



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Διπλωματική εργασία

Καραμήτσος Μάριος

Τίτλος : *Εκτίμηση ενεργειακών αναγκών θερμοκηπιακών μονάδων και αξιολόγηση τεχνολογιών κάλυψής τους.*

Επιβλέπων:

Επίκουρος Καθηγητής, Αραμπατζής Γεώργιος

Χανιά, 2020

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή της διπλωματικής μου, κύριο Αραμπατζή Γεώργιο για την πολύτιμη βοήθεια, την καθοδήγηση και την υπομονή του σε όλη την διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας. Επιπλέον θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τις πολύτιμες γνώσεις που μας πρόσφερε στα μαθήματα της Ρευστομηχανικής και της Μετάδοσης Θερμότητας.

Δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής μας, Γεραμπίνη Ευστάθιο για τις συμβουλές και την στήριξη που μου παρείχε κατά την συγγραφή της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους Παπαευθυμίου και Ιψάκη που αποτέλεσαν μέλη της επιτροπής, για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσαν προκειμένου να μελετήσουν αυτή την εργασία.

Τις θερμές μου ευχαριστίες στην υποψήφια διδάκτωρ κυρία Καλαφάτη Φωτεινή για την ανιδιοτελή της βοήθεια στην διεκπεραίωση των σπουδών μου. Ήταν πάντα εκεί για εμένα και για όλους τους προπτυχιακούς φοιτητές του τμήματός μας.

Θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου για την ανιδιοτελή αγάπη τους τόσα χρόνια καθώς και για την υλική και ηθική συμπαράσταση για να κατορθώσω να ολοκληρώσω τις σπουδές μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου. Παλιούς αλλά και αυτούς που γνώρισα στα Χανιά.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	9
1.2 ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	12
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ	12
2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΚΑΙ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	16
2.3 ΤΥΠΟΙ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ	20
2.3.1 ΣΧΗΜΑ	21
2.3.2 ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	24
2.3.2.1 ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ ΧΩΡΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ	24
2.3.2.2 ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ.....	26
2.3.3 ΣΚΕΛΕΤΟΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	26
2.3.4 ΥΛΙΚΑ ΚΑΛΥΨΗΣ.....	27
2.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	31
3.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	31
3.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	32
3.2.1 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ	33
3.2.1.1 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ	34

3.2.1.2 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΕΔΑΦΟΥΣ	36
3.2.1.3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ	37
3.2.1.4 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ	37
3.2.1.5 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ	38
3.2.2 ΘΕΡΜΙΚΑ ΚΕΡΔΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	39
3.2.3 ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟ ΨΥΚΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ	40
3.2.4 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ.....	43
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	43
4.2 ΒΗΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ	51
5.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ	51
5.1.1 ΧΑΝΙΑ	51
5.1.2 ΚΑΛΑΜΑΤΑ	58
5.1.3 ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	65
5.1.4 ΦΛΩΡΙΝΑ	71
5.2 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ	81
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	81
6.2 ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ	81
6.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΑΠΕ	85
6.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	92
6.5 ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΡΟΤΙΜΗΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ	96
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	96
7.2 ΑΕΡΙΣΜΟΣ	96
7.2.1 ΦΥΣΙΚΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ.....	97
7.2.2 ΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΣ	101
7.3 ΔΡΟΣΙΣΜΟΣ.....	103
7.4 ΣΚΙΑΣΗ.....	105
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	108
 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	 110

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε παγκόσμιο επίπεδο εμφανίζονται αυξητικοί πληθυσμιακοί ρυθμοί, ενώ παράλληλα αύξηση παρουσιάζουν και οι ρυθμοί αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας, και της κατανάλωσης τροφίμων. Η κλιματική αλλαγή και η συνεχής μεταβολή της παγκόσμιας θερμοκρασίας επιφέρουν σημαντικά προβλήματα στην παραγωγή τροφίμων σε πολλές χώρες ανά τον κόσμο, με αποτέλεσμα τα μοντέλα που εξετάζουν τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής να δείχνουν πως σε διάστημα δύο δεκαετιών ή και λιγότερο, ο υποσιτισμός στον πλανήτη θα αυξηθεί αισθητά, ενώ σε βάθος 50ετίας, το πρόβλημα αυτό θα αγγίξει σε έντονο βαθμό και τις χώρες του ανεπτυγμένου κόσμου.

Μία από τις μεθόδους αντιμετώπισης του επερχόμενου επισιτιστικού προβλήματος αποτελεί η ανάπτυξη και η βελτίωση των θερμοκηπιακών μονάδων, με σκοπό την παραγωγή τροφίμων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Οι μονάδες αυτές διαθέτουν τη δυνατότητα να προσομοιώνουν τις κλιματικές συνθήκες, οι οποίες επικρατούν κατά την ανάλογη περίοδο καλλιέργειας του εκάστοτε φυτού. Με τον τρόπο αυτό υπάρχει η δυνατότητα για παραγωγή και διάθεση λαχανικών υψηλής θερμιδικής αξίας, καθιστώντας αυτήν τη μέθοδο παραγωγής, μία από τις βέλτιστες εναλλακτικές σε περίπτωση πρόκλησης σοβαρής μεταβολής των παγκόσμιων κλιματικών συνθηκών

Αντικείμενο της εργασίας είναι η ανάπτυξη, υλοποίηση και εφαρμογή ενός υπολογιστικού μοντέλου εκτίμησης των ενεργειακών αναγκών μιας θερμοκηπιακής μονάδας. Το μοντέλο είναι σε θέση να υπολογίσει τα ενεργειακά φορτία για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό, εξαερισμό και δροσισμό στη βάση (α) του σχήματος, του μεγέθους και των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών του θερμοκηπίου, (β) του είδους της καλλιέργειας και (γ) κλιματικών δεδομένων (θερμοκρασία περιβάλλοντος, ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου). Η ανάλυση στηρίζεται στα φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας που λαμβάνουν χώρα εντός του τεχνητού περιβάλλοντος αλλά και στα χαρακτηριστικά των συνηθέστερων τεχνολογιών θέρμανσης και κλιματισμού. Το μοντέλο υλοποιείται σε προγραμματιστικό περιβάλλον Python. Στη βάση του μοντέλου αυτού, πραγματοποιείται μια ανάλυση της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός πρότυπου θερμοκηπίου σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας (διαφορετικές κλιματικές ζώνες). Ταυτόχρονα προτείνονται κατάλληλες τεχνολογίες κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε κάθε περιοχή και πραγματοποιείται η οικονομική τους αξιολόγηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός Της Εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η υλοποίηση του μοντέλου θερμοκηπιακής μονάδας σε προγραμματιστικό περιβάλλον Python με στόχο τον υπολογισμό των θερμικών και ψυκτικών αναγκών. Η εφαρμογή λαμβάνει ως είσοδο διάφορα δεδομένα (πάχος καλύμματος, υλικό κατασκευής, εξωτερική θερμοκρασία κλπ.) και αποδίδει το ακριβές θερμικό και ψυκτικό φορτίο κάλυψης των ενεργειακών αναγκών ενός θερμοκηπίου. Επιπροσθέτως, εξετάζονται οι επικρατούσες τεχνολογίες θέρμανσης, ψύξης, αερισμού και δροσισμού των θερμοκηπιακών μονάδων.

Ακολούθως παρατίθεται η δομή της εργασίας.

Στο 2^ο Κεφάλαιο επιχειρείται μία ιστορική αναδρομή των θερμοκηπίων ενώ καταδεικνύεται η χρησιμότητα τους ως μοχλός ανάπτυξης στο σημερινό ανταγωνιστικό περιβάλλον. Ακολουθεί μία περιγραφή των κατηγοριών των συγκεκριμένων μονάδων ως προς το σχήμα, τον τρόπο κατασκευής και τις διαστάσεις, των υλικών κατασκευής του σκελετού καθώς και των υλικών κάλυψης. Τέλος, γίνεται μια ανάλυση της έννοιας της προσομοίωσης καθώς και των μοντέλων που χρησιμοποιούνται στα θερμοκήπια.

Στο 3^ο Κεφάλαιο παρέχεται η μαθηματική μοντελοποίηση που απαιτείται για την προσομοίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς της θερμοκηπιακής μονάδας. Γίνεται ανάλυση του ενεργειακού ισοζυγίου ενός προτύπου θερμοκηπίου και αναφέρονται οι μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας που συμμετέχουν στην διαδικασία. Επιπλέον, περιγράφονται οι θερμικές απολαβές λόγω ηλιακής ακτινοβολίας.

Στο 4^ο Κεφάλαιο περιγράφεται το υπολογιστικό μοντέλο, αναλύονται τα βήματα του και επεξηγείται η γενικότερη φιλοσοφία του. Πιο ειδικά, αναφέρονται τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου, χρησιμοποιούνται διαγράμματα ροής (flowcharts) για την σχηματική αναπαράσταση των κυριότερων διαδικασιών του αλγορίθμου και τέλος γίνεται αναφορά στην έξοδο του προγράμματος.

Στο 5^ο Κεφάλαιο πραγματοποιείται η ενεργειακή ανάλυση ενός πρότυπου θερμοκηπίου για διάφορες κλιματικές ζώνες της χώρας, όπως αυτές ορίζονται με τη βοήθεια ειδικών χαρτών. Συγκεκριμένα, το μοντέλο υλοποιείται για τέσσερεις πόλεις

(Χανιά, Καλαμάτα, Θεσσαλονίκη, Φλώρινα) αλλά και για τα δύο συνηθέστερα υλικά κάλυψης του θερμοκηπίου (γυαλί ή PE). Ως καλλιεργήσιμος καρπός ορίζεται η τομάτα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή πινάκων και διαγραμμάτων. Τέλος, γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, μέσα από την οποία προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα.

Στο 6^ο Κεφάλαιο γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση των κυριότερων τεχνολογιών θέρμανσης θερμοκηπίων και αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της καθεμιάς.

Στο 7^ο Κεφάλαιο επιχειρείται η καταγραφή των συστημάτων ψύξης των θερμοκηπίων. Συγκεκριμένα γίνεται αναλυτική παρουσίαση των μεθόδων αερισμού, δροσισμού και σκίασης των θερμοκηπιακών μονάδων.

Στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας, γίνεται μια αποτίμηση του μοντέλου και προτείνονται πιθανές βελτιώσεις για το μέλλον.

1.2 Συνεισφορά Της Εργασίας

Η πρακτική αξία της παρούσας διπλωματικής εργασίας πηγάζει από το γεγονός ότι παρέχεται ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο των ενεργειακών συναλλαγών που λαμβάνουν χώρα σε ένα θερμοκήπιο. Το μοντέλο που καταστρώνεται μπορεί να βρει στη συνέχεια εφαρμογή πολλά θερμοκήπια της χώρας τα οποία διαφοροποιούνται ως προς τις κλιματικές συνθήκες.

