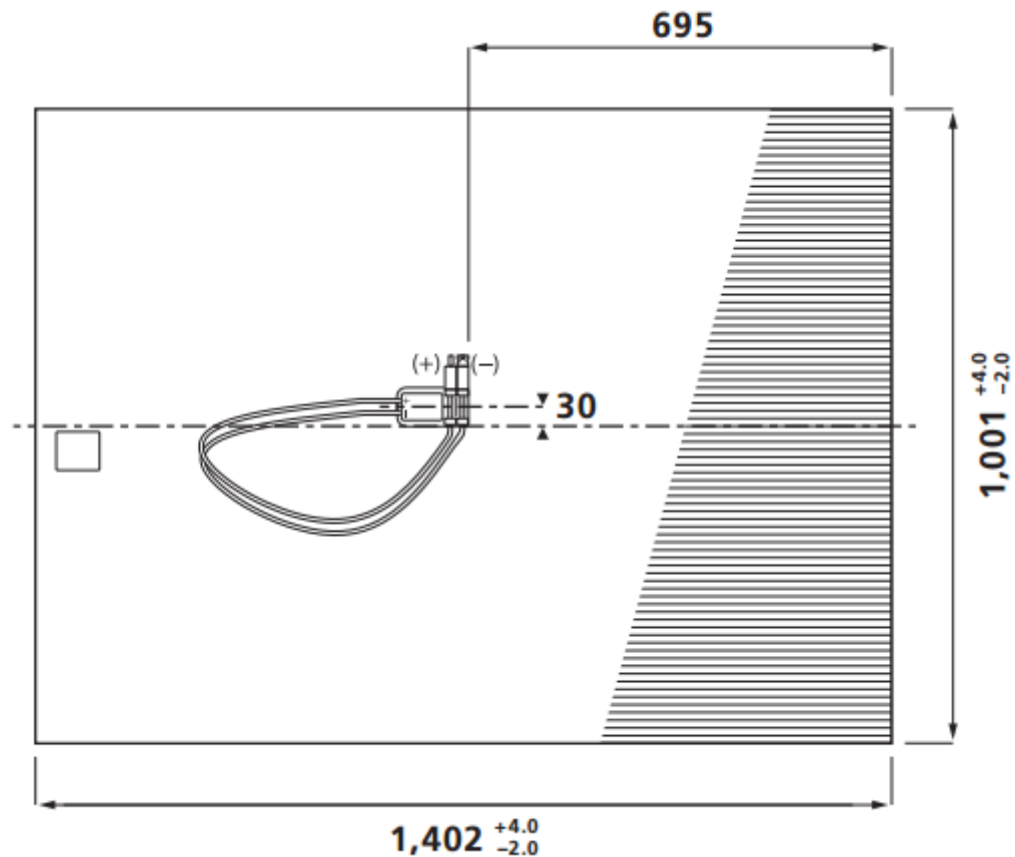
Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές μετρήσεις είναι της εταιρίας Sharp το μοντέλο NA-E130L5 πρόκειται για πλαίσιο άμορφου πυριτίου (thin film) με ονομαστική απόδοση 9,3%. Στο πίνακα φαίνονται αναλυτικά τα σημαντικά χαρακτηριστικά του εν λόγω πλαισίου σε συνθήκες STC (standard test conditions) δηλαδή Ισχύς ηλιακής ακτινοβολίας 1000W/m^2 , θερμοκρασία κελιού 25°C

Πίνακας 2: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά σε STC [Sharp, 2013]

NA-E130G5			
Maximum power	P_{\max}	130	W_p
Open-circuit voltage	V_{oc}	60.4	V
Short-circuit current	I_{sc}	3.41	A
Voltage at point of maximum power	V_{mpp}	46.1	V
Current at point of maximum power	I_{mpp}	2.82	A
Module efficiency	η_m	9.3	%

Στην εικόνα 10 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλαισίου όπως αυτά δίνονται από τον κατασκευαστή

Εικόνα 10: γεωμετρικά χαρακτηριστικά πλαισίου NA-E130L5 [Sharp, 2013]



Όντας πλαίσιο άμορφου πυριτίου αναμένεται καλή συμπεριφορά ως προς την αύξηση της θερμοκρασίας, όμως δεν παύει να επηρεάζεται αρνητικά η απόδοση του. Στον πίνακα 3 φαίνεται πόσο μεταβάλλονται η ισχύς, η τάση και η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την αύξηση της θερμοκρασίας κατά ένα βαθμό °C [Sharp, 2013]

Πίνακας 3: Μεταβολή ηλεκτρολογικών μεγεθών από την αύξηση της θερμοκρασίας [Sharp, 2013]

TEMPERATURE COEFFICIENT	
P_{max}	-0.24 % / °C
V_{oc}	-0.30 % / °C
I_{sc}	+0.07 % / °C

3.2.2.Υλικό αλλαγής φάσης

Το ΥΑΦ χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές μετρήσεις είναι το RT 27 της εταιρίας Rubitherm η οποία ειδικεύεται στην παραγωγή ΥΑΦ για διάφορες χρήσεις. Στον πίνακα 4 φαίνονται τα χαρακτηριστικά του υλικού όπως αυτά

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά RT27 [Rubitherm,2012]

<u>The most important data:</u>		Typical Values
Melting area		25-28 [°C] main peak: 27
Congearing area		28-25 [°C] main peak: 27
Heat storage capacity ± 7,5% Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 20°C to 35°C.	179	[kJ/kg]*
Specific heat capacity	50	[Wh/kg]*
Density solid at 15 °C	2	[kJ/kg·K]
Density liquid at 40 °C	0,88	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)	0,76	[kg/l]
Volume expansion	0,2	[W/(m·K)]
Flash point (PCM)	12,5	[%]
Max. operation temperature	146	[°C]
	50	[°C]



δίνονται.

Το σημείο τήξης του υλικού είναι 27°C, σημαντικό είναι και το ποσό της θερμότητας που δύναται να απορροφήσει το υλικό. Γενικά, η επιλογή του υλικού βασίστηκε στο γεγονός ότι καθώς η προβλεπόμενη θερμοκρασία κελιού αναμένεται εντός του εύρους 40 °C - 55 °C ζητούμενο αποτελεί η διατήρηση της θερμοκρασίας σε χαμηλά επίπεδα των 27 °C ώστε η απόδοση να προσεγγίζει την αντίστοιχη τιμή ελέγχου από τον κατασκευαστή σε συνθήκες STC δηλαδή 25 °C. Η θερμότητα που δύναται να απορροφήσει το υλικό και με την μορφή αισθητής θερμότητας και με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας είναι συνολικά 50 Wh/kg. Σε επόμενα κεφάλαια παρατηθείτε η μελέτη που γίνεται για την εύρεση της απαιτούμενης ποσότητας του RT27 για να επιτευχθεί ο στόχος μας. Σημαντικό ζήτημα που απαιτεί προσοχή είναι η αύξηση του όγκου του υλικού λόγω θερμικής διαστολής της τάξης του 12,5% άρα η πλήρωση του δοχείου μας δεν πρέπει να ξεπερνά το 87,5% διότι διαφορετικά η προσπάθεια αύξησης του όγκου σε περιορισμένες διαστάσεις θα οδηγούσε σε αύξηση της πίεσης εντός του δοχείου και αύξηση της θερμοκρασίας , φαινόμενα ανεπιθύμητα , καθώς από την αύξηση

της πίεσης θα υπήρχε κίνδυνος διαρροής ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας προφανώς δεν είναι επιθυμητή. [Rubitherm,2012]

3.2.3.Λογισμικό σχεδίασης

Η σχεδίαση του μηχανισμού έγινε στο πρόγραμμα AutoCAD 2014® .Τα πλεονεκτήματα του εν λόγω προγράμματος είναι η μεγάλη ακρίβεια που διαθέτει καθώς και η δυνατότητα σχεδίασης σε τρεις διαστάσεις. Πρόκειται για επαγγελματικό πρόγραμμα το οποίο έχει επιλογές για εκτύπωση του σχεδίου σε πολλές μορφές και είναι συμβατό με όλους τους τρισδιάστατους εκτυπωτές .

3.2.4. Πειραματικές διατάξεις μέτρησης

Η μελέτη του συστήματος πραγματοποιήθηκε σε τρία στάδια. Αρχικά έγινε μια μελέτη με την θερμοκάμερα με τακτικές απεικονίσεις κατά την διάρκεια της ημέρας, ειδικά κατά την φόρτιση του ΥΑΦ. Τα αποτελέσματα των θερμό-φωτογραφιών μας έδωσαν μια πρώτη εικόνα για την λειτουργία της κατασκευής , για την περίοδο βέλτιστης λειτουργίας, καθώς και για κατασκευαστικά λάθη όπως η ελλιπής πλήρωση των δοχείων με ΥΑΦ. Σε δεύτερο στάδιο υλοποιήθηκε θερμοκρασιακή μελέτη του πλαισίου με το ΥΑΦ καθώς και του πλαισίου αναφοράς για να επιβεβαιωθούν τα πορίσματα που προέκυψαν από τη πρώτη πειραματική φάση. Οι μετρήσεις έγιναν με χρήση θερμικών ζευγών τα οποία τοποθετήθηκαν σε ορισμένα σημεία τόσο στο πλαίσιο με το ΥΑΦ όσο και στο πλαίσιο αναφοράς ώστε να υπάρχει βάση σύγκρισης αποτελεσμάτων. Το πρώτο σημείο βρίσκεται στη πλάτη του πλαισίου στο κέντρο του κατώτερου δοχείου και το δεύτερο στο κέντρο του ανώτερου δοχείου. Η Τρίτη φάση της πειραματικής μελέτης είναι η

μέτρηση και αξιολόγηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των πλαισίων. Για τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε ένα μεταβλητό φορτίο το οποίο συνδέθηκε στα προς αξιολόγηση φωτοβολταϊκά πλαίσια με αυτοματοποιημένο τρόπο η

Εικόνα 11 Διάταξη I-V tracer



Εικόνα 12 Πυρανόμετρο υπό γωνία



αντίσταση μεταβαλλόταν παίρνοντας σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα εκατοντάδες μετρήσεις τάσης και έντασης ηλεκτρικού ρεύματος ώστε να προκύψουν οι σχετικές χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας. Το φορτίο αυτό (I-V tracer) το οποίο κατασκευάστηκε στα πλαίσια ερευνητικών δραστηριοτήτων του εργαστήριου Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων, συνδέεται, άμεσα με το πλαίσιο και μέσο κατάλληλης εφαρμογής (Real Term) σε υπολογιστή και εξήγαγε τα απαιτούμενα δεδομένα, τάσης και έντασης, σε μορφή πίνακα ώστε να προκύψουν οι σχετικές καμπύλες τάσης-έντασης και τάσης-ισχύος. Ταυτόχρονα γίνεται μέτρηση της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας μέσω πυρανομέτρου τοποθετημένου με την ίδια γωνία κλίσης με τα δυο πλαίσια όπως φαίνεται στην εικόνα 12.

4. Σχεδίαση κατασκευής

4.1. Παράμετροι σχεδιασμού

Δοκιμάστηκαν πολλά σχέδια μέχρι να καταλήξουμε στο τελικό που κατασκευάστηκε. Οι περιορισμοί που αντιμετωπίσαμε αφορούσαν κυρίως την στεγανότητα και την αντοχή της κατασκευής. Παρατηρήθηκε πως σε παρόμοιες κατασκευές που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν το μεγάλο εμβαδό του πλαισίου δημιουργούσε προβλήματα στεγανότητας, καθώς με την εισαγωγή του ΥΑΦ το βάρος αυξάνεται σημαντικά με αποτέλεσμα ανοίγματα και διαρροές. Στο πρωτότυπο του Κακουριώτη συγκεκριμένα φαίνονται ξεκάθαρα τα δύο αυτά προβλήματα. Όπως αναφέρει ο ίδιος «Κατά την κόλληση, όσο καλά και να συμπιεστεί το κουτί πάνω στο Φ/Β, πάντα θα υπάρχει μία λεπτή στρώση αέρα ανάμεσα στο Φ/Β και στο κουτί.» όταν εισήχθησαν 60 kg του ΥΑΦ το κενό αυτό άνοιξε και υπήρξε διαρροή. Για να αποφύγουμε το πρόβλημα αυτό, το δοχείο σχεδιάστηκε αεροστεγώς κλειστό. Το γεγονός ότι το δοχείο είναι κλειστό μπορεί να μη προσφέρει την βέλτιστη επαφή του ΥΑΦ με το φωτοβολταϊκό όμως παρέχει

στατικότητα, στεγανότητα και μεγάλη αντοχή. Ακόμα όμως και με την μέθοδο αυτή η λαμαρίνα θα δεχόταν μεγάλες διατμητικές τάσεις κυρίως στο κέντρο του πλαισίου οι οποίες θα δημιουργούσαν καμπύλωση στο δοχείο. Ύστερα από την συμβουλή των τεχνικών υπευθύνων της εταιρίας κατασκευής Νιταδώρας Α.Ε. να μειώσουμε το εμβαδό της κατασκευής αποφασίσαμε να χωρίσουμε την αρχική κατασκευή σε τρία διαμερίσματα. Η διαμερισματοποίηση είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επιπλέον συμβάλει στο γέμισμα και άδειασμα των δοχείων καθώς το μεικτό βάρος όλης της κατασκευής ξεπερνά τα 80 kg κάνοντας την πολύ βαριά ενώ η διαχείριση του 1/3 του βάρους είναι σαφώς πιο εύκολα διαχειρίσιμη. Στο πάνω και κάτω μέρος του κάθε δοχείου τοποθετήθηκαν στόμια για το πιο γρήγορο άδειασμα και γέμισμα των διαμερισμάτων όπως φαίνεται στην εικόνα 11.

Εικόνα 13: Τα στόμια στο ανώτατο και κατώτατο σημείο του κάθε δοχείου



Σημαντική παράμετρος είναι πως στο πίσω μέρος του πλαισίου στο μέσο περίπου υπάρχει η έξοδος των καλωδίων (εικόνα 10) που μεταφέρουν το παραγόμενο ρεύμα. Η θέση των καλωδίων μας ανάγκασε να σχεδιάσουμε ένα άνοιγμα στο μεσαίο δοχείο. Τα δοχεία στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε μια κεκλιμένη βάση με γωνία 30°.

4.2. Μεταφορά θερμότητας στο σύστημα ΥΑΦ-φωτοβολταϊκού

Για να βρεθεί η ποσότητα του ΥΑΦ που χρειαζόμαστε για να ρυθμίσουμε την θερμοκρασία πρέπει αρχικά να υπολογίσουμε το ποσό θερμότητας που θα μεταφερθεί από το πίσω μέρος του πλαισίου στο ΥΑΦ.