Ο υπολογισμός των ενεργειακών φορτίων για θέρμανση και ψύξη μέσω του μαθηματικού μοντέλου, σε συνδυασμό με την προγραμματιστική υλοποίηση που ακολουθεί, είναι ικανά να παρέχουν ένα ολοκληρωμένο πακέτο εκτίμησης των απαιτήσεων και συνεπώς του οικονομικού κόστους που προκύπτει από την εγκατάσταση και συντήρηση μίας θερμοκηπιακής μονάδας. Το παραπάνω πακέτο μεθοδολογιών φιλοδοξεί να αποτελέσει ένα ισχυρό εργαλείο στην προσπάθεια των σχετικών εταιρειών να κατανοήσουν εις βάθος τον πολλά υποσχόμενο χώρο των θερμοκηπίων για ταυτόχρονη πιο αποδοτική εκμετάλλευση. Συγκεκριμένα, ο χρήστης εισάγει στο μοντέλο διάφορες γνωστές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος, τα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας, η ένταση του αέρα, τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για τον σκελετό, ο

επιθυμητός καρπός κ.ά. και λαμβάνει ως αποτέλεσμα το απαραίτητο θερμικό και ψυκτικό φορτίο. Η εφαρμογή είναι αρκετά φιλική προς τον χρήστη και αυτοματοποιημένη και ως εκ τούτου δεν απαιτείται ιδιαίτερη προσπάθεια εκμάθησης παρά μόνο βασικές γνώσεις χειρισμού H/Y .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Γενικά για τα Θερμοκήπια

Η αυξανόμενη ζήτηση τροφίμων, αποτέλεσμα της συνεχούς αύξησης του πληθυσμού και της προσπάθειας καταπολέμησης του παγκόσμιου υποσιτισμού, σε συνδυασμό με τις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες και τις πιέσεις της αγοράς για φρέσκα γεωργικά προϊόντα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, συντελούν ώστε η θερμοκηπιακή καλλιέργεια να είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες οικονομικής ανάπτυξης. Η Ελλάδα και ειδικότερα η Κρήτη διαθέτουν προνομιακές κλιματολογικές συνθήκες, δηλαδή ήπιους χειμώνες και ζεστά καλοκαίρια, οι οποίες καθιστούν την εκτός εποχής παραγωγή κηπευτικών συμφέρουσα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η καλλιέργεια σε θερμοκηπιακές μονάδες να αποτελεί μια από τις ολοένα και πιο αναπτυσσόμενες βασικές γεωργικές δραστηριότητες η οποία συμβάλλει δραστικά στην κάλυψη των αναγκών της αγοράς. Παρ' όλα αυτά οι υψηλές απαιτήσεις σε διάφορους πόρους (ενέργεια, νερό, λιπάσματα, φυτοφάρμακα κλπ.) στα σύγχρονα θερμοκήπια ασκούν έντονες οικονομικές και περιβαλλοντικές πιέσεις. Το συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για την κλιματική αλλαγή και η οικονομική αβεβαιότητα, καθιστούν επιτακτική την ανάγκη για τεχνολογικές πρακτικές που βελτιώνουν την οίκο-αποδοτικότητα (eco-efficiency) των θερμοκηπιακών μονάδων, προστατεύοντας κατά αυτόν τον τρόπο τόσο την βιωσιμότητα της αγροτικής διαδικασίας όσο και το περιβάλλον από την ανθρωπογενή καταστροφή.

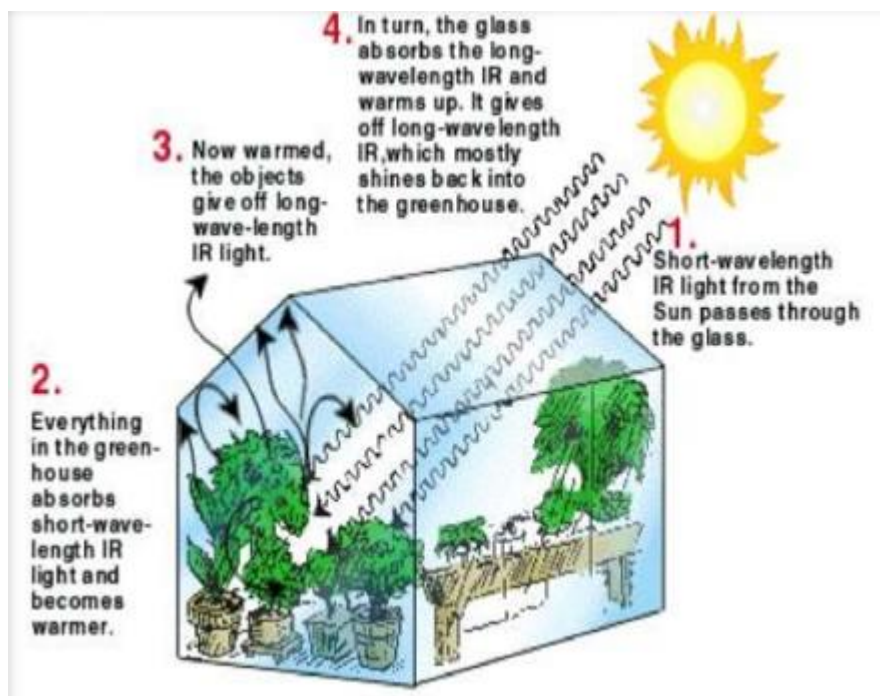
Το θερμοκήπιο ορίζεται ως μία κλειστή κατασκευή με διαφανή καλύμματα, αποτελούμενα κυρίως από γυαλί ή πολυαιθυλένιο, εντός της οποίας καλλιεργούνται διάφορων ειδών φυτά, φρούτα, λαχανικά καθώς και καλλωπιστικά άνθη. Καθήκον μιας πρότυπης θερμοκηπιακής μονάδας αποτελεί η προστασία της καλλιέργειας από δυσμενείς καιρικές συνθήκες και παράσιτα καθώς και ο έλεγχος του εσωτερικού περιβάλλοντος με στόχο τη δημιουργία ενός ευνοϊκού μικροκλίματος που προσφέρει τη δυνατότητα ανάπτυξης φυτών ή παραγωγής φυτικών προϊόντων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ανεξάρτητα από τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, στο πλαίσιο μίας ορθής σχεδίασης της προστατευόμενης καλλιέργειας απαιτούνται υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας, χαμηλή κατανάλωση θερμότητας, υψηλή απόδοση αερισμού,

επαρκής μηχανική αντοχή του συστήματος, χαμηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας του συστήματος [3], [4]

Η συμβολή του θερμοκηπίου ως «κλειστή κατασκευή» στη δημιουργία κατάλληλου μικροκλίματος, δίχως να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του εξοπλισμού θέρμανσης, αερισμού, δροσισμού, φωτισμού κ.α., κινείται σε δύο βασικούς άξονες:

- Στην ιδιότητα του διαφανούς υλικού κάλυψης να παρουσιάζει χαμηλή διαπερατότητα στη μεγάλου μήκους κύματος θερμική ακτινοβολία ($> 2500 \text{ nm}$) και υψηλή διαπερατότητα στην υπεριώδη, την φωτεινή και την εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία ($700\text{-}2500 \text{ nm}$). Γενικά, η θερμική ακτινοβολία εκπέμπεται σε μήκη κύματος από 0.1 έως $100 \text{ }\mu\text{m}$ και είναι αυτή που σχετίζεται με τη μεταφορά θερμότητας. Η υπέρυθρη αποτελεί ένα είδος θερμικής ακτινοβολίας. Η ενέργεια που περιέχεται στην εισερχόμενη φωτεινή και εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία απορροφάται από το έδαφος και τα άλλα στοιχεία του εσωτερικού του θερμοκηπίου. Αυτά με τη σειρά τους θερμαίνονται και εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής της ακτινοβολίας δε διαπερνά το κάλυμμα με συνέπεια να παγιδεύεται και να θερμαίνει τον εσωτερικό χώρο. Επιπλέον, η συσσώρευση θερμικής ενέργειας εντός του τεχνητού περιβάλλοντος δρα υποστηρικτικά στη διατήρηση της θερμοκρασίας του εδάφους κατά τη διάρκεια της νύχτας μειώνοντας τους ρυθμούς πτώσης.
- Ο δεύτερος άξονας είναι το γεγονός ότι τα υλικά κάλυψης του θερμοκηπίου δρουν ως ανεμοφράκτες περιορίζοντας δραματικά τη συναλλαγή αέρα μεταξύ του εσωτερικού χώρου και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Κατά αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η διατήρηση διαφοράς θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα στα δύο προαναφερθέντα περιβάλλοντα

με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός διακριτού μικροκλίματος της προστατευόμενης καλλιέργειας.



Εικόνα 2.1: Επίδραση Ηλιακής Ακτινοβολία [19]

Στα σύγχρονα θερμοκήπια ο έλεγχος των χαρακτηριστικών του τεχνητού περιβάλλοντος γίνεται με ολοένα πιο αυτοματοποιημένο τρόπο, αποκλειστικά μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών, με χρήση προηγμένων μεθόδων ελέγχου όπως συστήματα θέρμανσης / ψύξης, συστήματα αερισμού, συστήματα δροσισμού, συστήματα παροχής διοξειδίου του άνθρακα. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την κατασκευή μίας θερμοκηπιακής μονάδας και την ανάπτυξη των φυτών εντός αυτής είναι η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία και η ένταση του ανέμου του περιβάλλοντος και συνεπώς θα πρέπει να διατηρούνται κοντά σε προκαθορισμένα βέλτιστα επίπεδα με χρήση των παραπάνω τεχνικών. Υπό αυτή την έννοια οι τοπικές κλιματολογικές συνθήκες ασκούν σημαντική επιρροή στην κατασκευαστική δομή και στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η εναρμόνιση της σχεδίασης (design) και των τεχνολογιών με τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής. Παράλληλα, εντός του θερμοκηπίου καθίσταται δυνατή η τροποποίηση της συγκέντρωσης του

διοξειδίου του άνθρακα καθώς και ο έλεγχος άλλων συντελεστών όπως η υγρασία του εδάφους και ο ορθός αερισμός οι οποίοι συνεισφέρουν σημαντικά με τη σειρά τους στην ευδοκίμηση των καλλιεργούμενων αγαθών [2], [3].



Εικόνα 1.2: Περιβάλλον Σύγχρονης Θερμοκηπιακής Μονάδας

Όπως διατυπώθηκε παραπάνω, η ικανότητα διαμόρφωσης του εσωτερικού περιβάλλοντος σε συνδυασμό με την ορθή σχεδίαση ενός θερμοκηπίου συντελούν στην ανάπτυξη και παραγωγή αγροτικών προϊόντων υπό οποιεσδήποτε εξωτερικές κλιματικές συνθήκες. Αυτή ακριβώς η απαγκίστρωση από το εξωτερικό περιβάλλον και η δυνατότητα δημιουργίας πιο ποιοτικών αγαθών, σε αντίθεση με τα κοινά συμβατικά αγροκτήματα, ευθύνονται για την αποδοχή που τυγχάνουν οι προστατευόμενες καλλιέργειες θερμοκηπίων, ιδιαίτερα αν αναλογιστεί κανείς την ανάγκη για εντατικοποίηση της παραγωγής τα τελευταία χρόνια. Γίνεται εύκολα αντιληπτός λοιπόν ο σπουδαίος ρόλος που μπορούν να διαδραματίσουν οι συγκεκριμένες μονάδες στην ανασύνταξη της οικονομίας ως βασικοί πυλώνες της αγροτικής παραγωγής, στην κάλυψη των διατροφικών αναγκών του πληθυσμού καθώς και ως μοχλός ανάπτυξης μέσω της δημιουργίας πολλών νέων θέσεων εργασίας [1], [2], [3], [4].