Το ισοζύγιο θερμότητας στο φωτοβολταϊκό είναι αυτής της μορφής:

ισχύς ακτινοβολίας από τον ήλιο

Ενέργεια από το Φ/Β προς το περιβάλλον με συναγωγή

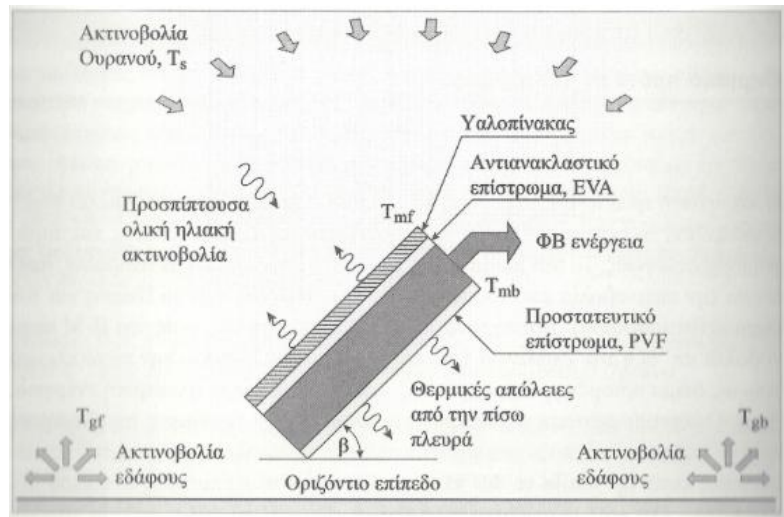
Ενέργεια από το Φ/Β προς το περιβάλλον με ακτινοβολία

Ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου

(4.1)

Δηλαδή η προσφερόμενη ισχύς από τον ήλιο ισούται με το άθροισμα της ηλεκτρικής ισχύος, το θερμικών απωλειών λόγω επαφής με το περιβάλλον και την θερμική ακτινοβολία που εκπέμπει το πλαίσιο σαν θερμό σώμα όπως φαίνεται στην εικόνα 14. [Φραγκιαδάκης, 2007]

Εικόνα 14: Θερμικό πρότυπο φωτοβολταϊκού [Φραγκιαδάκης, 2007]



Ο καθένας από τους παραπάνω όρους αναλύεται περαιτέρω. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται παρακάτω είναι πραγματικά και αφορούν τα εγκατεστημένα πλαίσια στο εργαστήριο RESEL στις 16-6-2010

Η ισχύς του ήλιου πρέπει να πολλαπλασιαστεί από τον συντελεστή απορροφητικότητας της εμπρόσθιας επιφάνειας του φωτοβολταϊκού διότι ένα μέρος των ηλιακών ακτινών ανακλώνται από το εμπρόσθιο γυαλί και δεν συμβάλουν στη μεταφορά θερμότητας, ο συντελεστής αυτός στη περίπτωση μας είναι 90%

(4.2)

Όπου A εμβαδόν πλαισίου ($1,4\text{m}^2$)

Και \bar{H}_t είναι ο μέσος όρος της ηλιοφάνειας από τις 11:00 έως τις 12:00

Η ηλεκτρική ισχύς του φωτοβολταϊκού δίνεται από τον κατασκευαστή 130W σε συνθήκες STC, ενώ στην συγκεκριμένη περίπτωση η θερμοκρασία του κελιού και ήταν 52°C άρα για να βρούμε την πραγματική παραγόμενη ισχύ πολλαπλασιάζουμε την διαφορά $52-25=27$ με τον συντελεστή μείωση ισχύος του κατασκευαστή 0,24% /°C

(4.3)

Για να βρούμε τις απώλειες θερμότητας λόγω επαφής με τον αέρα πρέπει να βρούμε τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας των γυάλινων επιφανειών εμπρός και πίσω από το πλαίσιο. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από τον προσανατολισμό του πλαισίου την διαφορά θερμοκρασίας πλαισίου περιβάλλοντος και από την ταχύτητα του ανέμου.

(4.4)

Tf θερμοκρασία μπροστά επιφάνειας (55 °C)

Tenv θερμοκρασία περιβάλλοντος (34 °C)

Ws ταχύτητα ανέμου (2, 45)

B Γωνία κλίσης φωτοβολταϊκού (30°)

Ομοίως για την πίσω επιφάνεια

(4.5)

Tb θερμοκρασία πίσω επιφάνειας (52 °C)

Tenv θερμοκρασία περιβάλλοντος (34 °C)

W_s ταχύτητα ανέμου (2,45)

B Γωνία κλίσης φωτοβολταϊκού (30°)

Στη συνέχεια αντικαθιστούμε στη εξίσωση

(4.6)

Από την εξίσωση (4.1) ο μόνος άγνωστος είναι το

Το ποσό αυτό εξαρτάται από την ακτινοβολία του πλαισίου ως θερμό σώμα . Η μισή ακτινοβολία από αυτή αναπόφευκτα θα χαθεί από την μπροστά όψη του πλαισίου όμως αυτή της πίσω πλευράς θα απορροφηθεί από το ΥΑΦ.

με την εξίσωση βρίσκουμε την ακτινοβολία του πλαισίου από την πίσω πλευρά:

$$\begin{aligned} & \text{---} & \text{---} \\ (4.7) \end{aligned}$$

Όπου

σταθερά Boltzmann

ικανότητα εκπομπής πίσω επιφάνειας (0.92)

θερμοκρασία πίσω επιφάνειας πλαισίου (325K)

Θερμοκρασία του ουρανού(20K)

θερμοκρασία εδάφους πίσω από το πλαίσιο

Τώρα καλούμαστε να βρούμε τρόπο να αξιοποιήσουμε το άθροισμα της θερμότητας που μεταφέρεται από την πίσω πλευρά μέσω ακτινοβολίας και επαφής ώστε να μην συμβάλει στην αύξηση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού και αυτό γίνεται με την προσθήκη ΥΑΦ στην πλάτη του πλαισίου

Για να μελετήσουμε την ποσότητα ΥΑΦ που πρέπει να τοποθετήσουμε υποθέτουμε ότι θέλουμε για να κρατήσουμε το φωτοβολταϊκό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (34°C) άρα να εξουδετερώσουμε όλο το για 1 ώρα λειτουργίας. Έχουμε διαθέσιμο το ΥΑΦ RT27 το οποίο έχει την ικανότητα να αποθηκεύει 50Wh/kg σύμφωνα με τον πίνακα 4. Διαιρώντας το ποσό θερμότητας με την δυνατότητα αποθήκευσης ανά kg παίρνουμε το βάρος του απαιτούμενου ΥΑΦ δηλαδή $14,88\text{kg}$. Χρησιμοποιώντας την πυκνότητα του υγρού RT27 υπολογίζουμε πως $14,88\text{ kg}$ ισοδυναμούν με $19,5\text{ lt}$, δηλαδή $0,0195\text{m}^3$ και αφού το εμβαδό είναι δεδομένο και ίσο με αυτό του πλαισίου $1,4\text{ m}^2$ μένει να βρούμε το πάχος του δοχείου.

Μέσω του τύπου υπολογισμού του όγκου

(4.8)

—

(4.8)

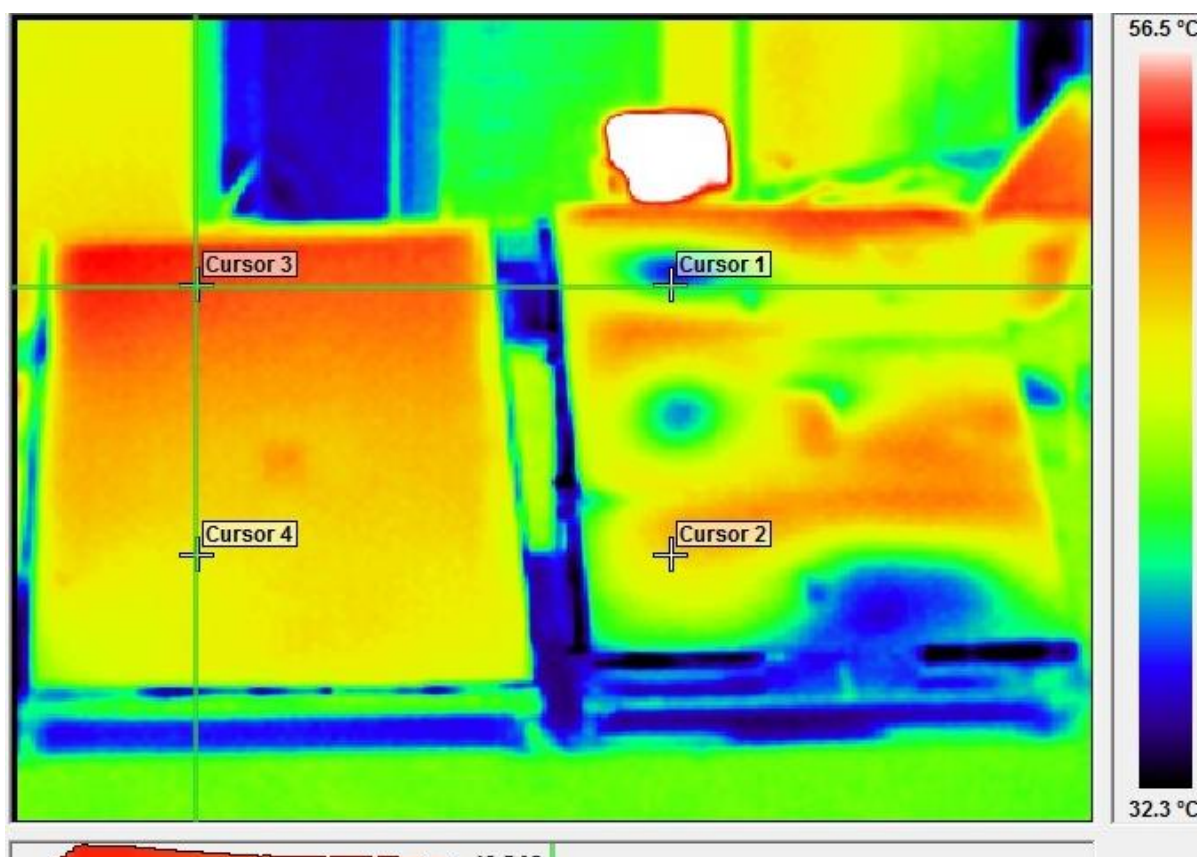
Άρα ένα πάχος $1,4\text{cm}$ μας καλύπτει για αυτή τη μια ώρα λειτουργίας. Με έναν πρόχειρο υπολογισμό μπορούμε να πούμε ότι για να καλύψουμε ένα τρίωρο λειτουργίας θέλουμε το τριπλάσιο όγκο και άρα το τριπλάσιο πάχος. Αυτός ο υπολογισμός είναι πολύ πρόχειρος και δεν λαμβάνει υπόψη του αρκετούς παράγοντες όμως για να γνωρίζουμε την τάξη μεγέθους της κατασκευής είναι ικανοποιητικός. Τελικό πάχος για 1 για 3 ώρες λειτουργίας είμαι $4,2\text{cm}$. Αν συνυπολογίσουμε την θερμική διαστολή του υλικού όπως αυτή μας δίνεται από το πίνακα 10 της Rubitherm πρέπει να προσαυξήσουμε το πάχος κατά $12,5\%$ με τελικό αποτέλεσμα τα $4,7\text{ cm}$ πάχος. Η κατασκευή έγινε με πάχος 5 cm για λόγους κατασκευαστικής ευκολίας.

5. Ανάλυση αποτελεσμάτων

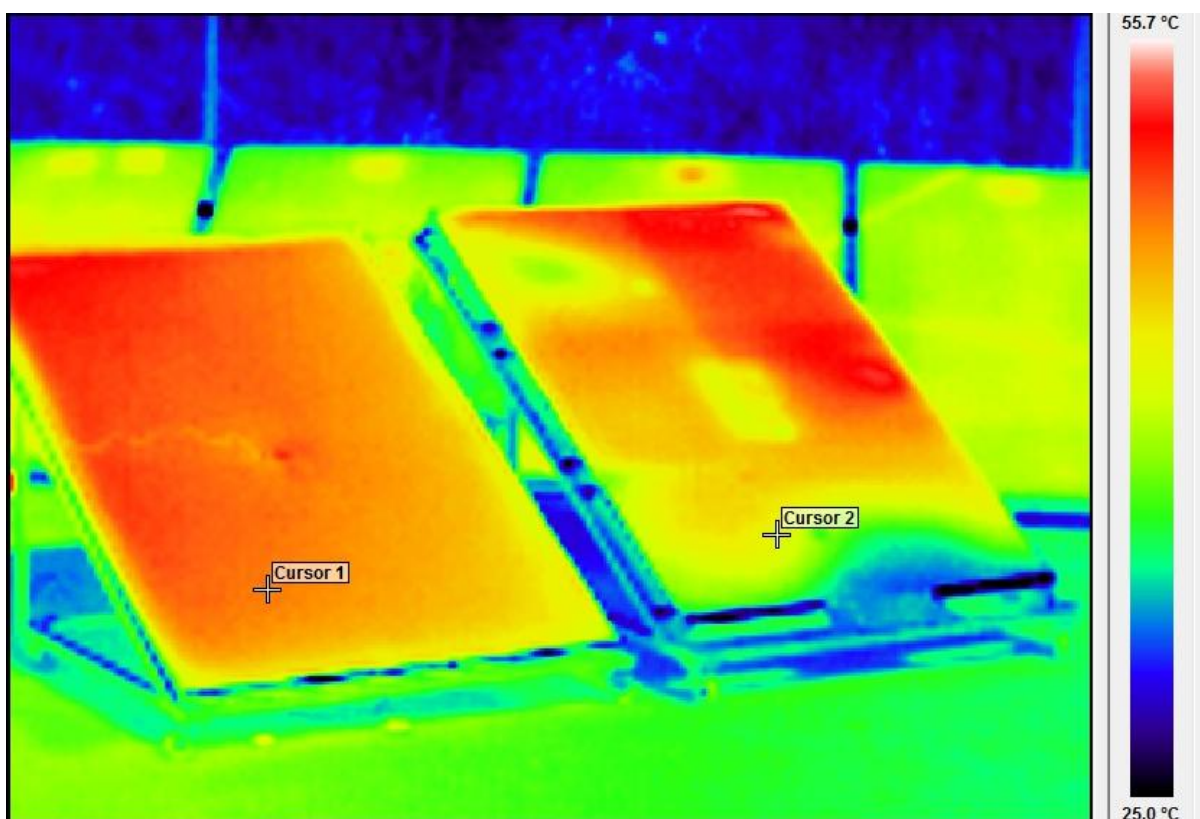
5.1 Πρώτη φάση, ποιοτική θερμική αποτίμηση

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η αρχική αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος πραγματοποιήθηκε μέσω της θερμοκάμερας μέσω της θερμοκάμερας. Οι παρακάτω φωτογραφίες έχουν ληφθεί κατά τη διάρκεια μίας αίθριας μέρας και αποτυπώνει την σημαντική διαφορά ανάμεσα στο Φ/Β πλαίσιο με το ΥΑΦ και στο Φ/Β πλαίσιο αναφοράς. Το ΥΑΦ καταφέρνει και κρατά το Φ/Β σε θερμοκρασίες σημαντικά χαμηλότερες απ ότι στο αναφοράς, στη συνέχεια περνάμε στο δεύτερο στάδιο για να βρούμε ποσοτικά την επίδραση του ΥΑΦ στη πλάτη του πλαισίου.