2.2 Ιστορική Αναδρομή και Υφιστάμενη Κατάσταση

Η στόχευση για προσαρμογή του εξωτερικού περιβάλλοντος στις ανάγκες των γεωργικών καλλιεργειών μέσω προστατευόμενων συστημάτων χρονολογείται ήδη από αρχαιολογικών χρόνων στην Κίνα και στην Αίγυπτο καθώς και αργότερα στην Ελλάδα και στη Ρώμη. Η μακροχρόνια ιστορία αυτού του κλάδου καθιστά δύσκολο για τους ιστορικούς να ορίσουν με απόλυτη βεβαιότητα την εποχή και τον τόπο των πρώιμων μορφών θερμοκηπίων.

Η πρώτη οργανωμένη προσπάθεια είναι γνωστό ότι έγινε επί Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας όπου φυτικά προϊόντα και άνθη καλλιεργούνταν σε μερικούς καλυπτόμενους θερμαινόμενους χώρους. Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι οι Αυτοκράτορες τρέφονταν με λαχανικά τα οποία θερμαίνονταν την ημέρα ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας καλύπτονταν με ειδικά σκέπαστρα προκειμένου να προστατευτούν από δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Μετά τη πτώση της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας, όλες οι τεχνολογίες προστατευόμενων καλλιεργειών που είχαν αναπτυχθεί εξαφανίστηκαν. Κατά το Μεσαίωνα, όπως είναι αναμενόμενο, δεν υπήρξε ουδεμία εξέλιξη σε αυτό τον κλάδο. Τα θερμοκήπια επανεμφανίζονται στα τέλη του 15^{ου} έως τον 18^ο αιώνα σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες (Αγγλία, Ολλανδία, Γαλλία) κυρίως για προσωπική χρήση και δίχως ιδιαίτερη τεχνολογική εξέλιξη. Η κατασκευαστική δομή τους αφορούσε εξ ολοκλήρου κλειστά δωμάτια για την προστασία των φυτών καθώς και υπόστεγα με κτιστό τοίχο στα βόρεια ενώ στα νότια υπήρχαν ανοίγματα για αερισμό τα οποία έκλειναν με ξύλινα παραπετάσματα. Αρχικά τοποθετούνταν αποκλειστικά σε περιοχές με ήπιο κλίμα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους προκειμένου να αποφευχθεί ο κίνδυνος παγωνιάς της καλλιέργειας και της ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών εντός της μονάδας κατά τους χειμερινούς και καλοκαιρινούς μήνες αντίστοιχα. Τον 18^ο αιώνα δημιουργείται η τεχνολογία του διαφανούς αμφικλινούς στεγάστρου με τον βόρειο τοίχο της εγκατάστασης να διατηρείται κτιστός.

Η εμπορική χρήση των θερμοκηπιακών μονάδων για μαζική παραγωγή λαχανικών, φρούτων και καλλωπιστικών ανθών έλαβε χώρα περί τα μέσα του 19^{ου} αιώνα κυρίως στη βορειοδυτική περιοχή της Ευρώπης. Οι αυξημένες απαιτήσεις της αγοράς και η ζήτηση για εκτός εποχής κατανάλωση φρούτων και λαχανικών σε συνδυασμό με τις απαγορευτικές κλιματικές συνθήκες για ευδοκίμηση της γεωργικής καλλιέργειας (εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες) που επικρατούσαν σε αυτά τα μέρη φαίνεται ότι

έδρασαν ως μοχλός πίεσης για περαιτέρω εξέλιξη των θερμοκηπίων. Οι απλούστερες θερμοκηπιακές μονάδες του προηγούμενου αιώνα προχώρησαν σε σημαντικές διαφοροποιήσεις. Συγκεκριμένα η βόρεια κτιστή πλευρά αντικαταστάθηκε από γυαλί με αποτέλεσμα την απορρόφηση μεγαλύτερου μέρους ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπρόσθετα, το 1816 θεσπίστηκε ο πρώτος αυτόματος μηχανικός θερμοστάτης ως παθητικό σύστημα εξαερισμού του θερμοκηπίου.

Μετά τη λήξη του Β' Παγκοσμίου Πολέμου ο τομέας των θερμοκηπιακών καλλιεργειών γνώρισε αλματώδη πρόοδο σε όλη την Ευρώπη η οποία οφειλόταν στους ακόλουθους παράγοντες:

- Η δημιουργία νέων κατασκευαστικών τύπων. Η γυάλινη ή ξύλινη δομή των θερμοκηπίων αντικαθίσταται από μεταλλική επένδυση σε συνδυασμό με συστήματα θέρμανσης και ψύξης για τον πλήρως αυτοματοποιημένο έλεγχο του εσωτερικού περιβάλλοντος.
- Η ανάπτυξη βοηθητικών συστημάτων, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα θερμοκήπια για δημιουργία διακριτού μικροκλίματος, άρδευση, γονιμοποίηση και βιολογικό έλεγχο για ζιζάνια και παράσιτα.
- Η αυξημένη προσβασιμότητα των καλλιεργούμενων προϊόντων σε όλα τα μέρη του κόσμου. Η απελευθέρωση της αγοράς είχε ως συνέπεια την αύξηση της ανταγωνιστικότητας και τη δυνατότητα παροχής πιο ποιοτικών και οικονομικών αγαθών στους καταναλωτές συγκριτικά με τους κοινούς αγρούς.
- Η ευρεία χρήση πλαστικών καλυμμάτων στις αρχές του 1960. Η συγκεκριμένη τεχνολογία θεωρείται ότι επέφερε επανάσταση στον τομέα των θερμοκηπίων διότι ελάττωσε δραστικά το κόστος εγκατάστασης κάνοντας δυνατή τη χρήση θερμοκηπίων στις αναπτυσσόμενες χώρες, επέφερε μεγαλύτερη αυτονομία στη σχεδίαση και επέτρεψε την κατασκευή τους σε περιοχές της Μεσογείου όπως η Ισπανία, η Ιταλία και το Μαρόκο.
- Η πετρελαϊκή κρίση του 1973, λόγω της οποίας αυξήθηκε η τιμή του πετρελαίου με φυσικό επακόλουθο την αύξηση τους κόστους των συστημάτων θέρμανσης, βοήθησε στην περαιτέρω εξάπλωση των σύγχρονων προστατευόμενων καλλιεργειών στις χώρες του Νότου.
- Ανάγκη για εντατικοποίηση των ρυθμών παραγωγής

- Η οικονομική ανάπτυξη των χωρών της Μεσογείου μέσα από την αποδοτική διαχείριση πόρων όπως η γη και νερό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Αλμερία στην Ισπανία όπου συναντάται η μεγαλύτερη συγκέντρωση θερμοκηπίων στη Μεσόγειο.

Υφιστάμενη Κατάσταση:

Τη δεκαετία του 1990 υπήρχαν διεθνώς περισσότερα από 2.500.000 στρέμματα θερμοκηπίων εκ των οποίων τα 500.000 στρέμματα ήταν καλυμμένα με γυαλί ενώ τα υπόλοιπα διέθεταν διάφορα πλαστικά υλικά.

Περιοχή	Πλαστικά θερμοκήπια και πλαστικά τούνελ (ha)	Υαλόφρακτα θερμοκήπια (ha)	Σύνολο
Δυτική Ευρώπη	150.00	30.000	180.000
Ανατολική Ευρώπη	25.000	2.000	27.000
Αφρική	27.000	600	27.600
Μέση Ανατολή	28.000	13.000	41.000
Βόρεια Αμερική	10.000	1.500	11.500
Κεντρική/Νότια Αμερική	12.500	-	12.500
Κίνα /Ιαπωνία/Ωκεανία	450.000	2.500	452.500
Παγκόσμιο Σύνολο	702.500	49.600	752.100

Πίνακας 2.1: Παγκόσμια Έκταση Θερμοκηπίων [21]

Αναφορικά με την επικρατούσα κατάσταση στην Ευρώπη, όπως φαίνεται και από τον παρακάτω πίνακα οι υαλόφρακτες κατασκευές βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στις βόρειες χώρες ενώ στο Νότο καθώς και στη νότια πλευρά της Γαλλίας κυριαρχούν οι προστατευόμενες καλλιέργειες με πλαστικό υλικό. Υψηλά ποσοστά θερμοκηπιακών μονάδων παρατηρούνται σε περιοχές με ευνοϊκές κλιματικές συνθήκες. Για παράδειγμα το 68% των ολλανδικών θερμοκηπίων είναι εγκατεστημένο δίπλα στη Δυτική Ακτή της

Ολλανδίας ενώ στην Ελλάδα η συντριπτική πλειοψηφία (95%) βρίσκεται στη Κρήτη [26].

Χώρα Ε.Ε	Επιφάνεια θερμοκηπίων, ha	Ποσοστό πλαστικών θερμοκηπίων, %
Αυστρία	350	20
Βέλγιο	1800	5
Δανία	550	2
Γαλλία	10082	70
Γερμανία	4300	10
Ελλάδα	4200	95
Ιταλία	26600	91
Ολλανδία	10316	2
Πορτογαλία	4390	98
Ισπανία	28350	99
Σουηδία	400	14
Ηνωμένο Βασίλειο	2180	15

Πίνακας 1.2: Εκτάσεις θερμοκηπίων στην Ε.Ε [21]

Χώρα	Θερμοκήπια (μεγάλα πλαστικά tunnel)	Υαλόφρακτα θερμοκήπια	Σύνολο	Χαμηλά tunnel	Σύνολο προστατευόμενης επιφάνειας	Υδροπονική καλλιέργεια
Αλγερία	5000		5000	800	5800	
Κύπρος	285	—	285	300	585	
Αίγυπτος	1350		1350	50000	51350	10
Γαλλία	9000	2300	11300	16000	27300	
Ελλάδα	3000	2000	5000	4500	9500	200
Ισραήλ	4530	150	4680	15000	19680	1200
Ιταλία	61900	5800	67700	24000	91700	700
Μαρόκο	10000	550	10550	-	10550	
Ισπανία	51000	4800	55800	17500	73300	4000
Τυνησία	1300		1300	11000	12300	30
Τουρκία	20900	6200	27100	1500	28600	
Σύνολο	168265	21800	190065	140600	330665	

Πίνακας 2.3: Προστατευόμενες Καλλιέργειες στη Μεσόγειο [21]

Τα τελευταία 20 χρόνια υφίσταται ραγδαία αύξηση των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων στις χώρες της Μεσογείου. Οι μεγαλύτεροι αριθμοί συναντώνται σε Ισπανία, Ιταλία, Τουρκία και Μαρόκο όπως φαίνεται και από τον πίνακα 3. Οι επικρατούσες καλλιέργειες στις μεσογειακές χώρες αφορούν την παραγωγή λαχανικών. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί το Ισραήλ στο οποίο στα μισά θερμοκήπια αναπτύσσονται καλλωπιστικά άνθη. Αντίθετα, σε Ελλάδα, Ισπανία, Τουρκία και Ιταλία η καλλιέργεια λαχανικών αντιστοιχεί περίπου στο 90% των μονάδων. Η τομάτα αποτελεί το πλέον σύνηθες λαχανικό για ανάπτυξη και παραγωγή [4], [2], [17], [3], [20].