Εικόνα 15 θερμική απεικόνιση 5-08-15 13:00

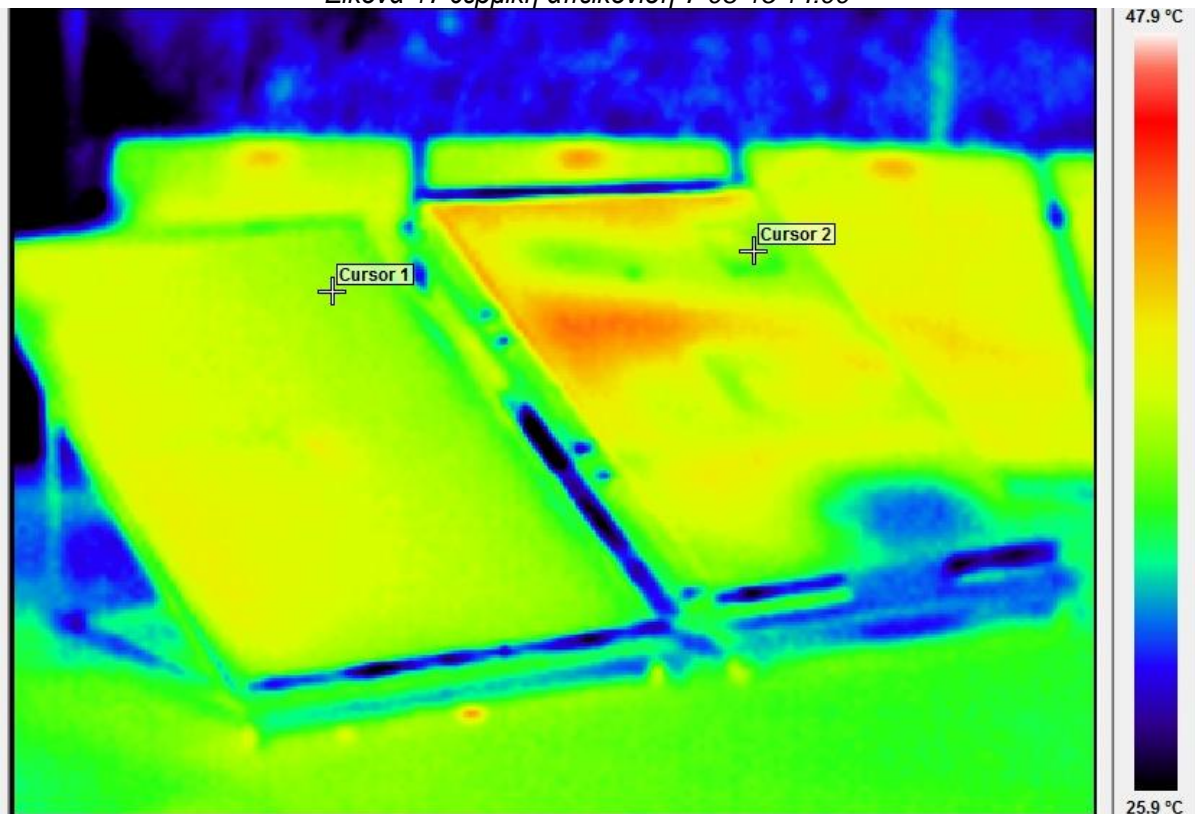


Εικόνα 16 θερμική απεικόνιση 5-08-15 14:00



Εκ πρώτης όψεως και στις δύο εικόνες, 15 και 16, φαίνεται πως το Φ/Β πλαίσιο με το ΥΑΦ είναι ψυχρότερο από το Φ/Β αναφοράς, όμως το σημαντικότερο πόρισμα από τις θερμοφωτογραφίες είναι πως στο σύστημα Φ/Β – ΥΑΦ δεν υπάρχει η ίδια θερμοκρασία σε όλο το εμβαδόν και κάποια σημεία είναι σαφώς ψυχρότερα από άλλα. Έτσι διαπιστώνουμε πως δεν υπάρχει καλή επαφή στα έντονα κόκκινα σημεία. Αυτό φαίνεται εντονότερα στην φωτογραφία 17, το πλαίσιο αναφοράς είναι όλο κίτρινο ενώ διπλανό με το ΥΑΦ έχει σημεία πράσινου, δηλαδή χαμηλότερης θερμοκρασίας, αλλά και κόκκινου πράγμα που σημαίνει πως υπάρχει διάκενο ανάμεσα στα δοχεία του ΥΑΦ και στο πλαίσιο και δεν άγεται η θερμότητα προς το ΥΑΦ καθότι υπάρχει ένα λεπτό στρώμα αέρα που λειτουργεί ως θερμικός μονωτής.

Εικόνα 17 Θερμική απεικόνιση 7-08-15 14:00



5.2 Δεύτερη φάση, ποσοτική θερμική αποτίμηση

Με τη χρήση του θερμομέτρου μετρήθηκε η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα δύο πλαίσια κατά την διάρκεια μιας ημέρας και ειδικότερα κατά το χρονικό διάστημα της τήξης του ΥΑΦ. Για να μειωθούν τα πειραματικά σφάλματα πραγματοποιήθηκαν πολλές επαναλήψεις και επιλέχτηκαν μέρες από τον Μάρτιο μέχρι τον Αύγουστο με διαφορετικές μέσες θερμοκρασίες και διαφορετικές καιρικές συνθήκες.

Εικόνα 18 Σημεία μέτρησης θερμοκρασίας



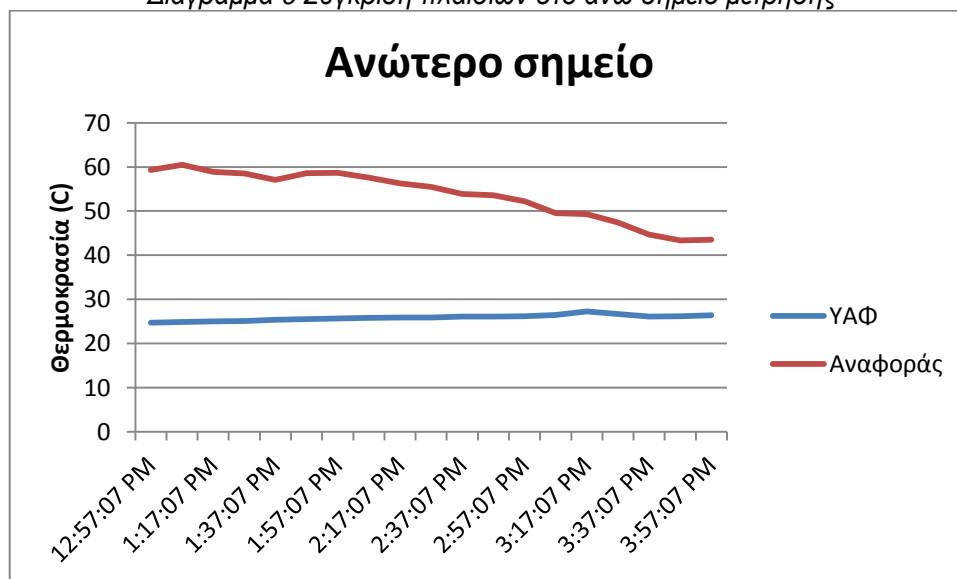
Ημερομηνία: 5-3-2015

Καιρικές συνθήκες: Ηλιοφάνεια, μηδενική νεφοκάλυψη

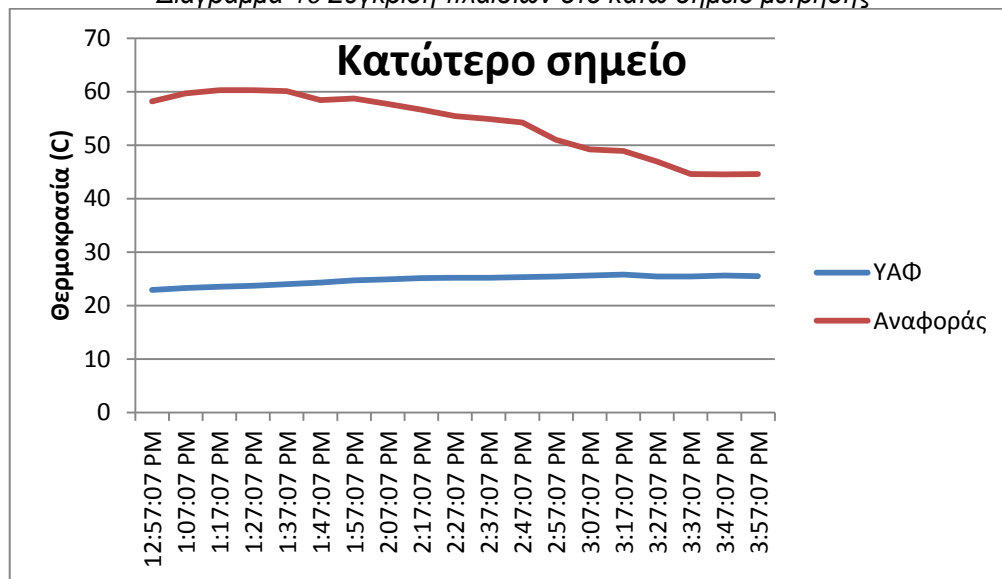
Πίνακας 5 Θερμοκρασία πλαισίων 5-3-2015

Ώρα	ΥΑΦ(°C)		Αναφοράς(°C)		Διαφορά θερμοκρασίας(°C)	
	Πάνω1	Κάτω2	Πάνω1	Κάτω2	Πάνω1	Κάτω2
12:57:07 μμ	24,7	22,9	59,3	58,2	34,6	35,3
1:07:07 μμ	24,9	23,3	60,5	59,7	35,6	36,4
1:17:07 μμ	25	23,5	58,9	60,3	33,9	36,8
1:27:07 μμ	25,1	23,7	58,5	60,3	33,4	36,6
1:37:07 μμ	25,4	24	57,1	60,1	31,7	36,1
1:47:07 μμ	25,5	24,3	58,6	58,4	33,1	34,1
1:57:07 μμ	25,7	24,7	58,7	58,7	33	34
2:07:07 μμ	25,8	24,9	57,6	57,7	31,8	32,8
2:17:07 μμ	25,9	25,1	56,3	56,6	30,4	31,5
2:27:07 μμ	25,9	25,2	55,5	55,4	29,6	30,2
2:37:07 μμ	26,1	25,2	53,9	54,9	27,8	29,7
2:47:07 μμ	26,1	25,3	53,6	54,2	27,5	28,9
2:57:07 μμ	26,2	25,4	52,2	51	26	25,6
3:07:07 μμ	26,5	25,6	49,5	49,2	23	23,6
3:17:07 μμ	27,3	25,8	49,3	48,9	22	23,1
3:27:07 μμ	26,7	25,4	47,4	46,9	20,7	21,5
3:37:07 μμ	26,1	25,4	44,7	44,6	18,6	19,2
3:47:07 μμ	26,2	25,6	43,4	44,5	17,2	18,9
3:57:07 μμ	26,4	25,5	43,5	44,6	17,1	19,1

Διάγραμμα 9 Σύγκριση πλαισίων στο άνω σημείο μέτρησης



Διάγραμμα 10 Σύγκριση πλαισίων στο κάτω σημείο μέτρησης



Αυτό που προκύπτει από τα διαγράμματα είναι ότι το ΥΑΦ λειτούργησε ιδανικά καθώς κατά την τήξη του διατήρησε το πλαίσιο στην θερμοκρασία τήξης του, 27 °C. Επίσης παρατηρούμε πως στο ανώτερο σημείο αναπτύσσονται υψηλότερες θερμοκρασίες απ ότι στο χαμηλότερο.

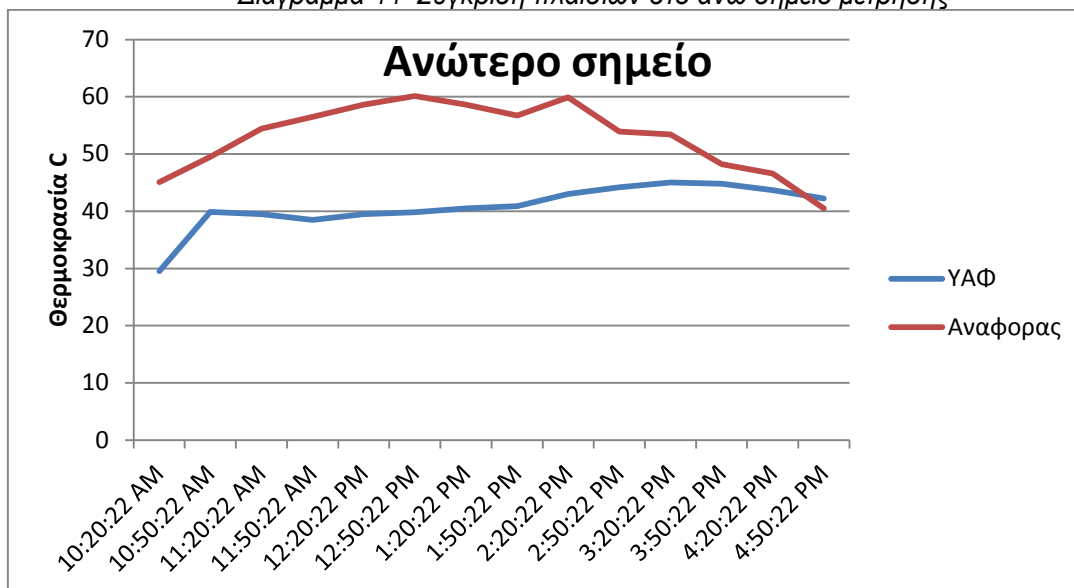
Ημερομηνία: 28-4-2015

Καιρικές συνθήκες: Ηλιοφάνεια, μηδενική νεφοκάλυψη

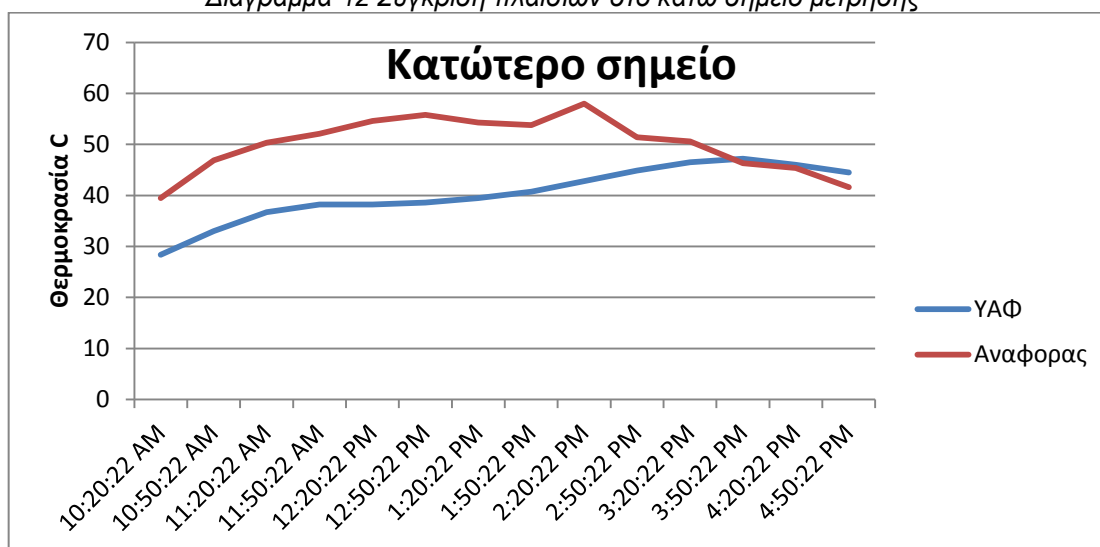
Πίνακας 6 Θερμοκρασία πλαισίων 28-4-2015

Ωρα	ΥΑΦ		Αναφοράς		Διαφορά θερμοκρασίας	
	Πάνω	Κάτω	Πάνω	Κάτω	Πάνω	Κάτω
10:20:22 πμ	29,5	28,4	45,1	39,5	15,6	11,1
10:50:22 πμ	39,9	33	49,5	46,9	9,6	13,9
11:20:22 πμ	39,5	36,7	54,4	50,3	14,9	13,6
11:50:22 πμ	38,5	38,2	56,5	52,1	18	13,9
12:20:22 μμ	39,5	38,2	58,6	54,6	19,1	16,4
12:50:22 μμ	39,8	38,6	60,1	55,8	20,3	17,2
1:20:22 μμ	40,5	39,5	58,6	54,3	18,1	14,8
1:50:22 μμ	40,9	40,7	56,7	53,8	15,8	13,1
2:20:22 μμ	43	42,8	59,9	58	16,9	15,2
2:50:22 μμ	44,2	44,9	53,9	51,4	9,7	6,5
3:20:22 μμ	45	46,5	53,4	50,6	8,4	4,1
3:50:22 μμ	44,8	47,2	48,2	46,3	3,4	-0,9
4:20:22 μμ	43,7	46	46,6	45,4	2,9	-0,6
4:50:22 μμ	42,2	44,5	40,5	41,6	-1,7	-2,9

Διάγραμμα 11 Σύγκριση πλαισίων στο άνω σημείο μέτρησης



Διάγραμμα 12 Σύγκριση πλαισίων στο κάτω σημείο μέτρησης



Αυτό που προκύπτει από τα διαγράμματα είναι ότι το ΥΑΦ λειτούργησε ιδανικά καθώς κατά την τήξη του διατήρησε το πλαίσιο κοντά στην θερμοκρασία τήξης του, 27 °C. Επίσης παρατηρούμε πως στο ανώτερο σημείο αναπτύσσονται υψηλότερες θερμοκρασίες απ' ότι στο χαμηλότερο. Ο λόγος που από τις 15:30 και μετά το πλαίσιο αναφοράς έχει χαμηλότερη θερμοκρασία οφείλεται σε πειραματικό σφάλμα καθώς υπήρξε μερική σκίαση του από το διπλανό κτήριο.

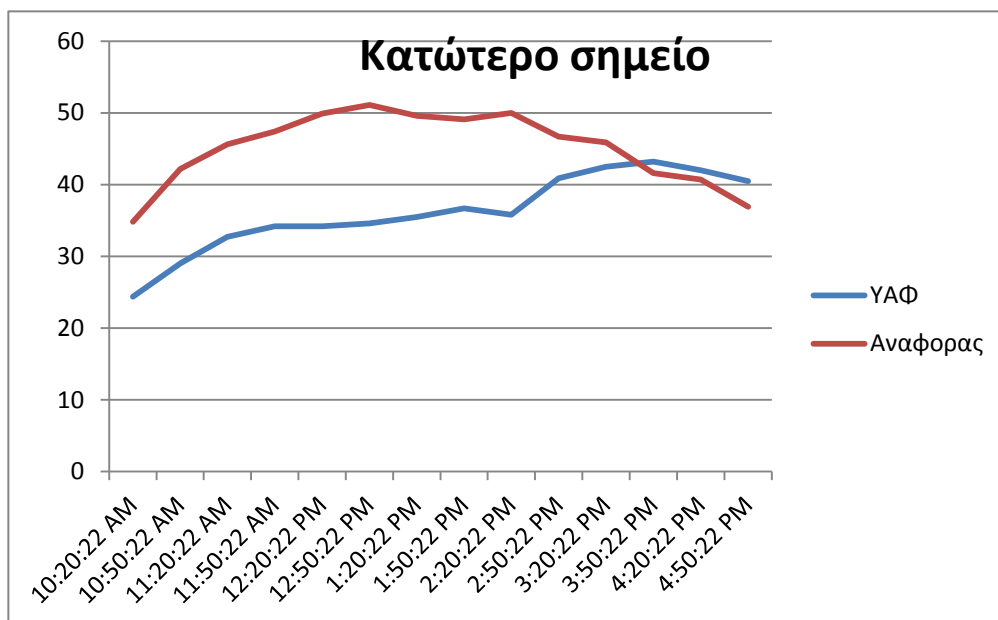
Ημερομηνία: 29-4-2015

Καιρικές συνθήκες: Ηλιοφάνεια, μηδενική νεφοκάλυψη υψηλή ταχύτητα ανέμου

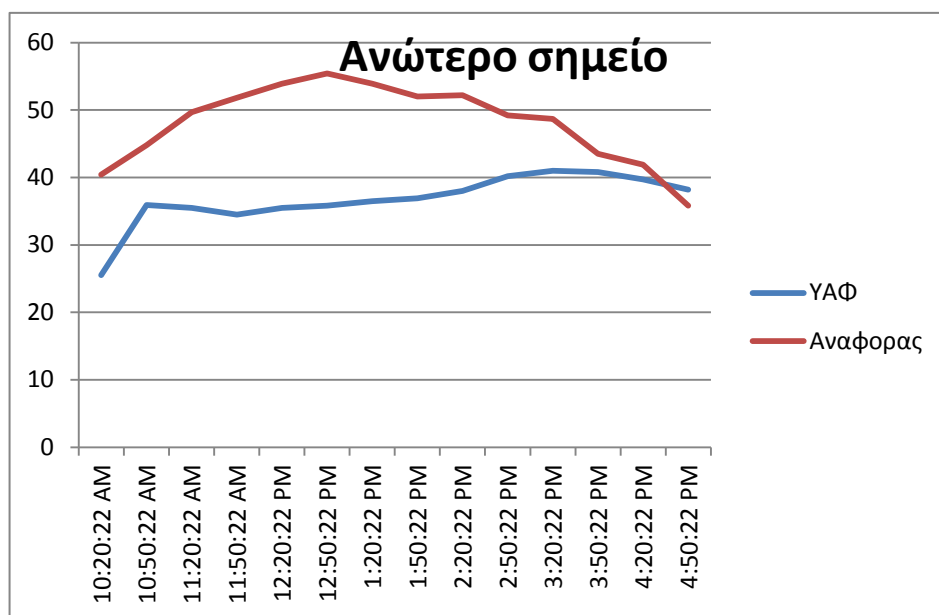
Πίνακας 7 Θερμοκρασία πλαισίων 29-4-2015

Ωρα	ΥΑΦ		Αναφοράς		Διαφορά θερμοκρασίας	
	Πάνω	Κάτω	Πάνω	Κάτω	Πάνω	Κάτω
10:20:22 πμ	25,5	24,4	40,4	34,8	14,9	10,4
10:50:22 πμ	35,9	29	44,8	42,2	8,9	13,2
11:20:22 πμ	35,5	32,7	49,7	45,6	14,2	12,9
11:50:22 πμ	34,5	34,2	51,8	47,4	17,3	13,2
12:20:22 μμ	35,5	34,2	53,9	49,9	18,4	15,7
12:50:22 μμ	35,8	34,6	55,4	51,1	19,6	16,5
1:20:22 μμ	36,5	35,5	53,9	49,6	17,4	14,1
1:50:22 μμ	36,9	36,7	52	49,1	15,1	12,4
2:20:22 μμ	38	35,8	52,2	50	14,2	14,2
2:50:22 μμ	40,2	40,9	49,2	46,7	9	5,8
3:20:22 μμ	41	42,5	48,7	45,9	7,7	3,4
3:50:22 μμ	40,8	43,2	43,5	41,6	2,7	-1,6
4:20:22 μμ	39,7	42	41,9	40,7	2,2	-1,3
4:50:22 μμ	38,2	40,5	35,8	36,9	-2,4	-3,6

Διάγραμμα 13 Σύγκριση πλαισίων στο κάτω σημείο μέτρησης



Διάγραμμα 14 Σύγκριση πλαισίων στο άνω σημείο μέτρησης



Σύμφωνα με τα σχετικά διαγράμματα παρατηρείται ότι το YAΦ λειτουργήσε αποτελεσματικά καθώς διατηρήθηκε η θερμοκρασία λειτουργίας κοντά στους 27 °C. Επίσης παρατηρούμε πως στο ανώτερο σημείο αναπτύσσονται υψηλότερες θερμοκρασίες απ' ότι στο χαμηλότερο. Το ιδιαίτερο συμπέρασμα που εξάγουμε από την μικρή θερμοκρασιακή διαφορά των δυο πλαισίων είναι ότι το πλαίσιο με το YAΦ δεν μπόρεσε να επωφεληθεί από την φυσική ψύξη που προσέφερε ο δυνατός άνεμος διότι το ρεύμα του αέρα δεν ερχόταν σε επαφή με την πλάτη του πλαισίου.

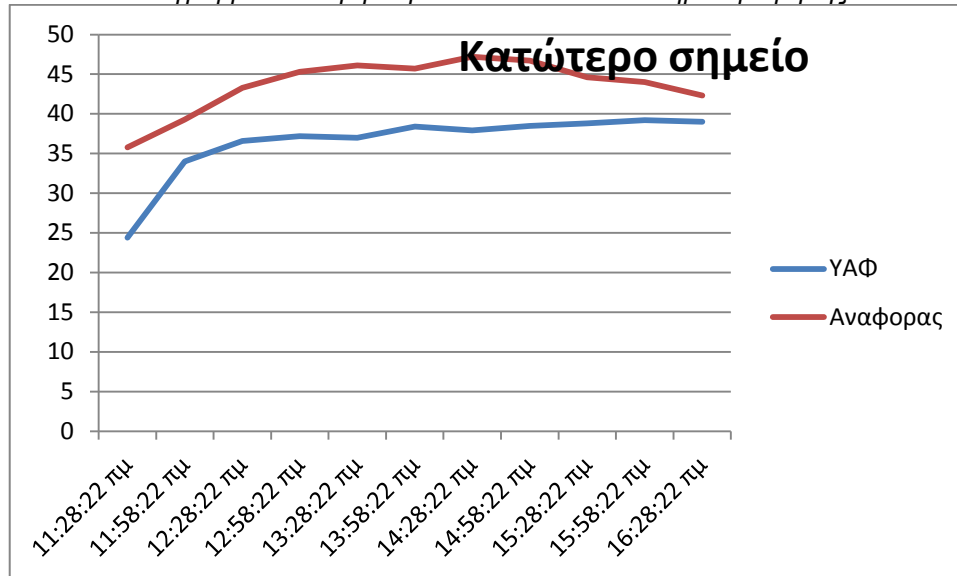
Ημερομηνία: 13-05-2015

Καιρικές συνθήκες: Ηλιοφάνεια, μετρία νεφοκάλυψη

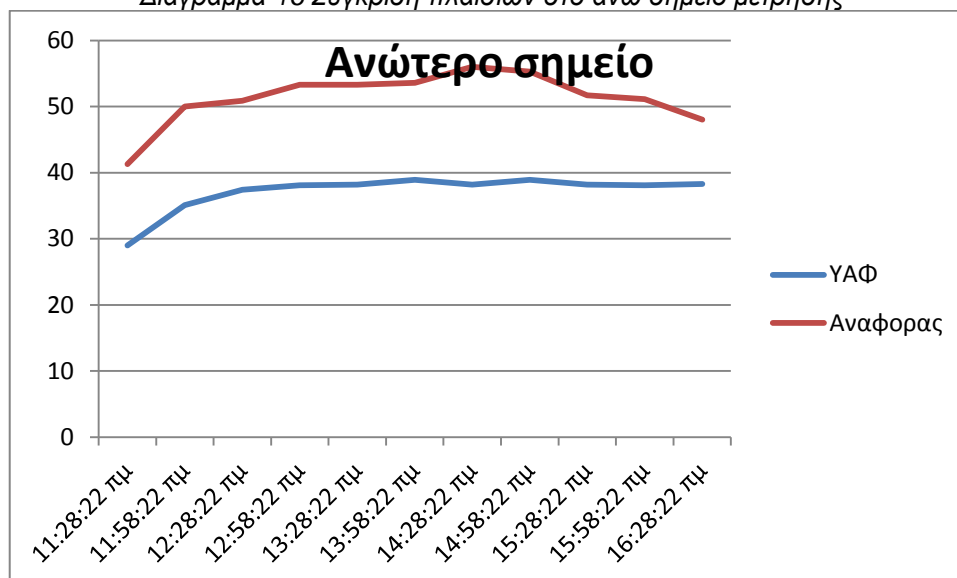
Πίνακας 8 Θερμοκρασία πλαισίων 13-05-2015

Ωρα	YAΦ		Αναφοράς		Διαφορά θερμοκρασίας	
	Πάνω	Κάτω	Πάνω	Κάτω	Πάνω	Κάτω
11:28:22 πμ	29	24,4	41,3	35,8	12,3	11,4
11:58:22 πμ	35,1	34	50	39,3	14,9	5,3
12:28:22 πμ	37,4	36,6	50,9	43,3	13,5	6,7
12:58:22 πμ	38,1	37,2	53,3	45,3	15,2	8,1
13:28:22 πμ	38,2	37	53,3	46,1	15,1	9,1
13:58:22 πμ	38,9	38,4	53,6	45,7	14,7	7,3
14:28:22 πμ	38,2	37,9	56	47,2	17,8	9,3
14:58:22 πμ	38,9	38,5	55,3	46,7	16,4	8,2
15:28:22 πμ	38,2	38,8	51,7	44,6	13,5	5,8
15:58:22 πμ	38,1	39,2	51,1	44	13	4,8
16:28:22 πμ	38,3	39	48	42,3	9,7	3,3

Διάγραμμα 15 Σύγκριση πλαισίων στο κάτω σημείο μέτρησης



Διάγραμμα 16 Σύγκριση πλαισίων στο άνω σημείο μέτρησης



Αυτό που προκύπτει από τα διαγράμματα είναι ότι το ΥΑΦ προσπάθησε να κρατήσει σε χαμηλά επίπεδα τη θερμοκρασία του πλαισίου, όμως η υψηλή θερμοκρασία του περιβάλλοντος, ανώτερη των 27 °C, προκάλεσε μεταφορά θερμότητας από τον αέρα στο ΥΑΦ και όχι μόνο από το πλαίσιο άρα η τήξη του υλικού επιτεύχθηκε πιο γρήγορα.