2.3 Τύποι Θερμοκηπίων

Τα θερμοκήπια διαχωρίζονται με τη βοήθεια διαφόρων κριτηρίων όπως το είδος της κατασκευής τους, το υλικό κατασκευής καθώς και το υλικό κάλυψης.

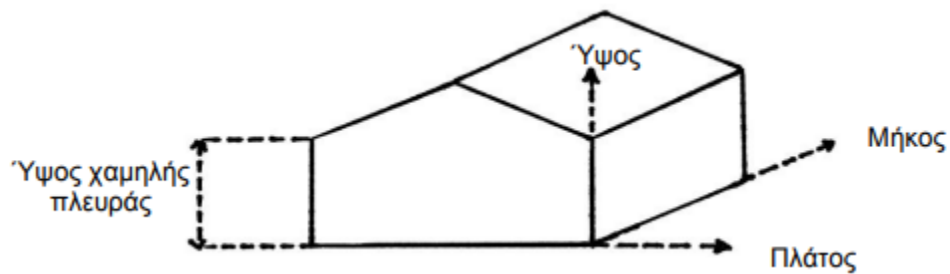
Ως Βασική Κατασκευαστική Μονάδα ορίζεται το μικρότερο πλήρες τμήμα του θερμοκηπίου το οποίο επαναλαμβανόμενο κατά μήκος και πλάτος δημιουργεί το σύνολο [4].

2.3.1 Σχήμα

Ανάλογα με το σχήμα των θερμοκηπίων διακρίνονται οι ακόλουθοι τύποι:

1) Αμφίρρικτο:

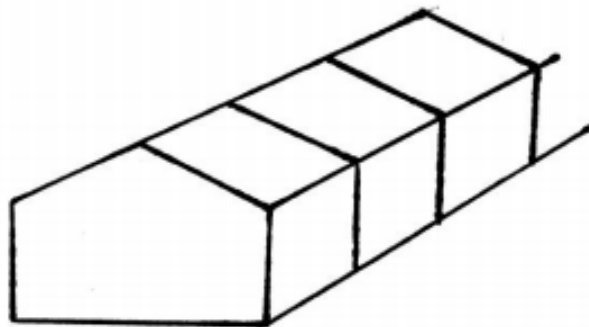
Η γενική μορφή αυτού του είδους φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [4].



Σχήμα 2.1: Αμφίρρικτο [4]

1α) Αμφίρρικτο απλό:

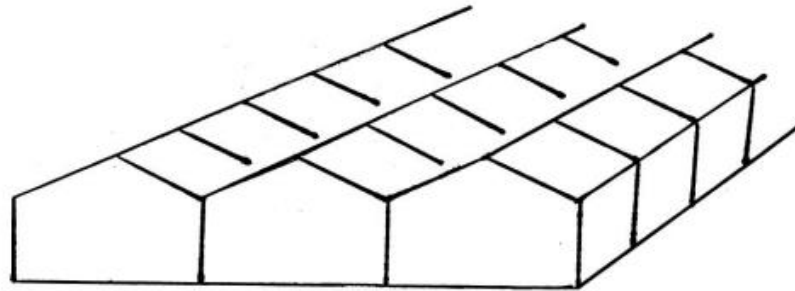
Καλείται το θερμοκήπιο που σχηματίζεται με την επανάληψη της αμφίρρικτης βασικής κατασκευαστικής μονάδας κατά μήκος [4].



Σχήμα 1.2: Αμφίρρικτο Απλό [4]

1β) Αμφίρρικτο Πολλαπλό:

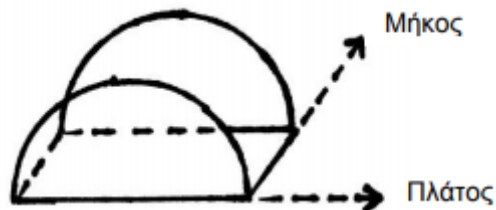
Αμφίρρικτο πολλαπλό καλείται το θερμοκήπιο το οποίο σχηματίζεται με την κατά μήκος και πλάτος επανάληψη της αμφίρρικτης βασικής κατασκευαστικής μονάδας [4].



Σχήμα 2.3: Αμφίρρικτο Πολλαπλό [4]

2) Τοξωτό:

Καλείται το θερμοκήπιο με βασική κατασκευαστική μονάδα η οποία καθορίζεται από δύο συνεχόμενα τόξα και έχει το παρακάτω σχήμα [4].



Σχήμα 2.4: Τοξωτό BKM [4]

2α) Τοξωτό Απλό:

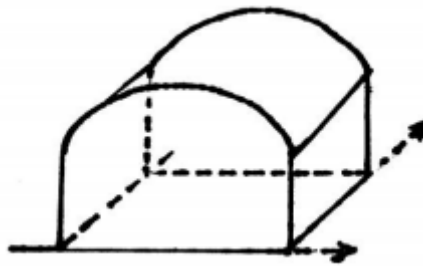
Τοξωτό απλό λέγεται το θερμοκήπιο που προκύπτει από την επανάληψη της τοξωτής βασικής κατασκευαστικής μονάδας [4].



Σχήμα 2.5: Τοξωτό Πολλαπλό [4]

3) Τροποποιημένο Τοξωτό:

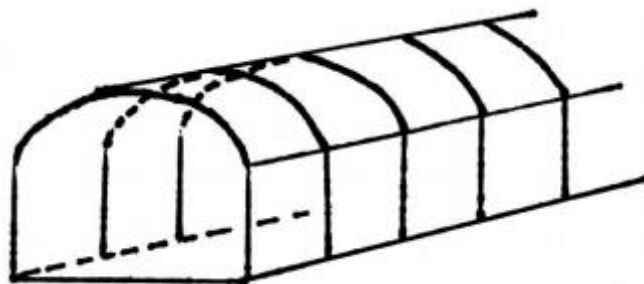
Το θερμοκήπιο που η βασική κατασκευαστική του μονάδα έχει το παρακάτω σχήμα. Διακρίνονται οι ορθοστάτες και η τοξωτή στέγη [4].



Σχήμα 2.6: Τροποποιημένο Τοξωτό [4]

3α) Τροποποιημένο Τοξωτό Απλό:

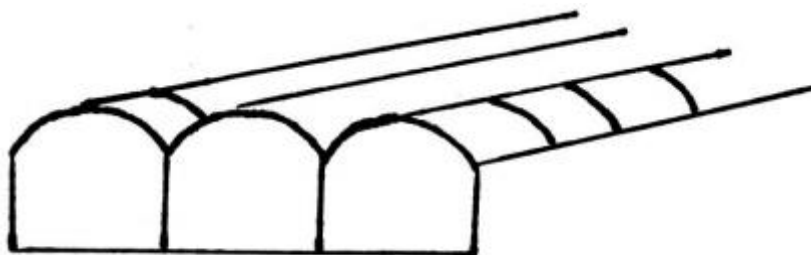
Τροποποιημένο τοξωτό απλό λέγεται το θερμοκήπιο που σχηματίζεται από την επανάληψη της τροποποιημένης τοξωτής κατασκευαστικής του μονάδας κατά μήκος [4].



Σχήμα 2.7: Τροποποιημένο Τοξωτό Απλό [4]

3β) Τροποποιημένο Τοξωτό Πολλαπλό:

Τροποποιημένο τοξωτό πολλαπλό καλείται το θερμοκήπιο που σχηματίζεται από την επανάληψη της τροποποιημένης τοξωτής κατασκευαστικής μονάδας κατά μήκος και πλάτος [4]



Σχήμα 2.2 Τροποποιημένο Τοξωτό Πολλαπλό [4]

2.3.2 Τρόπος Κατασκευής

Ως προς τον τρόπο κατασκευής τους, οι θερμοκηπιακές μονάδες κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες:

1) Χωρικού τύπου:

Θερμοκήπια που κατασκευάζονται από τους ίδιους τους παραγωγούς

2) Τυποποιημένα:

Θερμοκήπια που κατασκευάζονται από Βιοτεχνίες και Βιομηχανίες για εμπορική χρήση σε μαζική παραγωγή.

2.3.2.1 Θερμοκήπια Χωρικού Τύπου

Τα θερμοκήπια χωρικού τύπου είναι γενικά μία πολύ απλή κατασκευή. Παρά το γεγονός ότι διαθέτουν χαμηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης εμφανίζουν μια σειρά από μειονεκτήματα τα οποία δεν τα καθιστούν ιδιαίτερα λειτουργικά πλέον. Χαρακτηριστικά, αναφέρεται το χαμηλό ύψος, γεγονός που δεν επιτρέπει την άνετη εργασία του ανθρώπου εντός του χώρου, η έλλειψη παραθύρων οροφής που καθιστά μη

επαρκή τον φυσικό αερισμό καθώς και η εν γένει απουσία τεχνικού εξοπλισμού θέρμανσης, ψύξης, δροσισμού, αερισμού, με συνέπεια την αδυναμία βελτιστοποίησης των περιβαλλοντικών παραμέτρων. Όσον αφορά την Ελλάδα, η συντριπτική πλειοψηφία θερμοκηπίων χωρικού τύπου δεν διαθέτει εξοπλισμό θέρμανσης, παρά μόνο το 5% στο οποίο βρίσκεται εγκατεστημένο σύστημα ρύθμισης της θερμοκρασίας του τεχνητού περιβάλλοντος με σκοπό την ευδοκίμηση των φυτών. Αρχικά, οι συγκεκριμένες θερμοκηπιακές μονάδες αναπτύχθηκαν εμπειρικά, μέσα από την τεχνογνωσία των παραγωγών αλλά παρόλα αυτά στη συνέχεια μοντελοποιήθηκαν με ονομασίες και τύπους που πηγάζουν από το μέρος εγκατάστασης όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα. [2], [4]