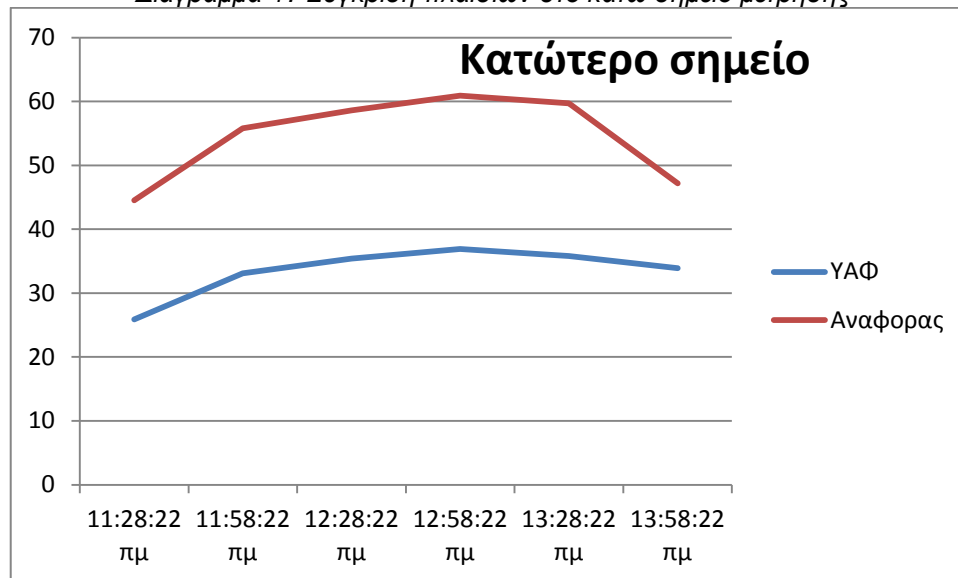
Ημερομηνία: 26-05-2015

Καιρικές συνθήκες: Ηλιοφάνεια

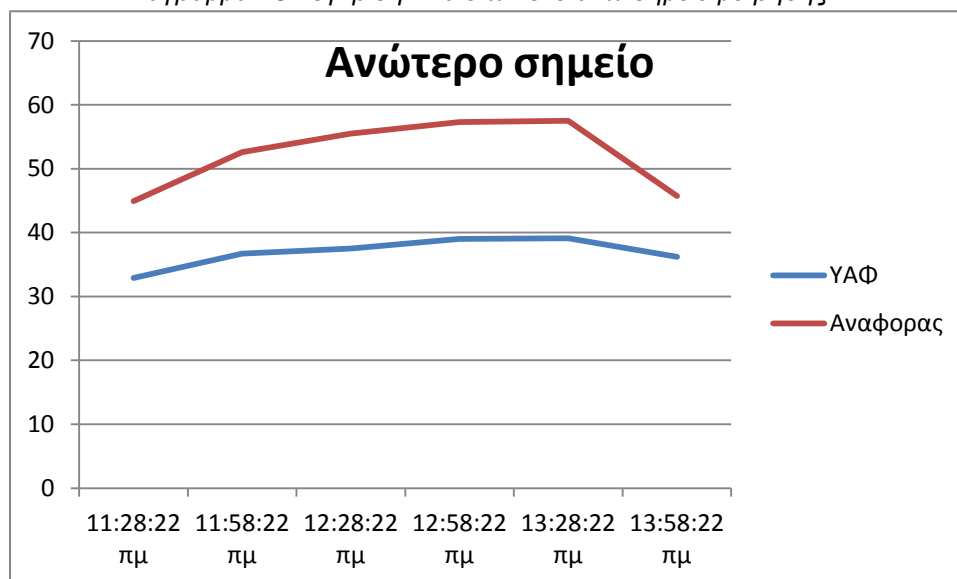
Πίνακας 9 Θερμοκρασία πλαισίων 26-05-2015

Ωρα	ΥΑΦ		Αναφοράς		Διαφορά θερμοκρασίας	
	Πάνω	Κάτω	Πάνω	Κάτω	Πάνω	Κάτω
11:09:55 πμ	32,9	25,9	44,9	44,5	12	18,6
11:39:55 πμ	36,7	33,1	52,6	55,8	15,9	22,7
12:09:55 μμ	37,5	35,4	55,5	58,6	18	23,2
12:39:55 μμ	39	36,9	57,3	60,9	18,3	24
1:09:55 μμ	39,1	35,8	57,5	59,7	18,4	23,9
1:39:55 μμ	36,2	33,9	45,7	47,2	9,5	13,3

Διάγραμμα 17 Σύγκριση πλαισίων στο κάτω σημείο μέτρησης



Διάγραμμα 18 Σύγκριση πλαισίων στο άνω σημείο μέτρησης



Συγκρίνοντας τα στοιχεία των μετρήσεων για το σύστημα με ΥΑΦ και τα αντίστοιχα για το πλαίσιο αναφοράς, παρατηρείται για το ανώτερο σημείο μια θερμοκρασιακή διαφορά η οποία κυμαίνεται από 9,5-18, ενώ το αντίστοιχο εύρος τιμών για το κατώτερο σημείο είναι 13,3 - 23,9. Αυτό που προκύπτει από τα διαγράμματα είναι ότι το ΥΑΦ λειτούργησε ιδανικά καθώς κατά την τήξη του διατήρησε το πλαίσιο κοντά στην θερμοκρασία τήξης του, 27 °C. Επίσης παρατηρούμε πως στο ανώτερο σημείο αναπτύσσονται υψηλότερες θερμοκρασίες απ ότι στο χαμηλότερο.

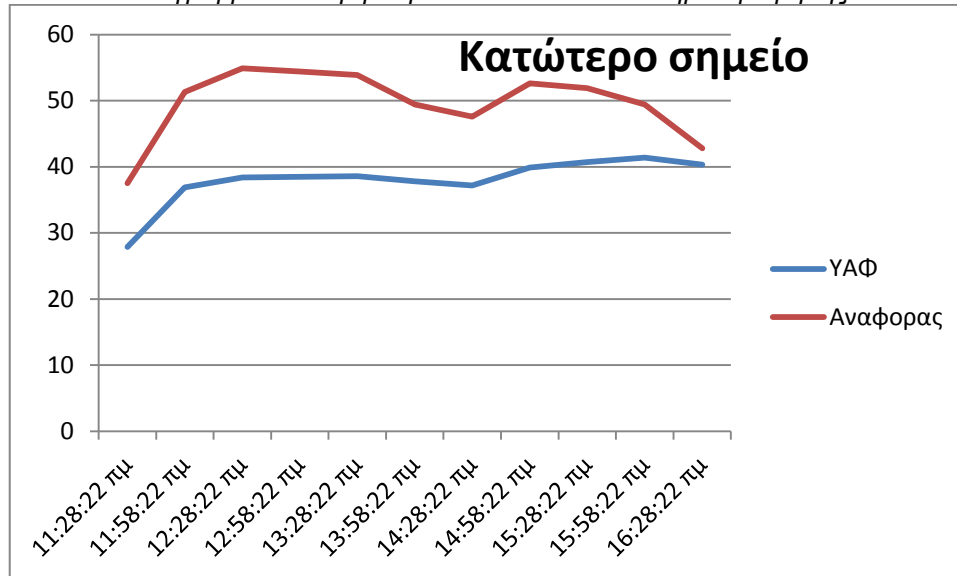
Ημερομηνία: 27-05-2015

Καιρικές συνθήκες: Ηλιοφάνεια, σημαντική νεφοκάλυψη στις 14:30

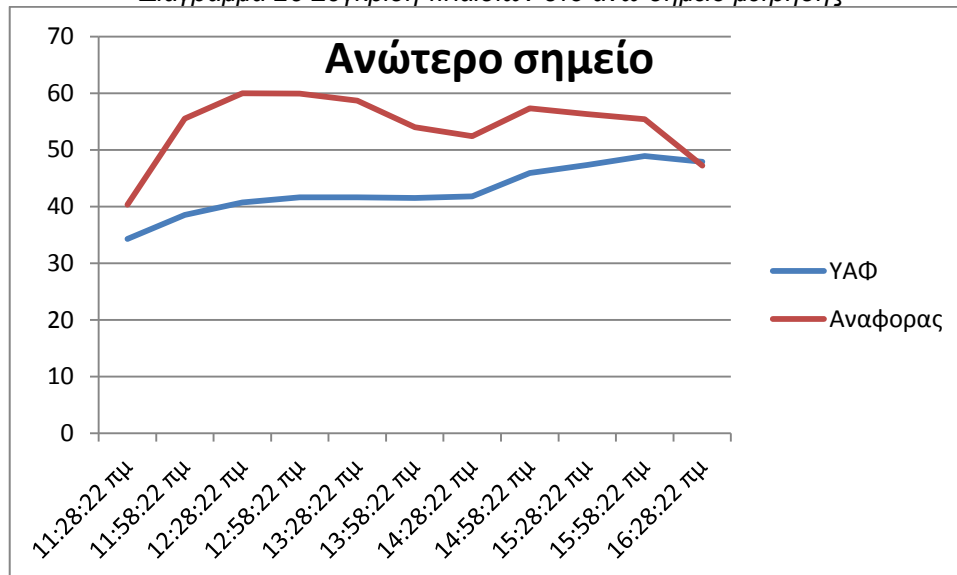
Πίνακας 10 Θερμοκρασία πλαισίων 27-05-2015

Ωρα	ΥΑΦ		Αναφοράς		Διαφορά θερμοκρασίας	
	Πάνω	Κάτω	Πάνω	Κάτω	Πάνω	Κάτω
11:11:37 πμ	34,3	27,9	40,3	37,5	6	9,6
11:41:37 πμ	38,5	36,9	55,5	51,3	17	14,4
12:11:37 μμ	40,7	38,4	60	54,9	19,3	16,5
12:41:37 μμ	41,6	38,5	59,9	54,4	18,3	15,9
1:11:37 μμ	41,6	38,6	58,7	53,9	17,1	15,3
1:41:37 μμ	41,5	37,8	54	49,4	12,5	11,6
2:11:37 μμ	41,8	37,2	52,4	47,6	10,6	10,4
2:41:37 μμ	45,9	39,9	57,3	52,6	11,4	12,7
3:11:37 μμ	47,3	40,7	56,3	51,9	9	11,2
3:41:37 μμ	48,9	41,4	55,4	49,4	6,5	8
4:11:37 μμ	47,9	40,3	47,2	42,8	-0,7	2,5

Διάγραμμα 19 Σύγκριση πλαισίων στο κάτω σημείο μέτρησης



Διάγραμμα 20 Σύγκριση πλαισίων στο άνω σημείο μέτρησης



Παρατηρούμε πως στο ανώτερο σημείο αναπτύσσονται υψηλότερες θερμοκρασίες απ ότι στο χαμηλότερο. Είναι εμφανές ότι η νεφοκάλυψη προκάλεσε πτώση θερμοκρασίας και στα δύο πλαίσια, ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι η πτώση στο πλαίσιο αναφοράς είναι μεγαλύτερη , αυτό αιτιολογείται από την μεγάλη θερμοχωρητικότητα του ΥΑΦ το οποίο είχε αποθηκευμένη θερμική ενέργεια και όταν η θερμοκρασία του πλαισίου άρχισε να μειώνεται ένα ποσό θερμότητας μεταφέρθηκε από το ΥΑΦ στο πλαίσιο , αντίστροφα δηλαδή απ ότι εμείς επιθυμούμε.

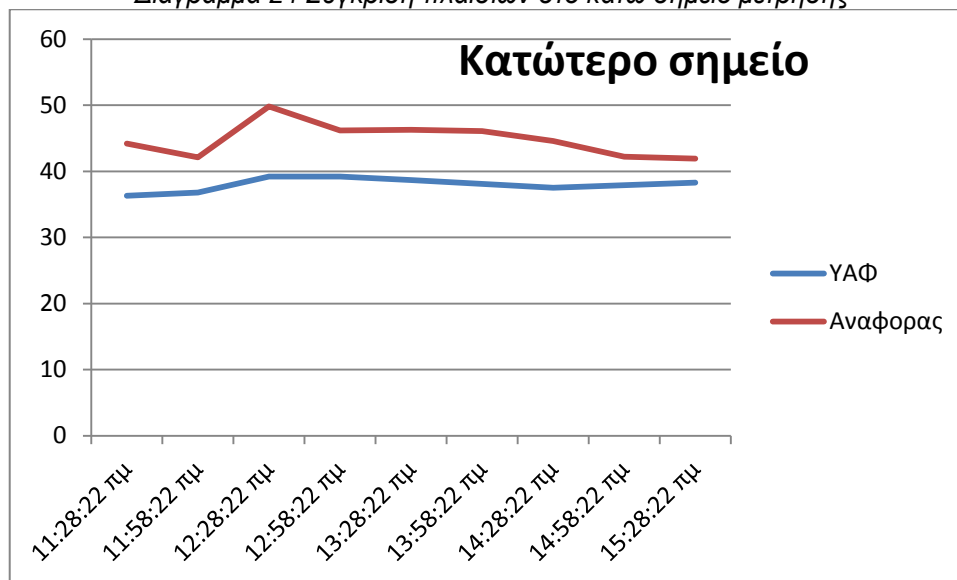
Ημερομηνία: 28-05-2015

Καιρικές συνθήκες: Ηλιοφάνεια, πλήρης νεφοκάλυψη

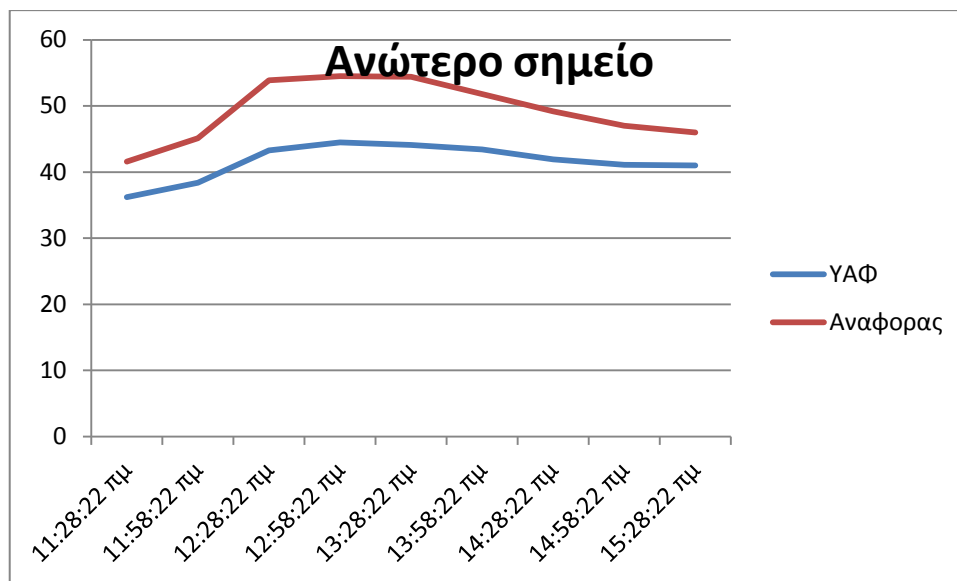
Πίνακας 11 Θερμοκρασία πλαισίων 28-05-2015

Ωρα	ΥΑΦ		Αναφοράς		Διαφορά θερμοκρασίας	
	Πάνω	Κάτω	Πάνω	Κάτω	Πάνω	Κάτω
11:59:48 πμ	36,2	36,3	41,6	44,2	5,4	7,9
12:29:48 μμ	38,4	36,8	45,1	42,1	6,7	5,3
12:59:48 μμ	43,3	39,2	53,9	49,8	10,6	10,6
1:29:48 μμ	44,5	39,2	54,5	46,2	10	7
1:59:48 μμ	44,1	38,7	54,4	46,3	10,3	7,6
2:29:48 μμ	43,4	38,1	51,8	46,1	8,4	8
2:59:48 μμ	41,9	37,5	49,2	44,6	7,3	7,1
3:29:48 μμ	41,1	37,9	47	42,2	5,9	4,3
3:59:48 μμ	41	38,3	46	41,9	5	3,6

Διάγραμμα 21 Σύγκριση πλαισίων στο κάτω σημείο μέτρησης



Διάγραμμα 22 Σύγκριση πλαισίων στο άνω σημείο μέτρησης



Η μικρή θερμοκρασιακή διαφορά των δύο πλαισίων οφείλεται στην νεφοκάλυψη δηλαδή στη μικρή πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι μετρήσεις αυτές επιβεβαιώνουν την αρχική μας πρόβλεψη ότι σε μέρες με χαμηλές θερμοκρασίες και μικρή ακτινοβολία το σύστημα μας δεν θα είναι αρκετά αποδοτικό.

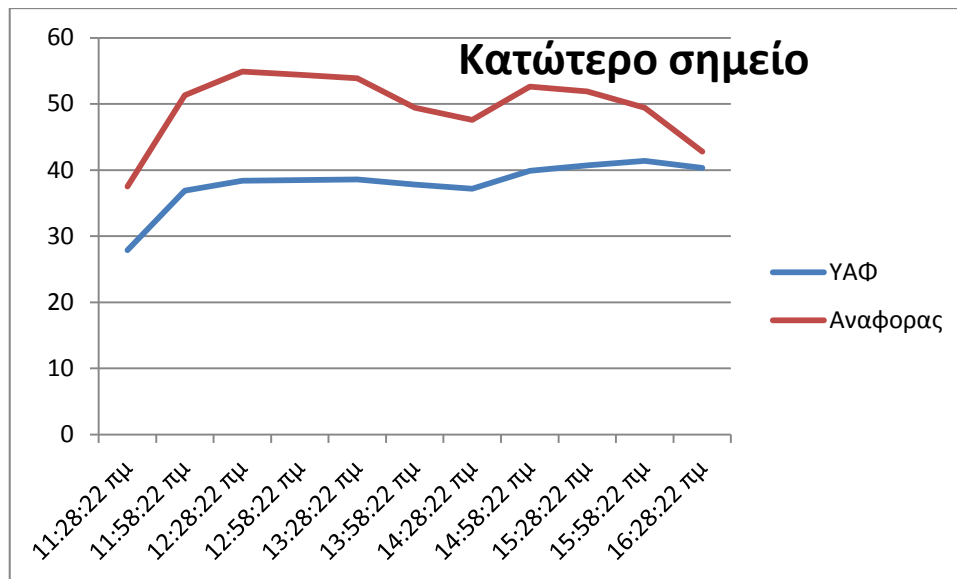
Ημερομηνία: 25-06-2015

Καιρικές συνθήκες: Ηλιοφάνεια, σημαντική νεφοκάλυψη στις 14:30

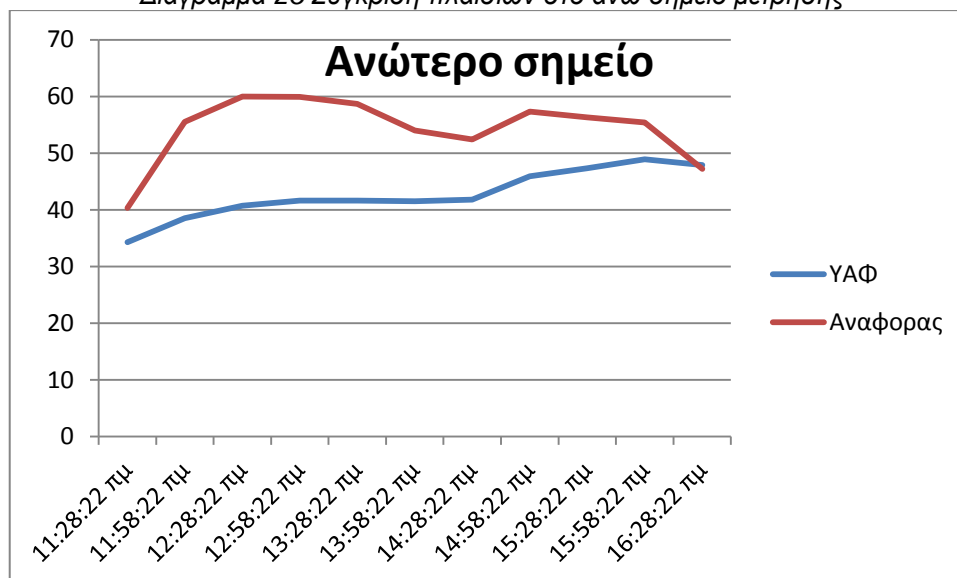
Διάγραμμα 23 Θερμοκρασία πλαισίων 25-06-2015

Ώρα	ΥΑΦ		Αναφοράς		Διαφορά θερμοκρασίας	
	Πάνω	Κάτω	Πάνω	Κάτω	Πάνω	Κάτω
11:11:37 πμ	35,3	29,1	41	40	5,7	10,9
11:41:37 πμ	39,5	36,9	56	54	16,5	17,1
12:11:37 μμ	41,7	39,9	61,4	54,9	19,7	15
12:41:37 μμ	41,8	39,9	60	55,8	18,2	15,9
1:11:37 μμ	42,6	39,7	59,9	54,8	17,3	15,1
1:41:37 μμ	42,6	37,8	55	50,1	12,4	12,3
2:11:37 μμ	42,7	37,8	53	48,8	10,3	11
2:41:37 μμ	48	39,9	57,3	53,5	9,3	13,6
3:11:37 μμ	48,1	40,7	56	52,8	7,9	12,1
3:41:37 μμ	48,9	42,3	55,4	49,9	6,5	7,6
4:11:37 μμ	46,8	40,5	49	43,5	2,2	3

Διάγραμμα 24 Σύγκριση πλαισίων στο κάτω σημείο μέτρησης



Διάγραμμα 25 Σύγκριση πλαισίων στο άνω σημείο μέτρησης



Καθ'όλη τη διάρκεια της εξεταζόμενης ημέρας παρατηρήθηκε καλή λειτουργία του συστήματος. Ειδικότερα κατά τις πρωινές ώρες, οπότε καταγράφηκε θερμοκρασία λειτουργίας στο ανώτερο σημείο $42,6^{\circ}\text{C}$ και $35,3^{\circ}\text{C}$ στο κατώτερο σημείο του, η αποτελεσματικότητα του ΥΑΦ εμφανίζεται αυξημένη καθώς οι αντίστοιχες τιμές για το πλαίσιο αναφοράς σημειώθηκαν $37,8^{\circ}\text{C}$ και $29,1^{\circ}\text{C}$. Επίσης παρατηρούμε πως στο ανώτερο σημείο αναπτύσσονται υψηλότερες θερμοκρασίες απ' ότι στο χαμηλότερο. Είναι εμφανές ότι η νεφοκάλυψη προκάλεσε πτώση θερμοκρασίας και στα δύο πλαίσια, ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι η πτώση στο πλαίσιο αναφοράς είναι μεγαλύτερη, αυτό αιτιολογείται από την μεγάλη

θερμοχωρητικότητα του ΥΑΦ το οποίο είχε αποθηκευμένη θερμική ενέργεια και όταν η θερμοκρασία του πλαισίου άρχισε να μειώνεται ένα ποσό θερμότητας μεταφέρθηκε από το ΥΑΦ στο πλαίσιο , αντίστροφα δηλαδή απ ότι εμείς επιθυμούμε.

5.3 Ηλεκτρικές μετρήσεις

Η τρίτη φάση της πειραματικής μελέτης είναι η μέτρηση και αξιολόγηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πλαισίων. Για τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε ένα μεταβλητό φορτίο το οποίο συνδέσαμε στα πλαίσια και με αυτοματοποιημένο τρόπο η αντίσταση μεταβαλλόταν παίρνοντας σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα εκατοντάδες μετρήσεις τάσης και έντασης ηλεκτρικού ρεύματος. Με τον τρόπο αυτό μετρούσαμε τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου ρεύματος και στα δύο πλαίσια ανά τακτά χρονικά διαστήματα και είχαμε την ικανότητα να υπολογίζουμε τις μέγιστη ισχύς και να τις συγκρίνουμε μεταξύ τους. Το φορτίο αυτό (I-V tracer) κατασκευάστηκε στο εργαστήριο , συνδεόταν με το πλαίσιο και σε έναν φορητό υπολογιστή και με ένα απλό λογισμικό εξήγαγε τα δεδομένα, τάση και ένταση, σε μορφή πίνακα απ όπου σχεδιαζόταν η καμπύλη τάσης-έντασης και τάσης-ισχύος. Ταυτόχρονα γίνεται μέτρηση της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας μέσω πυρανομέτρου τοποθετημένου με την ίδια γωνία κλίσης με τα δυο πλαίσια. Στόχος είναι η εξαγωγή των χαρακτηριστικών καμπυλών τάσης – έντασης και τάσης – ισχύος και η σύγκριση αυτών. Στην συνέχεια θα υπολογιστεί η απόδοση του κάθε πλαισίου.

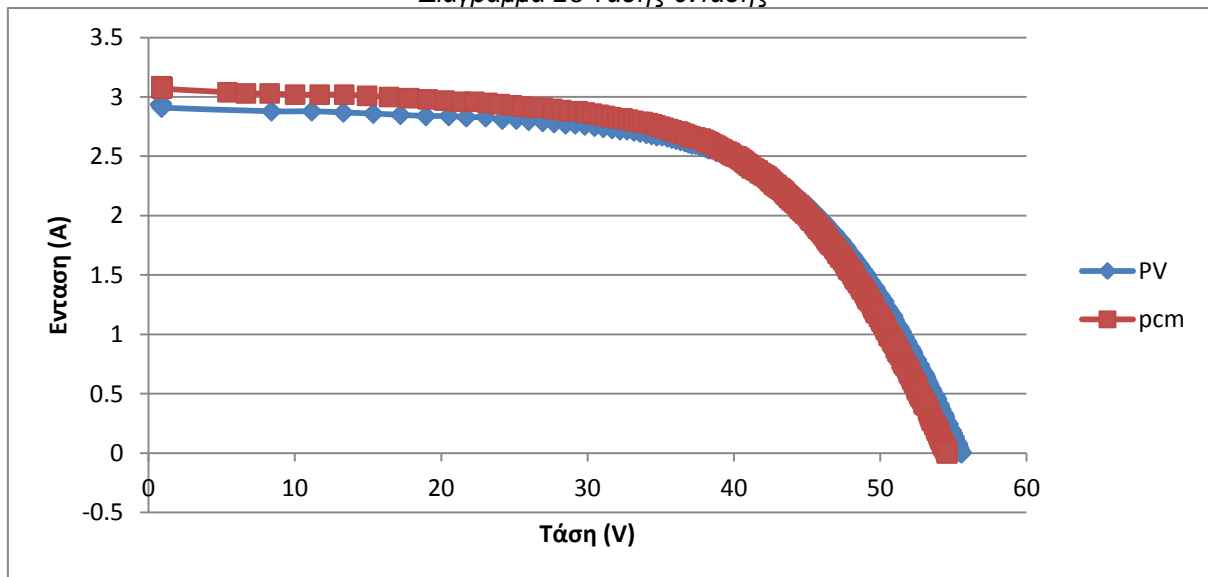
Τοποθετώντας στα άκρα του πυρανομέτρου ένα βολτόμετρο παίρναμε μέτρηση της τάσης την χρονική στιγμή που το I-V tracer κατέγραφε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των πλαισίων , διαιρώντας την τιμή αυτή με την ευαισθησία του εξαρτήματος όπως αυτή είναι δοσμένη από τον κατασκευαστή , $14,24 \cdot 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$,βρίσκαμε την πυκνότητα της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Το I-V tracer έδινε γύρω στις τετρακόσιες τιμές τάσης και έντασης μέσα σε διάστημα πέντε δευτερολέπτων, και έτσι σχηματίζουμε το διάγραμμα τάσης έντασης και για τα δύο πλαίσια σε ένα σύστημα αξόνων για σύγκριση. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τον τύπο $P = U \cdot I$ Πολλαπλασιάζαμε τάση με ένταση για να βρούμε τιμές ισχύος και να σχηματίσουμε την δεύτερη

χαρακτηριστική καμπύλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου , αυτή της τάσης-ισχύος. Από τις πολλές μετρήσεις που έγιναν παραθέτονται οι πιο χαρακτηριστικές που μας οδήγησαν σε ουσιαστικά πορίσματα.

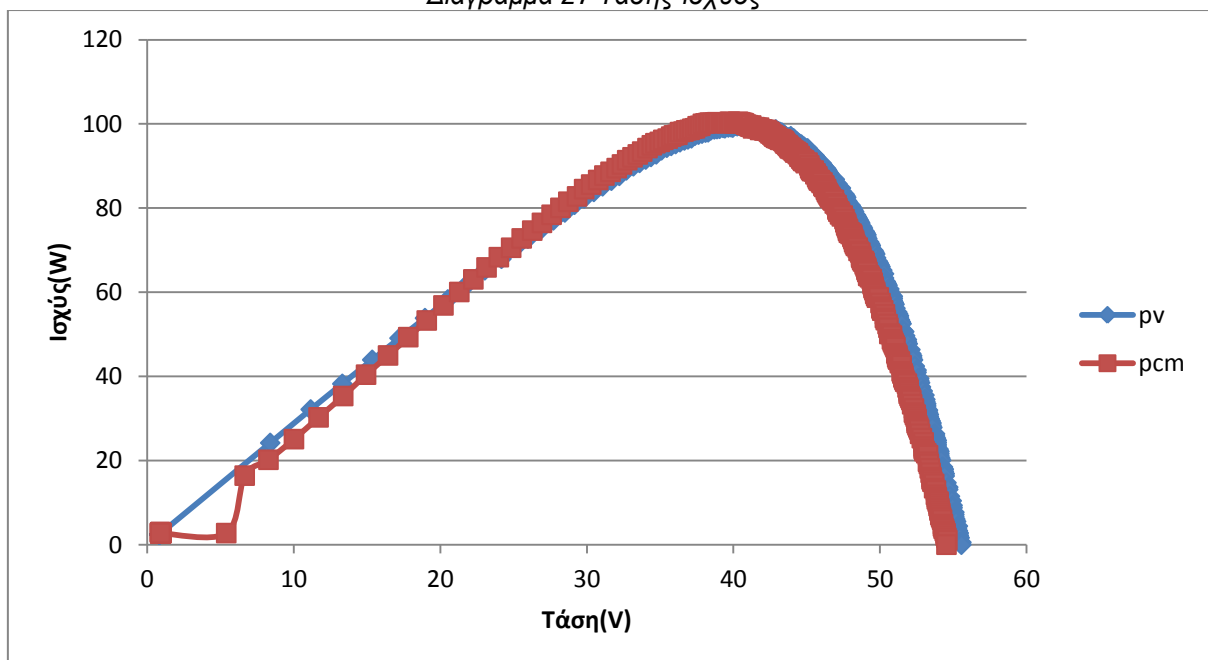
Ημερομηνία: 4-10-2015 Ωρα 11:00 πμ

Καιρικές συνθήκες: Ηλιοφάνεια 849 W/m^2 , υψηλή ταχύτητα ανέμου $18,3 \text{ km/h}$ με μέση ημερήσια $4,5 \text{ km/h}$

Διάγραμμα 26 Τάσης-έντασης



Διάγραμμα 27 Τάσης-ισχύος



Εργαζόμενοι πάνω στις τιμές βρίσκουμε την μέγιστη τιμή ισχύος και για τις δύο περιπτώσεις και αυτόματα την τάση και ένταση που αντιστοιχούν στη τιμή αυτή. Για το πλαίσιο αναφοράς η τιμή αυτή είναι και η τάση και ένταση και αντίστοιχα. Ενώ για το σύστημα με το ΥΑΦ είναι και αντίστοιχα.