Βασικοί τύποι	Χαρακτηριστικά
Τύπος Μακεδονίας ή Θεσσαλονίκης	ξύλινο θερμοκήπιο που σχεδιάστηκε το 1965 από τον γεωπόνο Φ. Γκράτσιο. Διαδόθηκε σε διάφορες περιοχές της Βορείου Ελλάδας. Η βασική μονάδα έχει πλάτος 10μ, σπανίως 12,5μ, πλάγιο ύψος 1,5-2μ και μέγιστο ύψος στέγης 2,5-3μ. Το μήκος του θερμοκηπίου μπορεί να φτάσει τα 50-120μ και η απόσταση των πασσάλων στην κατά μήκος διάσταση είναι 2μ. Το θερμοκήπιο αυτού του τύπου είναι σχετικά μικρού κόστους και έχει αντοχή στους ανέμους. Μειονέκτημα του το χαμηλό ύψος, που δεν επιτρέπει τον σωστό αερισμό, ενώ οι πολλοί πάσσαλοι δημιουργούν πρόβλημα μετακινήσεων στο εσωτερικό του, καθώς και αυξημένη σκίαση.
Τύπος Πρέβεζας	είναι από τα παλιότερα θερμοκήπια που χρησιμοποιήθηκαν για λαχανικά και ο σκελετός τους κατασκευάζεται από καλάμια. Πρωτοεμφανίστηκαν στην Πρέβεζα και σταδιακά διαδόθηκαν και σε άλλες περιοχές. Σήμερα έχουν αποσυρθεί.
Τύπος Σκάλας	ξύλινη κατασκευή, δίκρικτη με ύψος πλευρών 1-1,5μ, ύψος κορυφής 2-2,20μ και πλάτος 5-10μ. Είναι κατασκευή χωρικού τύπου και χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά στη Σκάλα Λακωνίας.
Τύπος Τυμπακίου	είναι η τροποποίηση του τύπου Μακεδονίας ώστε να αντέχει στους ισχυρούς ανέμους στο Τυμπάκι Κρήτης.
Τύπος Ιεράπετρας	ξύλινο θερμοκήπιο που έχει καλή αντοχή στους ανέμους και μικρό κόστος, άλλα μικρό ύψος, που περιορίζει τις κινήσεις, και μικρή αντοχή στις χιονοπτώσεις.
Τύπος Φιλιατρών	μεταλλικό θερμοκήπιο με τόξα που πακτώνονται στο έδαφος. Έχουν μικρό κόστος εγκατάστασης, ευκολία, μεγάλη διάρκεια ζωής, μεγάλη φωτεινότητα. Μειονέκτημα τους το μικρό ύψος στο κέντρο της αψίδας που περιορίζει τις κινήσεις φυτών και προσωπικού, καθώς και η δυσκολία εγκατάστασης αυτοματισμών.
Βελτιωμένος τύπος Φιλιατρών	μεταλλικό θερμοκήπιο απλή ή πολλαπλής γραμμής. Οι αψίδες δεν πακτώνονται απευθείας στο έδαφος άλλα στηρίζονται πάνω σε κάθετους πασσάλους ύψους 1,2-1,5μ. Έχουν τα πλεονεκτήματα του τύπου Φιλιατρών καθώς και μεγάλη διάρκεια ζωής.

Πίνακας 2.2 Θερμοκήπια Χωρικού Τύπου Με Πλαστικό Κάλυμμα [2]

2.3.2.2 Τυποποιημένα Θερμοκήπια

Τα τυποποιημένα θερμοκήπια κατασκευάζονται από βιομηχανίες της Ελλάδας ή χωρών του εξωτερικού και ο σκελετός τους αποτελείται από μέταλλο και ξύλο στις περισσότερες περιπτώσεις. Τα προκατασκευασμένα θερμοκήπια διακρίνονται σε μεταλλικά τοξωτά και μεταλλικά με ξύλινα στοιχεία πολύρρικτα [2]

Τα μεταλλικά τοξωτά διαθέτουν ένα, δύο ή περισσότερα ημικυκλικά tunnel. Το πλάτος μιας ημικυκλικής μονάδα ισούται με 9 μέτρα ενώ το ύψος κορφιά με 3.5μ. Το μήκος είναι ίσο συνήθως με 30 ή περισσότερα μέτρα [2].

Τα τυποποιημένα θερμοκήπια παρουσιάζουν μια σειρά από πλεονεκτήματα:

- Είναι ψηλά με λιγότερες κολώνες στήριξης από τα χωρικού τύπου
- Εμφανίζουν καλά επίπεδα φυσικού και δυναμικού εξαερισμού
- Η πλειοψηφία των τυποποιημένων θερμοκηπίων διαθέτει εγκατεστημένο σύστημα θέρμανσης, η λειτουργία του οποίου εξασφαλίζει στην προστασία κατά της δημιουργίας πάγου ή για συνεχόμενο έλεγχο της θερμοκρασίας των φυτών [2].

2.3.3 Σκελετός Θερμοκηπίου

Ο σκελετός του θερμοκηπίου είναι το φέρον σύστημα πάνω στο οποίο θα αναρτηθεί το διαφανές υλικό κάλυψης. Ο σκελετός θα πρέπει να έχει επαρκή στατική ευστάθεια και αντοχή για να φέρει τα παρακάτω φορτία [4].

- Στατικά φορτία, το βάρος του σκελετού και του υλικού κάλυψης
- Φορτία εξοπλισμού: συστήματα θέρμανσης, ψύξης, εξαερισμού, δροσισμού, σκίασης κ.λπ..
- Φορτίο οπωροκηπευτικών
- Δυναμικά φορτία (εργάτες, επισκέπτες)
- Φορτία Κλίματος, (χιόνι, πίεση ανέμου)

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, είναι τεχνικά εφικτό να υπολογισθούν τα υλικά που απαιτούνται και να σχεδιαστεί κατάλληλα η συναρμολόγησή τους, ώστε ο σκελετός που θα προκύψει να έχει επαρκή μηχανική αντοχή. Μέσω των υπολογισμών

αυτών προκύπτουν οι διατομές των στοιχείων του σκελετού, ανάλογα βέβαια με τη φύση του υλικού.

Ενώ από την μία πλευρά ένα θερμοκήπιο πρέπει να έχει επαρκή στατική και μηχανική αντοχή για να αντέχει στις προβλεπόμενες καταπονήσεις, από την άλλη πλευρά θα πρέπει να μην έχει υπερβολικά βαρύ και εκτεταμένο σκελετό για δύο λόγους. Ο λόγος είναι η σκίαση που προκαλεί ο σκελετός στην καλλιέργεια με δεδομένο ότι κατασκευάζεται από 14 αδιαφανή υλικά. Έχει υπολογιστεί ότι ο σκελετός μαζί με το υλικό κάλυψης του θερμοκηπίου μειώνει την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μία θερμοκηπιακή καλλιέργεια κατά 25-30% σε σύγκρισή με μία υπαίθρια καλλιέργεια στην ίδια περιοχή και τον ίδιο χρόνο

Εκτός από την ενισχυμένη κατασκευή του σκελετού, για να έχει ένα θερμοκήπιο την απαιτούμενη μηχανική αντοχή ενάντια σε ανέμους, χιόνι, κ.λπ., απαιτείται να έχει και κατάλληλη θεμελίωση. Η θεμελίωση μπορεί να γίνει είτε με περιμετρικό τοίχιο που στηρίζει και συνδέει ισχυρά τους στύλους (κολώνες) του σκελετού με το έδαφος, είτε με ατομική στήριξη κάθε κολώνας στο έδαφος με σκυρόδεμα (μπετόν). Αυτό όμως που δεν συνιστάται σε καμία περίπτωση είναι η στήριξη των στύλων του θερμοκηπίου απευθείας στο χώμα χωρίς προσθήκη σκυροδέματος. Κατά κανόνα, τα σύγχρονα θερμοκήπια μεσαίας και υψηλής τεχνολογίας θεμελιώνονται με κατασκευή περιμετρικού τοιχίου. [2], [20], [4].

2.3.4 Υλικά κάλυψης θερμοκηπίων:

Ο όρος κάλυμμα θερμοκηπίου αναφέρεται στο διαπερατό από φως υλικό, μέσω του οποίου διέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία. Αρχικά το γυαλί κατείχε τα ηνία ως υλικό κάλυψης θερμοκηπίων. Παρόλα αυτά η μαζική παραγωγή των πλαστικών και η χρήση τους πριν από έξι δεκαετίες τα έφερε στο προσκήνιο λόγω του μειωμένου κόστους και των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν συγκριτικά με το γυαλί [2].

Τα πλαστικά διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο για όλες τις χώρες οι οποίες ασχολούνται με λαχανοκομικά και ανθοκομικά προϊόντα και έφεραν στο προσκήνιο νέες μεθόδους καλλιέργειας. Η ανθεκτικότητα, η οπτική διαπερατότητα καθώς και οι δυνατότητες χρήσης τους, επιτρέπουν στα πλαστικά να αντικαθιστούν συνεχώς το γυαλί [2].

Τα πιο κύρια πλεονεκτήματα των πλαστικών είναι τα ακόλουθα:

- Το χαμηλότερο κόστος
- Το μικρότερο βάρος
- Το μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας στα πλαστικά θερμοκήπια αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη βελτίωση του μικροκλίματος σε ξηρές τοποθεσίες.
- Η μη ευθραυστότητα τους δημιουργεί μεγάλη αντοχή σε χαλαζόπτωση, αντίθετα με το γυαλί το οποίο είναι ιδιαίτερο εύθραυστο.
- Η δυνατότητα τοποθέτησης διπλού καλύμματος πλαστικό με σκοπό τη μείωση των θερμικών απωλειών. Διπλή στρώση γυαλιού επιφέρει μεγάλο κόστος και συγκέντρωση σκόνης και συνεπώς αποφεύγεται [2].

ΥΛΙΚΑ ΚΑΛΥΨΗΣ	ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ
Νέοι τύποι πολυαιθυλενίου	μεγάλη διάρκειας ζωής, αδιαπέραστο στη θερμική ακτινοβολία, μαύρου χρώματος ή γκρι, ενισχυμένο με συνθετικές ίνες για αύξηση αντοχής, φωτοεκλεκτικά που απορροφούν μέρος του φάσματος του φωτός, με ιδιότητες που εμποδίζεται η δημιουργία σταγόνων νερού.
Χλωριούχο πολυβινύλιο – PVC	χρησιμοποιείται κυρίως στην Ιαπωνία και ελάχιστα στις χώρες της Ν. Ευρώπης, έχει πολύ καλές φυσικές ιδιότητες.
Πολυεστέρες	είναι καλύτερα από το πολυαιθυλένιο σε σχέση με την θερμική ακτινοβολία άλλα σε δυσμενέστερη θέση από το PVC. Διάρκεια ζωής 4 χρόνια, ίσως και 7. Μειονέκτημα το μικρό πλάτος φύλλων και το υψηλό κόστος.
EVA	αντέχει σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και χρησιμοποιείται κυρίως στις Σκανδιναβικές χώρες.
Πολυπροπυλένιο:	σκληρότερο από το πολυαιθυλένιο με μικρή διάρκεια ζωής
Nylon	Καλές ιδιότητες με χρήση κυρίως στη Ρωσία
Tedlar	μεγάλη διάρκεια ζωής με καλές ιδιότητες άλλα ιδιαίτερα ακριβό υλικό.
Πλαστικά σε σκληρές πλάκες	καλή διάρκεια ζωής, εύκολη συντήρηση μικρή όμως περατότητα σε φωτεινή ακτινοβολία.
Πλάκες ενισχυμένου πολυεστέρα	χρήση σε τροπικές ή υποτροπικές περιοχές. Πάρα πολύ εύφλεκτο υλικό.
Πλάκες PVC	ευκολία χρήσης, καλή μηχανική αντοχή άλλα όχι για πάνω από 4 χρόνια. Υψηλό κόστος προμήθειας
Πλάκες πολυκαρβονικές – PC	εξοικονόμηση ενέργειας από μείωση απωλειών θερμότητας. Εγκλωβίζουν υγρασία και είναι πολύ ακριβές
Ακρυλικές πλάκες	μεγάλη διάρκεια ζωής με διατήρηση των ιδιοτήτων. Υψηλό κόστος προμήθειας, συμπίκνωση υδρατμών,

Πίνακας 2.3: Ιδιότητες υλικών κάλυψης θερμοκηπίων

2.4 Προσομοίωση

Ο τομέας της προστατευόμενης καλλιέργειας και ειδικότερα των θερμοκηπίων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην χρήση ΑΠΕ διότι παρέχει τεχνικές ελέγχου του μικροκλίματος που συμβάλλουν στην παραγωγή βέλτιστων αγροτικών προϊόντων με το ελάχιστο κόστος. Για αυτόν τον λόγο, μοντέλα προσομοίωσης των θερμικών και ψυκτικών φορτίων του θερμοκηπίου τυγχάνουν μεγάλης αναγνώρισης και η εφαρμογή τους από τον επιστημονικό κόσμο ολοένα και αυξάνεται [8].