Για την εύρεση της απόδοσης του πλαισίου ισχύει :

$$\text{_____} \quad (5.1)$$

Το A είναι το εμβαδό του πλαισίου και είναι σταθερό 1,4 m

Το G είναι η πυκνότητα ηλιοφάνειας και στη περίπτωση μας είναι 849 W/m²

Άρα η απόδοση του πλαισίου αναφοράς είναι $\eta=8,39\%$

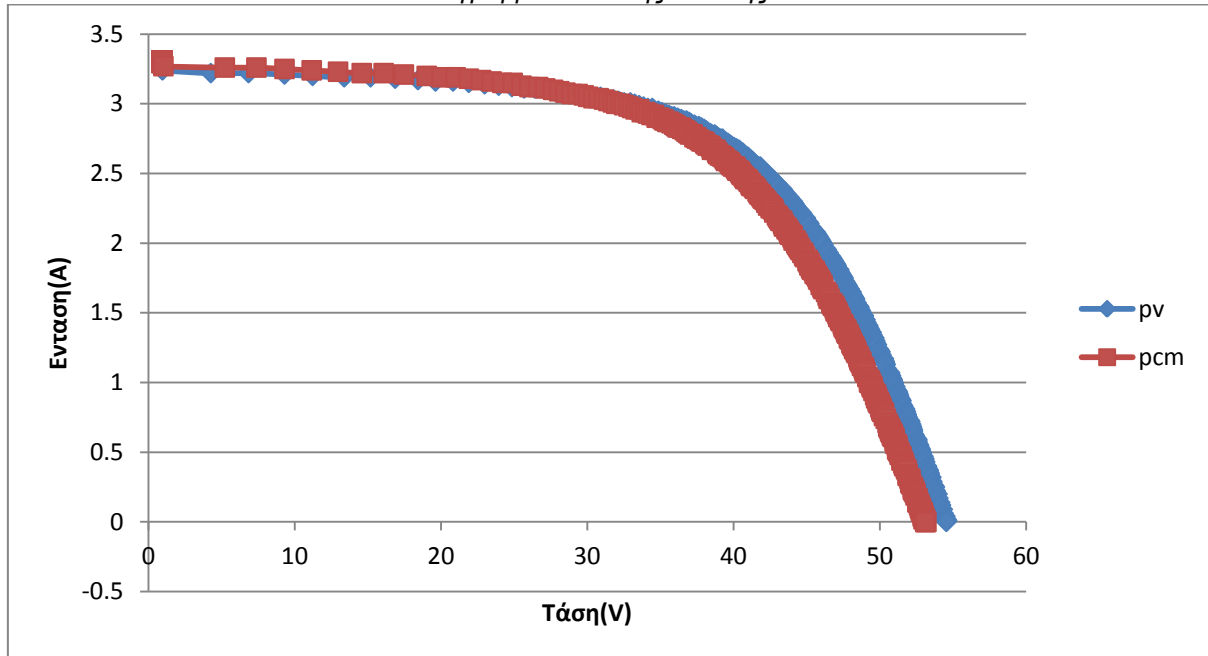
Ενώ του συστήματος μας είναι $\eta=8,45\%$

Η διαφορά είναι της τάξης 0,06% και οφείλεται αποκλειστικά στην διαφορά θερμοκρασίας. Το ποσό αυτό όμως είναι αρκετά μικρότερο από το αναμενόμενο και οφείλεται στην υψηλή ταχύτητα του ανέμου που έψυχε το πλαίσιο αναφοράς που έχει εκτεθειμένη πλάτη σε αντίθεση με αυτή του συστήματος με το ΥΑΦ. Φαινόμενο που είχε παρατηρηθεί και κατά τις θερμικές μετρήσεις. Οι υπόλοιπες μετρήσεις της ημέρας επιβεβαιώνουν το πόρισμα αυτό.

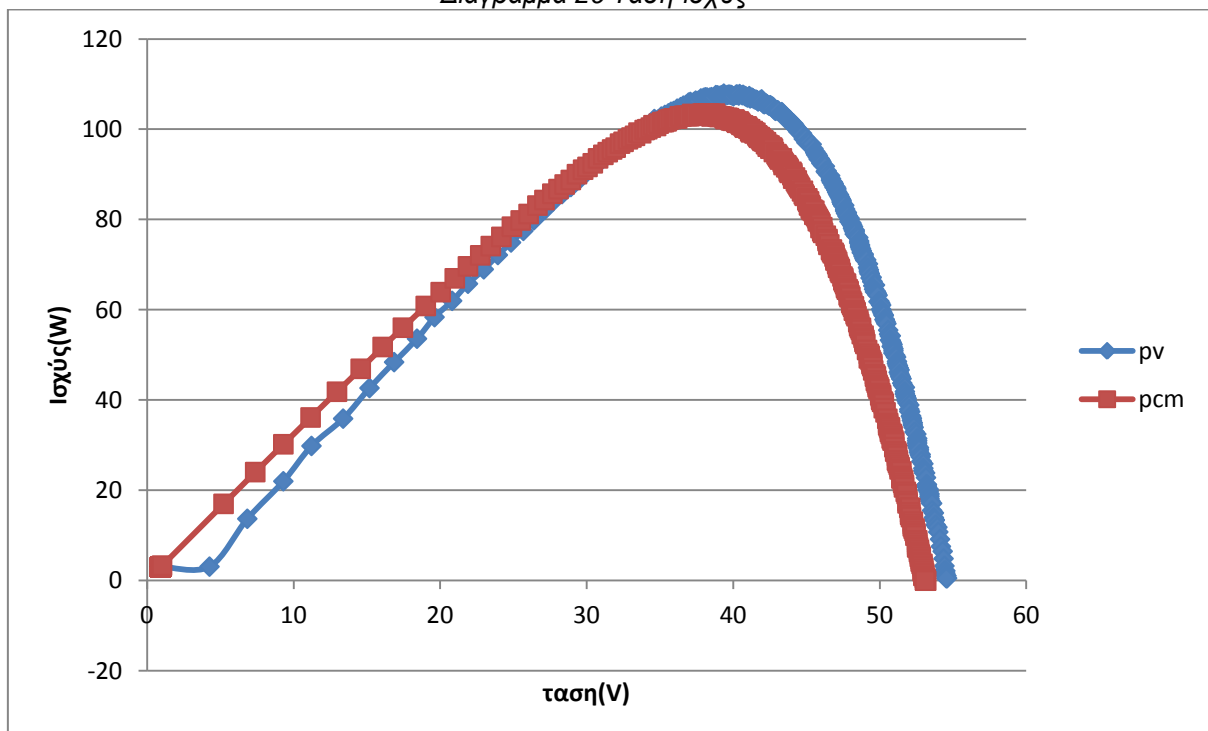
Ημερομηνία: 4-10-2015 Ωρα 12:00 πμ

Καιρικές συνθήκες: Ηλιοφάνεια 920W/m^2 , υψηλή ταχύτητα ανέμου

Διάγραμμα 28 Τάσης-έντασης



Διάγραμμα 29 Τάση-ισχύς



Με τους ίδιους υπολογισμούς για το πλαίσιο αναφοράς η τιμή αυτή είναι
και η τάση και ένταση και αντίστοιχα .Ενώ
για το σύστημα με το ΥΑΦ είναι και αντίστοιχα.

Για την εύρεση της απόδοσης του πλαισίου ισχύει :

$$\text{---} \quad (5.1)$$

Το Α είναι το εμβαδό του πλαισίου και είναι σταθερό 1,4 m

Το G είναι η πυκνότητα ηλιοφάνειας και στη περίπτωση μας είναι 905 W/m²

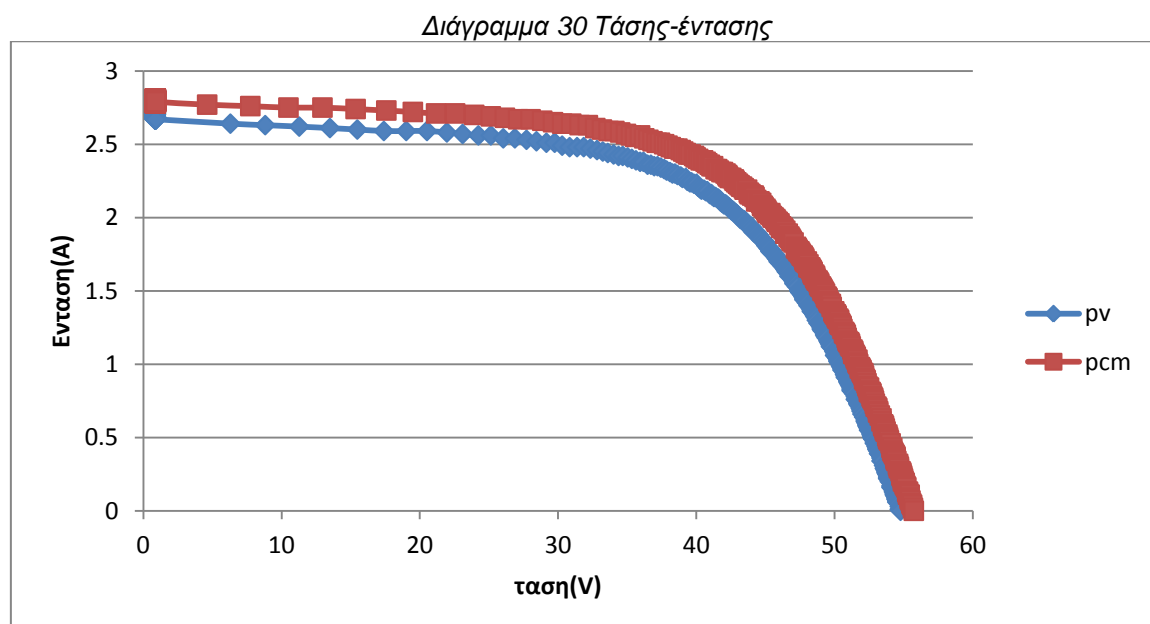
Άρα η απόδοση του πλαισίου αναφοράς είναι $\eta=8,51\%$

Ενώ του συστήματος μας είναι $\eta=8,17\%$

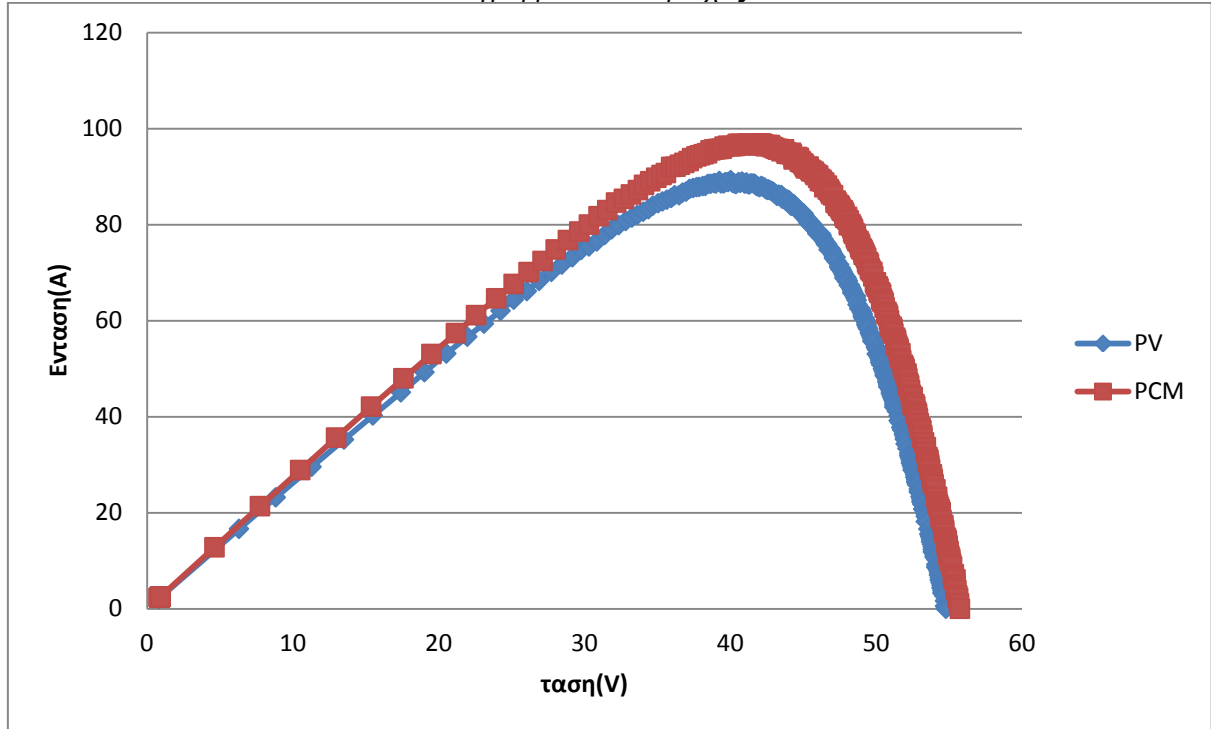
Η διαφορά είναι της τάξης 0,34% και οφείλεται αποκλειστικά στην διαφορά θερμοκρασίας. Αυτό που εξάγουμε ως πόρισμα είναι ότι σε αυτές τις περιβαλλοντικές συνθήκες η ροή του ανέμου λειτουργεί ως ψύξη του πλαισίου πιο αποτελεσματικά απ ότι το ΥΑΦ.

Ημερομηνία: 5-10-2015 Ωρα 11:00 πμ

Καιρικές συνθήκες: Ηλιοφάνεια 1045 W/m², νηνεμία



Διάγραμμα 31 Τάση-Ισχύς



Εργαζόμενοι πάνω στις τιμές βρίσκουμε την μέγιστη τιμή ισχύος και για τις δύο περιπτώσεις και αυτόματα την τάση και ένταση που αντιστοιχούν στη τιμή αυτή. Για το πλαίσιο αναφοράς η τιμή αυτή είναι και η τάση και ένταση και αντίστοιχα. Ενώ για το σύστημα με το ΥΑΦ είναι αντίστοιχα.

Για την εύρεση της απόδοσης του πλαισίου ισχύει :

$$\text{---} \quad (5.1)$$

Το A είναι το εμβαδό του πλαισίου και είναι σταθερό 1,4 m

Το G είναι η πυκνότητα ηλιοφάνειας και στη περίπτωση μας είναι 920 W/m²

Άρα η απόδοση του πλαισίου αναφοράς είναι $\eta=6,92\%$

Ενώ του συστήματος μας είναι $\eta=7,52\%$

Η διαφορά είναι της τάξης 0,6% και οφείλεται αποκλειστικά στην διαφορά θερμοκρασίας.

Παρατίθενται περιληπτικά οι αποδόσεις που προέκυψαν κατά την διάρκεια της ίδιας ημέρας

Ημερομηνία: 5-10-2015 Ώρα 12:00 πμ

Καιρικές συνθήκες: Ηλιοφάνεια 980 W/m^2 , νηνεμία

η απόδοση του πλαισίου αναφοράς είναι $n=7,38\%$

Ενώ του συστήματος μας είναι $n=7,60\%$

Ημερομηνία: 5-10-2015 Ώρα 13:00 πμ

Καιρικές συνθήκες: Ηλιοφάνεια 1020 W/m^2 , νηνεμία

η απόδοση του πλαισίου αναφοράς είναι $n=7,30\%$

Ενώ του συστήματος μας είναι $n=7,69\%$

Ημερομηνία: 5-10-2015 Ώρα 14:00 πμ

Καιρικές συνθήκες: Ηλιοφάνεια 10010 W/m^2 , νηνεμία

η απόδοση του πλαισίου αναφοράς είναι $n=7,50\%$

Ενώ του συστήματος μας είναι $n=7,83 \%$

6. Αποτελέσματα , συζήτηση

Συμπεραίνοντας, η θερμοκρασία εκτός από τον βαθμό απόδοσης επηρεάζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά μεγέθη της φωτοβολταϊκής γεννήτριας: Την τάση ανοικτού κυκλώματος (Voc), την τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος (VMPP), ελαφρώς το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος (IMPP) και προφανώς την μέγιστη ισχύ (PMPP). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας οδήγησαν στην εξαγωγή πολλών καίριων πορισμάτων τα οποία θα καθοδηγήσουν την μελλοντική έρευνα πάνω στο θέμα. Η βελτίωση της απόδοσης είναι προφανής με την χρήση του συστήματος αυτού όμως δεν ήταν η αναμενόμενη. Παράγοντες που επηρέασαν αρνητικά είναι η υψηλή ταχύτητα του ανέμου, όπως φάνηκε στις 4 Οκτωβρίου, η ροή του αέρα στην «πλάτη» του πλαισίου αναφοράς επιτύγχανε μεγαλύτερη μείωση της θερμοκρασίας του απ' ότι αυτή του ΥΑΦ καθώς υπήρχε άμεση και συνεχόμενη επαφή των μορίων του αέρα με το πλαίσιο τα οποία δεχόντουσαν ποσά θερμότητας από αυτό. Στο σύστημα Φ/Β – ΥΑΦ όμως η πλάτη είναι καλυμμένη. Δεύτερος παράγοντας που επηρέασε την μεταφορά θερμότητας από το φωτοβολταϊκό στο ΥΑΦ είναι η θερμική αγωγιμότητα από το ένα στο άλλο , πιο συγκεκριμένα η περιοχή επαφής τους. Για λόγους που αναλύθηκαν πιο πάνω δεν ήταν δυνατή η δημιουργία μηχανισμού που να επιτρέπει την άμεση επαφή του ΥΑΦ με το πλαίσιο οπότε το μέταλλο που παρεμβάλλεται μειώνει την θερμική αγωγιμότητα. Το βασικότερο πρόβλημα όμως ήταν πως η τέλεια επαφή του δοχείου με το Φ/Β πλαίσιο σ όλο το εμβαδό της επιφάνειας είναι εξαιρετικά δύσκολο να επιτευχθεί καθώς απαιτεί ακρίβεια μικρομέτρου και κατασκευαστικά αυτό είναι πολύ απαιτητικό και κοστοβόρο. Η απόσταση 2 – 3 mm δημιουργεί ένα λεπτό στρώμα ατμοσφαιρικού αέρα το οποίο όντας κακός αγωγός της θερμότητας λειτουργεί ως μονωτής και δυσκολεύει την μεταφορά θερμότητας από το πλαίσιο στο ΥΑΦ. Ακόμα και κάτω από αυτές τις συνθήκες τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά , η μέγιστη βελτίωση που πετύχαμε, στις 5 Οκτωβρίου, είναι της τάξης του 0,6% αυξάνοντας την απόδοση από 6,92% σε 7,52% δηλαδή κατά 8,6%. Πρέπει να αναφερθεί βέβαια ότι η επιρροή της θερμοκρασίας δεν είναι η ίδια σε όλους τους τύπους Φ/Β. Για παράδειγμα, το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για το συγκεκριμένο πείραμα δεν παρουσιάζει πολύ μεγάλη απόκλιση στην ισχύ με την αύξηση της θερμοκρασίας (-0,33%/oC). Στην περίπτωση όμως πιο

καινοτόμων Φ/Β όπως τα νέα μονοκρυσταλλικά με αποδόσεις που αγγίζουν το 21% η θερμοκρασία έχει μεγαλύτερη επίδραση στην απόδοση με αποτέλεσμα, αν εφαρμοστεί η μέθοδος που ακολουθήθηκε στο πείραμα να υπάρξει όφελος της τάξης του 5-7% σε πολύ ζεστές μέρες. Εύλογα όμως θα προκύψει το ερώτημα: Είναι τελικά βιώσιμο ένα σύστημα Φ/ΒΥΑΦ; Αν εξετασθεί το Φ/Β-ΥΑΦ ως μεμονωμένο σύστημα, όπως στο πείραμα, τότε λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής όλου του συστήματος ψύξης, η λύση δεν είναι βιώσιμη. Αν όμως ληφθεί υπόψη ενδεχόμενη παραγωγή σε βιομηχανικό επίπεδο καθώς επίσης και η αναμενόμενη πτώση στο κόστος παραγωγής των ΥΑΦ τα οποία εισέρχονται πλέον στο χώρο των ενεργειακών κατασκευών τότε το συνολικό κόστος μπορεί να μειωθεί δραματικά και τελικά η λύση να καταστεί βιώσιμη. Για περεταίρω έρευνα προτείνεται να μελετηθεί το σύστημα καθ' όλη την διάρκεια του έτους για να υπάρχει πλήρης αξιολόγηση της συμπεριφοράς του. Επίσης για την κλιματολογική περιοχή των Χανίων και ιδιαίτερα για τους καλοκαιρινούς μήνες πρέπει να μελετηθεί και η χρήση ενός ΥΑΦ με υψηλότερο σημείο τήξης 32 – 37 °C καθώς το RT 27 °C έλιωνε εντός τριών ωρών. Σε επόμενο στάδιο πρέπει να μελετηθεί και να βρεθεί τρόπος ώστε να υπάρχει άμεση επαφή του ΥΑΦ με το Φ/Β.

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Τοποθέτηση ΥΑΦ στην ψευδοροφή κτηρίων [Building. CO, 2012].....	20
Εικόνα 2:Α Χρήση ΥΑΦ για ψύξη ηλεκτρονικών server [Finoric LLC, 2010].....	21
Εικόνα 3: Μικροφίλμ από υλικό αλλαγής φάσης τοποθετημένο πάνω στον επεξεργαστή ηλεκτρονικού υπολογιστή [Bergquistcompany, 2013]	22
Εικόνα 4: ΥΑΦ που τοποθετούνται σε Θέρμο μονωμένα δοχεία μεταφοράς αγαθών [Rubitherm ,2011]	23
Εικόνα 5: Ενσωμάτωση μικροσκοπικών καψουλίων παραφίνης σε ύφασμα ρουχισμού [Staedter, 2013]	24
Εικόνα 6: Η διαστασιολόγηση της συσκευής με τα μεταλλικά πτερύγια στο εσωτερικό της [Hasan et al,2010]	25
Εικόνα 7: Μεταλλική κατασκευή με αφαιρούμενα πτερύγια [Huang et al., 2011].....	26
Εικόνα 8: Οι τριγωνική και η ημικυκλική διάταξη [Huang, 2011]	29
Εικόνα 9: Απεικόνιση της τελικής κατασκευής με διαπερατό το άνω μέρος για να φαίνετε η διαμερισματοποίηση	31
Εικόνα 10: γεωμετρικά χαρακτηριστικά πλαισίου NA-E130L5 [Sharp, 2013]	33
Εικόνα 11 I-V tracer ,ιδιοκασκευή.....	35
Εικόνα 12 Πυρανόμετρο υπό γωνία	36
Εικόνα 13: Τα στόμια στο ανώτατο και κατώτατο σημείο του κάθε δοχείου	37
Εικόνα 14: Θερμικό πρότυπο φωτοβολταϊκού [Φραγκιαδάκης, 2007]	39
Εικόνα 15 Σημεία μέτρησης θερμοκρασίας	45

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: ΥΑΦ που χρησιμοποιήθηκαν [Rubitherm]	28
Πίνακας 2: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά σε STC [Sharp, 2013]	32
Πίνακας 3: Μεταβολή ηλεκτρολογικών μεγεθών από την αύξηση της θερμοκρασίας [Sharp, 2013].....	33
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά RT27 [Rubitherm,2012].....	34
Πίνακας 5 Θερμοκρασία πλαισίων 5-3-2015	46
Πίνακας 6 Θερμοκρασία πλαισίων 28-4-2015	47

Πίνακας 7 Θερμοκρασία πλαισίων 29-4-2015	49
Πίνακας 8 Θερμοκρασία πλαισίων 13-05-2015	50
Πίνακας 9 Θερμοκρασία πλαισίων 26-05-2015	52
Πίνακας 10 Θερμοκρασία πλαισίων 27-05-2015	53
Πίνακας 11 Θερμοκρασία πλαισίων 28-05-2015	55

Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Χαρακτηριστικές καμπύλες-V και P-V [National Instruments, 2014].....	9
Διάγραμμα 2: Μεταβολή του διαγράμματος I-V με την αύξηση της θερμοκρασίας [National Instruments, 2014].....	10
Διάγραμμα 3: Γραφικές παραστάσεις P-V σε διάφορες θερμοκρασίες [National Instruments, 2014].....	11
Διάγραμμα 4: Σχέση θερμοκρασίας και θερμότητας σε ένα υλικό κατά την θέρμανση του [Mehling et al., 2008]	13
Διάγραμμα 5: Τυπικές τιμές θερμοκρασίας κι ενθαλπίας τήξης ΥΑΦ, [Paksoy, 2007]	15
Διάγραμμα 6 Ευρέως χρησιμοποιούμενες παραφίνες [Pharmaceutical Outsourcing, 2011].....	17
Διάγραμμα 7: Θερμοκρασία ως προς τον χρόνο για διαφορετικές αποστάσεις πτερυγίων [Huang et al.,2011]	27
Διάγραμμα 8: Η διαφορά αντοχής των ανθρακονημάτων από το πλαστικό ABS [Markforged,2014]	30
Διάγραμμα 9 Σύγκριση πλαισίων στο άνω σημείο μέτρησης.....	46
Διάγραμμα 10 Σύγκριση πλαισίων στο κάτω σημείο μέτρησης	47
Διάγραμμα 11 Σύγκριση πλαισίων στο άνω σημείο μέτρησης.....	48
Διάγραμμα 12 Σύγκριση πλαισίων στο κάτω σημείο μέτρησης	48
Διάγραμμα 13 Σύγκριση πλαισίων στο κάτω σημείο μέτρησης	49
Διάγραμμα 14 Σύγκριση πλαισίων στο άνω σημείο μέτρησης.....	50
Διάγραμμα 15 Σύγκριση πλαισίων στο κάτω σημείο μέτρησης	51
Διάγραμμα 16 Σύγκριση πλαισίων στο άνω σημείο μέτρησης.....	51
Διάγραμμα 17 Σύγκριση πλαισίων στο κάτω σημείο μέτρησης	52

Διάγραμμα 18 Σύγκριση πλαισίων στο άνω σημείο μέτρησης.....	52
Διάγραμμα 19 Σύγκριση πλαισίων στο κάτω σημείο μέτρησης	54
Διάγραμμα 20 Σύγκριση πλαισίων στο άνω σημείο μέτρησης.....	54
Διάγραμμα 21 Σύγκριση πλαισίων στο κάτω σημείο μέτρησης	55
Διάγραμμα 22 Σύγκριση πλαισίων στο άνω σημείο μέτρησης.....	55
Διάγραμμα 23 Θερμοκρασία πλαισίων 25-06-2015.....	56
Διάγραμμα 24 Σύγκριση πλαισίων στο κάτω σημείο μέτρησης	56
Διάγραμμα 25 Σύγκριση πλαισίων στο άνω σημείο μέτρησης.....	57
Διάγραμμα 26 Τάσης-έντασης.....	59
Διάγραμμα 27 Τάσης-ισχύος	59
Διάγραμμα 28 Τάσης-έντασης.....	61
Διάγραμμα 29 Τάση-ισχύς.....	61
Διάγραμμα 30 Τάσης-έντασης.....	62
Διάγραμμα 31 Τάση-ισχύς.....	63

7. Βιβλιογραφία

1. Γκέκας Βασίλειος, Πρωιμάκη Σπυριδούλα, Φαινόμενα Μεταφοράς για Μηχανικούς Περιβάλλοντος, Εκδόσεις Τζιόλα, 2000.
2. Κανάκης Ιωάννης, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Σημειώσεις εργαστηριακών ασκήσεων, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2011.
3. Λύκος Δημήτριος , Αριθμητικές Μέθοδοι Μοντελοποίησης Υλικών Αλλαγής Φάσης , Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2007.
4. Μανδηλαράς, Ι., Phase Change Energy Storage: Phase Change Materials, Measurements and Applications, Μεταπτυχιακή εργασία ΔΠΜΣ Συστήματα Αυτοματισμού, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2006.
5. Ντάβου Έρικα, Τα Υλικά Αλλαγής Φάσης ως Μέσα Διαχείρισης κι Εξοικονόμησης Ενέργειας. Εφαρμογή τους στη Μόνωση Κτιρίων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2009.
6. Πριγκηπάς Δημήτριος, Ανάπτυξη Υπολογιστικών Εργαλείων για την Προσομοίωση Χαρακτηριστικών Ροής σε Συστήματα με Ταυτόχρονη Αποθήκευση Ενέργειας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2012.
7. Ρίζος Νικόλαος, Προσδιορισμός Θέσης Διεπιφάνειας Στερεού- Υγρού, σε Υλικό Αλλαγής Φάσης με το Εμπορικό Πακέτο FLUENT, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2011.

8. Τρυπαναγνωστόπουλος Ι., Τζαβέλλας Δ., Ζούλια Ε., ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ/ΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΕΡΑ, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
9. Τσούτσος Θεοχάρης, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Περιβάλλον, Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2008.
10. Φραγκιαδάκης Ι.Ε., "Φωτοβολταϊκά Συστήματα", Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 2007.
11. Ciulla Giuseppina, Lo Brano Valerio, Cellura Maurizio, Franzitta Vincenzo, Milone Daniele. A finite difference model of a PV-PCM system, Dipartimento dell'Energia, Università degli Studi di Palermo, Palermo, Italy, 2012.
12. Gkouskos Zacharias, Tsoutsos Theocharis, Kakouriotis Alexandros, INTEGRATING PHASE CHANGE MATERIALS TO PHOTOVOLTAICS IN A MEDITERRANEAN REGION, 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2012.
13. Halime O. Paksoy, Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption – Fundamentals, Case Studies and Design, NATO Science Series, Springer publications, 2007.
14. Hasan, S.J. McCormack, M.J. Huang, B. Norton. Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics. Solar Energy, Vol. 84, pp 1601–1612, 2010.

15. Huang M. J. Two Phase Change Material with Different Closed Shape Fins in Building Integrated Photovoltaic System Temperature Regulation, World Renewable Energy Congress, Sweden, 2011.
16. Huang Ming Jun , Hewitt Neil, Effect of using two PCMs on the thermal regulation performance of BIPV systems, Centre for Sustainable Technologies, School of Built Environment, University of Ulster, N. Ireland, UK, 2011.
17. Mehling, Cabeza, Heat and Cold storage with PCM, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
18. Morita Y., Fujisawa T., Tani T., Moment performance of photovoltaic/thermal hybrid panel (numerical analysis and exergetic evaluation), Electrical Engineering in Japan, 2000.
19. Rubitherm Technologies GmbH, RUBITHERM® RT, Phase Change Material based on n-Paraffins and Waxes.
20. Sharp Energy Solution. Datasheet Sharp zonnepaneel NA-F121(G5) 121 Wp. Hamburg, Germany, Europe.
21. Tripanagnostopoulos Y., Nousia TH., Souliotis M. and Yianoulis P., "Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar Systems" Physics Department, University of Patras, October 2001

INTERNET SITES

1. <http://www.sharp.de/> (Μάρτιος 15)
2. <http://science.howstuffworks.com/environmental/energy/solar-cell4.htm>
(Μάρτιος 15)
3. <http://resources.solmetric.com/get>(Απριλιος15)
4. <http://www.ni.com/white-paper/7230/en/> (Ιανουάριος 15)
5. <http://www.rgees.com/technology.php> (Δεκεμβριος 14)
6. http://www.textileworld.com/Issues/2004/March/Features/Phase_Change_Materials(Νοεμβριος 14)
7. <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/advanced-phase-change-material-pcm-market-1087.html> (Δεκέμβριος 14)
8. <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/55553.pdf> (Φεβρουάριος 15)
9. <http://pveducation.org/pvcdrom/modules/heat-loss-in-pv-modules> (Μάρτιος 15)