Ο όρος «Μαθηματική μοντελοποίηση» αναφέρεται στην περιγραφή ενός πολύπλοκου συστήματος χρησιμοποιώντας μαθηματικά εργαλεία. Τα εργαλεία αυτά σχετίζονται με εξισώσεις, σελ αριθμών, αλγορίθμους, στοχαστικές διαδικασίες κ.α. [9].

Η προσομοίωση εμφανίζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Στα περισσότερα συστήματα, οι παράμετροι τους εξαρτώνται με σύνθετο τρόπο από πολλές άλλες παραμέτρους και μεταβάλλονται τυχαία με αποτέλεσμα η περιγραφή τους από κάποιο αναλυτικό μοντέλο να κρίνεται ανέφικτη.
- Διαφορετικά σενάρια λειτουργίας του συστήματος μπορούν να συγκριθούν μέσω της προσομοίωσης προκειμένου να ευρεθεί η βέλτιστη λύση.
- Η προσομοίωση καθιστά εφικτή την εξέταση ενός συστήματος ή φαινομένου με μακροχρόνια εξέλιξη, σε πιο σύντομο χρόνο.

Από την άλλη πλευρά, η προσομοίωση ως μέθοδος παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα:

- Η έξοδος του προγράμματος προσομοίωσης συνήθως αποτελείται από μεγάλο όγκο αριθμών με αποτέλεσμα να απαιτείται χρόνος για την κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος
- Απαιτούνται πολλές εκτελέσεις του μοντέλου για κάθε διαφορετικό σετ δεδομένων εισόδου του μοντέλου που χρειάζεται να εκτιμηθεί. Επομένως, η προσομοίωση εφαρμόζεται καλύτερα σε περιπτώσεις σύγκρισης εναλλακτικών σεναρίων σε σχέση με την βελτιστοποίηση.

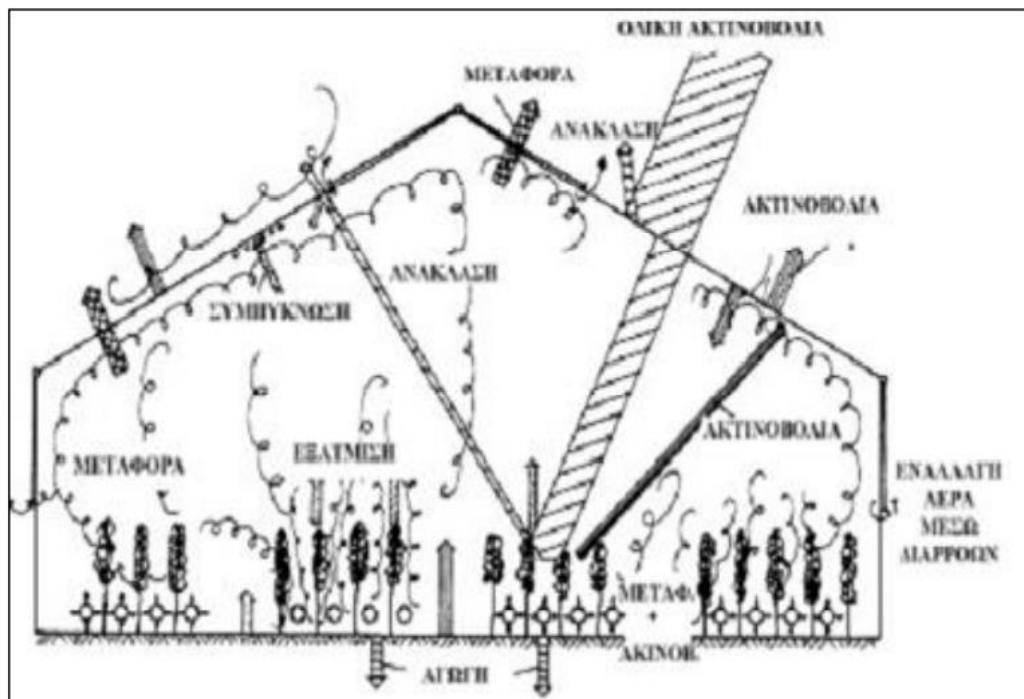
Τα μοντέλα προσομοίωσης του εσωτερικού περιβάλλοντος των θερμοκηπιακών καλλιεργειών διαιρούνται στις παρακάτω κατηγορίες [8], [9]:

- Εμπειρικά: προκύπτουν με λειτουργίες μεταφοράς που περιγράφουν σχέσεις μεταβλητών υποβοηθούμενες από τεχνικές πιστοποίησης, δίχως να εκτιμάται η φυσική κατάσταση του φαινομένου
- Αναλυτικά: προκύπτουν από την περιγραφή του ισοζυγίου ενέργειας και μάζας εντός του θερμοκηπίου και χρησιμοποιούνται κατά τη μελέτη φυσικών φαινομένων. Τα μοντέλα αυτά διαχωρίζονται σε στατικά ή δυναμικά ανάλογα με τη μεταβολή ως προς τον χρόνο και την ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας των συνιστωσών του συστήματος. Ο αριθμός των φυσικών διεργασιών που χρησιμοποιούνται από τα μοντέλα αυτά, τα κατατάσσει σε απλά ή σύνθετα
- Μοντέλα σταθερών συνθηκών: η ανάπτυξη τους αποσκοπεί στην περιγραφή της θερμικής συμπεριφοράς της εγκατάστασης ή στην ανάλυση της επιρροής των τεχνικών ελέγχου του περιβάλλοντος στο μικροκλίμα. Η συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνει λίγα δεδομένα εισόδου, είναι απλή και συνεπώς λιγότερο ακριβής. Παρόλα αυτά δύναται να οδηγήσει στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.
- Δυναμικά: εφαρμόζονται κατά την απόκριση του συστήματος για μικρό χρονικό διάστημα έχοντας ως προαπαιτούμενος την ακριβή διατύπωση των διαδικασιών μετάδοσης θερμότητας μεταξύ των στοιχείων που αλληλοεπιδρούν. Η δυναμική μοντελοποίηση των παραμέτρων οδηγεί σε ένα σύνολο μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξεως που επιδέχονται αριθμητική επίλυση. Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και μάζας εξαρτώνται από τις παραμέτρους του συστήματος και οφείλουν να είναι διατυπωμένες βάσει των σχετικών συνθηκών της κατάστασης που βρίσκεται το θερμοκήπιο. Η υψηλή πολυπλοκότητα αυτών των μοντέλων συχνά οδηγεί σε παραδοχές απλούστευσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ

3.1 Μηχανισμοί Μεταφοράς Θερμότητας Σε Θερμοκήπιο:

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται οι τρόποι μεταφοράς θερμότητας σε ένα θερμοκήπιο:



Εικόνα 2.1: μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας σε θερμοκήπιο [2]

- Ένα ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στο θερμοκήπιο χρησιμοποιείται για την φωτοσύνθεση, ενώ το υπόλοιπο απορροφάται από το έδαφος και τον φυτικό θόλο [2].
- Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του εξωτερικού αέρα και του υλικού κάλυψης [2].
- Μετάδοση θερμότητας μεταξύ του καλύμματος και του εσωτερικού αέρα [2].
- Μεταφορά θερμότητας από το έδαφος με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία προς όλες τις συνιστώσες του θερμοκηπίου [2].

- Ο φυτικός θόλος μεταφέρει θερμότητα μέσω ακτινοβολίας και με τη διαδικασία της διαπνοής [2].
- Το σύστημα θέρμανσης μεταφέρει θερμότητα προς το εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου [8].

3.2 Μαθηματική μοντελοποίηση θερμοκηπίου:

Το θερμικό περιβάλλον ενός θερμοκηπίου διαμορφώνεται από τις σχέσεις των ενεργειακών απολαβών και των ενεργειακών απωλειών που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του. Στα θερμικά κέρδη συμπεριλαμβάνονται η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και η προσδιδόμενη θερμότητα από κάποιο σύστημα θέρμανσης (εάν υφίσταται). Αντίθετα, οι θερμικές απώλειες αφορούν κυρίως i) απώλειες συνδυασμένης συναγωγής και αγωγής μέσω του καλύμματος, ii) απώλειες ακτινοβολίας, iii) απώλειες με αγωγή από το έδαφος και iv) απώλειες λόγω διαφυγής ή διείσδυσης αέρα μέσω ανοιγμάτων όπως πόρτες, παράθυρα και κατασκευαστικές ατέλειες στη δομή της κατασκευής [6], [18].

Σε συνθήκες σχεδιασμού χειμώνα, η εκτίμηση των θερμικών αναγκών του θερμοκηπίου κρίνεται απαραίτητη και προηγείται της εγκατάστασης ενός συστήματος θέρμανσης. Οι απαιτήσεις θέρμανσης υπολογίζονται με τη μεθοδολογία του ενεργειακού ισοζυγίου και είναι αναγκαίο να καλύπτουν τη διαφορά μεταξύ θερμικών απωλειών και απολαβών προκειμένου να διατηρηθεί μία ευνοϊκή θερμοκρασία για την ανάπτυξη του εκάστοτε φυτού στο εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου [3].

Το συνολικό θερμικό φορτίο για μια θερμοκηπιακή μονάδα δίνεται από τη σχέση:

$$Q_h = Q_l - Q_{sg} \quad (W) \quad (3.1)$$

Q_h : Ανάγκες θέρμανσης [W / m^2]

Q_l : Θερμικές απώλειες [W / m^2]

Q_{sg} : Θερμικά κέρδη ηλιακής ακτινοβολίας [W / m^2]

Από την παραπάνω σχέση καθίσταται εμφανής η αναγκαιότητα της μαθηματικής μοντελοποίησης και του υπολογισμού όλων των επιμέρους μορφών απωλειών (Q_l) και απολαβών (Q_g) για την εκτίμηση των απαιτήσεων θέρμανσης ενός θερμοκηπίου.

3.2.1 Θερμικές Απώλειες:

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι συνολικές θερμικές απώλειες που συντελούνται σε μία θερμοκηπιακή μονάδα, διαιρούνται σε πέντε κατηγορίες για τις οποίες ισχύει η ακόλουθη σχέση [5]:

$$Ql = Qco + Qv + Qs + Qgr + Qi \quad (W) \quad (3.2)$$

Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται αναλυτικά τα μέλη που αποτελούν την εξίσωση 3.2

Συμβολισμός	Ονομασία	Μονάδα μέτρησης
Ql	Θερμικές απώλειες	[W]
Qco	Απώλειες θερμότητας με αγωγή & συναγωγή από το κάλυμμα του θερμοκηπίου	[W]
Qv	Απώλειες θερμότητας λόγω αερισμού & ανοιγμάτων	[W]
Qs	Απώλειες θερμότητας με ακτινοβολία από το υλικό κάλυψης προς τον ουρανό	[W]
Qgr	Απώλειες θερμότητας με αγωγή στο έδαφος	[W]
Qi	Απώλειες θερμότητας με ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος από το έδαφος & τον φυτικό θόλο	[W]

3.2.1.1 Θερμικές Απώλειες Από το Κάλυμμα:

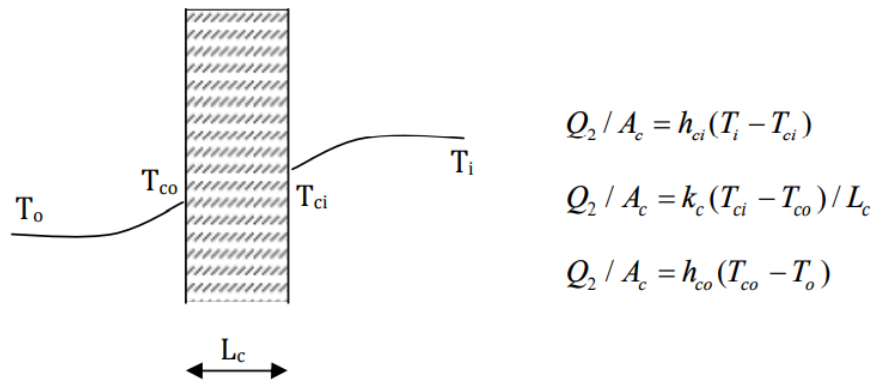
Τα υλικά κάλυψης που χρησιμοποιούνται συνήθως στα θερμοκήπια (γυαλί ή πλαστικό) ανταλλάσσουν θερμότητα με τον εξωτερικό αέρα έχοντας ως κινητήριο δύναμη την θερμοκρασιακή διαφορά που επικρατεί εντός και εκτός της εγκατάστασης. Συνεπώς όταν εξωτερικά επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες, υφίστανται μεγάλες απώλειες θερμότητας διαμέσου του καλύμματος οι οποίες υπολογίζονται ως εξής:

$$Q_{co} = UAc(T_{min} - T_o) \quad (W) \quad (3.3)$$

Στον ακόλουθο πίνακα επεξηγείται η σημασία όλων των συνιστωσών της παραπάνω εξίσωσης.

Συμβολισμός	Περιγραφή	Μονάδα μέτρησης
U	Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του υλικού κάλυψης	[W m ⁻² K ⁻¹]
Ac	Το εμβαδόν του υλικού κάλυψης	[m ²]
T _{min}	Ελάχιστη θερμοκρασία σχεδιασμού της καλλιέργειας σε χειμερινές συνθήκες	[K]
T _o	Θερμοκρασία εξωτερικού αέρα	[K]

Ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας υπολογίζεται με ανάλυση του θερμικού κυκλώματος του υλικού κάλυψης σύμφωνα με την παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.2: Θερμικές Αντιστάσεις Καλύμματος [5]

Σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή από τον αέρα του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου προς την εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος είναι ίσος με τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας με αγωγή διαμέσου του καλύμματος και με τον ρυθμό μεταφοράς με συναγωγή από την εξωτερική επιφάνεια του υλικού κάλυψης προς τον αέρα του περιβάλλοντος [5].

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας (U) αναπαριστά τη θερμότητα που μεταδίδεται με αγωγή και συναγωγή από μια επιφάνεια 1 m^2 , σε ένα δευτερόλεπτο, όταν στις δύο ακμές της επιφάνειας επικρατεί διαφορά θερμοκρασίας 1 K . Η τιμή του U εξαρτάται από τις εξωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος (ταχύτητα ανέμου) καθώς και από το πάχος και την αγωγιμότητα του υλικού κάλυψης της εγκατάστασης [5].

Συνδυάζοντας τα παραπάνω είναι δυνατό να υπολογιστεί το U ως εξής:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} + \frac{d}{k}} \quad [\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}] \quad (3.4)$$

$\frac{1}{h_i} = \text{Ri}$: η αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή από τον αέρα του θερμοκηπίου προς την εσωτερική πλευρά του υλικού κάλυψης. $[\text{m}^2 \text{ K} / \text{W}]$

$\frac{d}{k} = \text{Rc}$: η αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας με αγωγή διαμέσου του υλικού κάλυψης. $[\text{m}^2 \text{ K} / \text{W}]$

$\frac{1}{h_o} = R_o$: η αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή από την εξωτερική επιφάνεια του καλύμματος προς τον αέρα του περιβάλλοντος. [$\text{m}^2 \text{ K} / \text{W}$]

Με τον τύπο (3.4) είναι εύκολος ο υπολογισμός του U και συνεπώς ο υπολογισμός των απωλειών θερμότητας από το περίβλημα διότι έχουν απαλειφθεί οι άγνωστες θερμοκρασίες του υλικού κάλυψης. Αυτό συμβαίνει διότι οι αντιστάσεις R_i , R_c , R_o είναι συνδεδεμένες σε σειρά επομένως διαρρέονται από τον ίδιο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας [1].

3.2.1.2 Θερμικές Απώλειες από το έδαφος:

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας προς το έδαφος σε ένα θερμοκήπιο δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Q_{gr} = U_g A_g (T_{min} - T_o) \quad (\text{W}) \quad (3.5)$$

Στον παρακάτω πίνακα αναλύονται τα στοιχεία που απαρτίζουν την εξίσωση 3.5

Συμβολισμός	Περιγραφή	Μονάδα μέτρησης
U_g	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για ένα σύνθετο γεωργικό έδαφος, λαμβάνεται ίσος με 1.85 [5]	$[\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}]$
A_g	Επιφάνεια εδάφους, θεωρείται ίση με την καλλιεργήσιμη έκταση	$[\text{m}^2]$
T_{min}	Θερμοκρασία εσωτερικού αέρα θερμοκηπίου	$[\text{K}]$
T_o	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	$[\text{K}]$

Στην πραγματικότητα η θερμοκρασιακή διαφορά ΔT αναφέρεται στην θερμοκρασία εδάφους – υπεδάφους, όμως επειδή αυτές είναι δύσκολο να

προσδιοριστούν, στην πράξη επιλέγονται οι θερμοκρασίες του αέρα του θερμοκηπίου και του περιβάλλοντος [2], [5].

3.2.1.3 Απώλειες θερμότητας από το κάλυμμα λόγω ακτινοβολίας:

Μεταφορά θερμότητας από το κάλυμμα προς τον ουράνιο θόλο λόγω ακτινοβολίας. Αποτελούν σημαντικό ποσοστό ενεργειακών απωλειών ιδίως τις ηλιόλουστες ημέρες και υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$Q_s = \sigma A \varepsilon (T_{min}^4 - T_{sky}^4) \quad (W) \quad (3.6)$$

Ακολούθως, γίνεται αναλυτική αναφορά στα στοιχεία που απαρτίζουν την παραπάνω σχέση.

Συμβολισμός	Περιγραφή	Μονάδα μέτρησης
σ	σταθερά Stefan-Boltzmann, $5.67 \cdot 10^{-8}$	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$
A	επιφάνεια του υλικού κάλυψης του θερμοκηπίου	$[m^2]$
ε	συντελεστής εκπομπής του καλύμματος	αδιάστατο
T_{min}	θερμοκρασία αέρα θερμοκηπίου	$[K]$
T_{sky}	θερμοκρασία ουρανού	$[K]$

3.2.1.4 Απώλειες θερμότητας λόγω αερισμού:

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αυτές οι απώλειες οφείλονται σε διαφυγή ή διείσδυση αέρα μέσω ανοιγμάτων ή κατασκευαστικών αστοχιών του θερμοκηπίου και δίνονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$Q_v = \rho \cdot c_p \cdot \frac{ACH}{3600} (height \cdot width \cdot length) (T_{min} - T_o) \quad (W) \quad (3.7)$$

Στον παρακάτω πίνακα γίνεται αναλυτική επεξήγηση των στοιχείων που αποτελούν την εξίσωση 3.7

Συμβολισμός	Περιγραφή	Μονάδα μέτρησης
ρ	πυκνότητα του αέρα, 1.051	$[\frac{kg}{m^3}]$
c_p	θερμοχωρητικότητα του αέρα	$[\frac{J}{kg K}]$
ACH	εναλλαγές αέρα ανά ώρα	$[\frac{1}{h}]$
height	ύψος θερμοκηπίου	[m]
width	πλάτος θερμοκηπίου	[m]
length	μήκος θερμοκηπίου	[m]
Tmin	θερμοκρασία εσωτερικού αέρα θερμοκηπίου	[K]
To	θερμοκρασία περιβάλλοντος	[K]

3.2.1.5 Απώλειες θερμότητας λόγω ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος:

Ο συγκεκριμένος τύπος απωλειών αναφέρεται στη θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που εκπέμπεται από το έδαφος και τον φυτικό θόλο. Στην περίπτωση που το υλικό κάλυψης του θερμοκηπίου είναι γυαλί, τότε αυτή η απώλεια δεν υφίσταται διότι το γυαλί είναι πρακτικά αδιαπέραστο στην υψηλού μήκους κύματος υπέρυθρη και θερμική ακτινοβολία (φαινόμενο του θερμοκηπίου) [1], [18].

Για πλαστικό κάλυμμα αυτές οι ενεργειακές απώλειες υπολογίζονται από τον τύπο:

$$Q_i = e \sigma A_g (T_{min}^4 - T_{sky}^4) \tau_{in} \quad (W) \quad (3.8)$$

Παρακάτω απεικονίζονται αναλυτικά οι συνιστώσες της εξίσωσης.

Συμβολισμός	Περιγραφή	Μονάδα μέτρησης
e	συντελεστής εκπομπής φυτικού θόλου και εδάφους, 0.31	αδιάστατο
σ	σταθερά Stefan- Boltzmann, $5.67 \cdot 10^{-8}$	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$
A_g	εμβαδόν θερμοκηπίου	$[m^2]$
T_{sky}	Θερμοκρασία ουρανού	$[K]$
τ_{in}	ο συντελεστής διαπερατότητας του διαφανούς καλύμματος στην ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος	αδιάστατο

3.2.2 Θερμικά κέρδη ηλιακής ακτινοβολίας:

Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στην θέρμανση του θερμοκηπίου μοντελοποιείται ως εξής:

$$Q_{sg} = t A_c S_j \quad (W) \quad (3.9)$$

Στον επόμενο πίνακα πραγματοποιείται η αποσαφήνιση κάθε στοιχείου που απαρτίζει την εξίσωση 3.9

Συμβολισμός	Περιγραφή	Μονάδα μέτρησης
t	η διαπερατότητα του καλύμματος στην ηλιακή ακτινοβολία, [0, 1]	αδιάστατο
Ac	η επιφάνεια του καλύμματος	[m ²]
Sj	η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο	[$\frac{W}{m^2}$]

Η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται αρχικά από τις διάφορες συνιστώσες του θερμοκηπιακής καλλιέργειας όπως τα φυτά, το έδαφος, το υλικό κάλυψης κ.α. και έπειτα μεταφέρεται στον εσωτερικό αέρα με αποτέλεσμα τη θέρμανση του [8].

Ένα σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η ηλιακή ακτινοβολία δρα υποστηρικτικά ως προς την εξοικονόμηση πόρων για θέρμανση του θερμοκηπίου και αυτό διότι μειώνει το συνολικό απαιτούμενο θερμικό φορτίο [6], [7].

3.2.3 Απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο:

Ο σχεδιασμός ενός θερμοκηπίου ειδικά σε χώρες με θερμά καλοκαίρια όπως η Ελλάδα έχει ως βασική προϋπόθεση τη δυνατότητα ποσοτικής εκτίμησης των ψυκτικών αναγκών του. Οι απαιτήσεις ψύξης αποτελούν συνάρτηση πολλών διαφορετικών παραγόντων όπως η περιοχή εγκατάστασης του θερμοκηπίου, το καλλιεργούμενο φυτό και άλλα. Για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιούνται οι παραπάνω σχέσεις με χρήση όμως μιας μέγιστης απαιτούμενης θερμοκρασίας σχεδιασμού (**Tmax**) η οποία εξαρτάται από την εκάστοτε καλλιέργεια και για εξωτερικές συνθήκες πάνω από αυτήν απαιτείται ψύξη του θερμοκηπίου.. Το συνολικό ψυκτικό φορτίο προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$Q_c = Q_{co} + Q_i + Q_{gr} + Q_{sg} \quad (W) \quad (3.10)$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας Q_{sg} αυξάνει τις ανάγκες ψύξης [6], [7].

3.2.4 Παραδοχές μοντελοποίησης:

Κατά την διαδικασία της μαθηματικής μοντελοποίησης του θερμοκηπίου αγνοήθηκαν μερικοί μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας οι οποίοι εισάγουν απώλειες στο σύστημα ενώ έγιναν και ορισμένες απλουστεύσεις.

1. Στην πραγματικότητα η θερμοκρασία ουρανού (T_{sky}) διαφέρει από την θερμοκρασία του αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος (T_o) και εκτιμάται μέσω ενός οργάνου που αποκαλείται πυργεόμετρο [2]. Παρόλα αυτά, έπειτα από αναζήτηση σε έγκυρη βιβλιογραφία [16], προκύπτει ότι οι δύο παραπάνω θερμοκρασίες εμφανίζουν υψηλό συντελεστή συσχέτισης ενώ έχουν προταθεί διάφορες σχέσεις έκφρασης της θερμοκρασίας ουρανού (T_{sky}) συναρτήσει της θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος (T_o).

$$- T_{sky} = T_o \quad (3.11)$$

$$- T_{sky} = 0.0552 T_o^{1.5} \quad (3.12)$$

$$- T_{sky} = T_o^4 (1 - 0.261 \exp(-7.77 \cdot 10^{-4})(T_o - 273)^4) \quad (3.13)$$

Στο μοντέλο μας επιλέχθηκε η πρώτη σχέση η οποία οδηγεί σε μια πιο μετριοπαθή εκτίμηση των απωλειών σε αντίθεση με τις σχέσεις (3.12), (3.13).



Εικόνα 3.3: Ερευνητικό πυργεόμετρο [16]

2. Η ύπαρξη πολλών συσκευών, μηχανών και ανθρώπων εντός του θερμοκηπίου είναι σπάνιο φαινόμενο επομένως η μεταφερόμενη θερμότητα θεωρείται αμελητέα.

3. Οι ενεργειακές απώλειες λόγω διαπνοής και φωτοσύνθεσης των φυτών αποτελούν πολύ μικρό ποσοστό των συνολικών ενεργειακών απωλειών του ενεργειακού ισοζυγίου και συνήθως αμελούνται. Συγκεκριμένα σε νυχτερινές συνθήκες τα στόματα των καλλιεργούμενων φυτών είναι κλειστά εμφανίζοντας πρακτικά μηδενική διαπνοή.

4. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου είναι ομοιόμορφα κατανομημένη, επομένως η θερμοκρασία του αέρα ισούται με τη θερμοκρασία των φυτών.

5. Η ροή θερμότητας θεωρείται μονοδιάστατη χάριν ευκολίας της ανάλυσης παρότι στην πραγματικότητα η θερμότητα διαχέεται και προς τις τρεις κατευθύνσεις.

6. Κατά τον υπολογισμό της έκτασης του θερμοκηπίου γίνεται η παραδοχή πως υπάρχουν φυτά σε όλη την εγκατάσταση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

4.1 Εισαγωγή:

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάπτυξη και η υλοποίηση του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του θερμικού και ψυκτικού φορτίου διαφόρων θερμοκηπιακών καλλιιεργειών. Ο προγραμματισμός της εφαρμογής έλαβε χώρα σε περιβάλλον Python. Ως βήμα ολοκλήρωσης του μοντέλου επιλέχθηκε η ώρα και η προσομοίωση έγινε για τις 8760 ώρες ενός ημερολογιακού έτους.

4.2 Βήματα Εφαρμογής:

- Βήμα 1^ο: Η εφαρμογή ζητάει από τον χρήστη να εισάγει ορισμένα γνωστά σε αυτόν δεδομένα όπως η τοποθεσία (κλιματική ζώνη), το επιθυμητό καλλιεργούμενο φυτό, το υλικό κάλυψης θερμοκηπίου καθώς και γεωμετρικά – δομικά χαρακτηριστικά.

Τοποθεσία
Υλικό κάλυψης, (Γυαλί ή Πολυαιθυλένιο), glass, PE
Καλλιεργούμενο φυτό
Μήκος θερμοκηπίου, length (m)
Πλάτος θερμοκηπίου, width (m)
Ύψος θερμοκηπίου, height (m)
Μήκος πόρτας, l_door (m)
Ύψος πόρτας, h_door (m)
Αριθμός παραθύρων, No_window
Μήκος παραθύρου, l_window (m)
Ύψος παραθύρου, h_window (m)

Πίνακας 4.1: Εισαγωγή δεδομένων από τον χρήστη

- Βήμα 2^ο: Η εφαρμογή εισάγει επιπλέον δεδομένα τα οποία αντλούνται μέσα από μία βάση δεδομένων στο excel και αποτελούν συνάρτηση των επιλογών

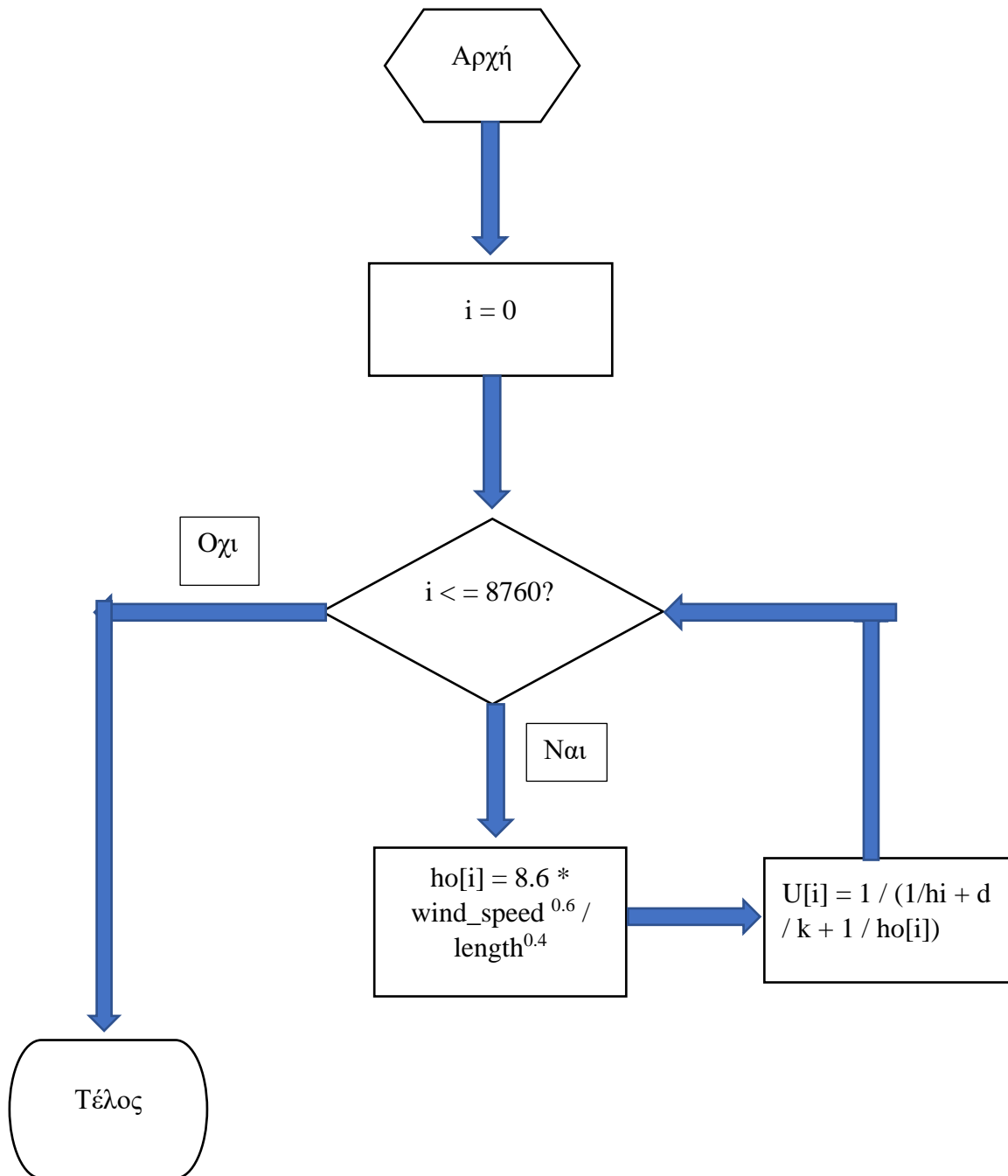
που πραγματοποιήθηκαν από τον χρήστη στο προηγούμενο βήμα. Αυτά τα δεδομένα αφορούν κλιματολογικά, τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά και συνεπώς δεν απαιτείται γνώση τους από τον χρήστη του προγράμματος πλην όμως είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό των ενεργειακών αναγκών του θερμοκηπίου.

time	Διάνυσμα με τις ημερομηνίες και τις ώρες ενός έτους (2019)
temp [°C]	Διάνυσμα ωριαίων θερμοκρασιών εξωτερικού αέρα
rad [W/ m ²]	Διάνυσμα ωριαίων τιμών της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο
wind_speed [m / s]	Διάνυσμα ωριαίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου
min [K]	Ελάχιστη απαιτούμενη θερμοκρασία ανάπτυξης καλλιέργειας
max [K]	Μέγιστη απαιτούμενη θερμοκρασία ανάπτυξης καλλιέργειας
hi [W / (m ² K)]	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή του εσωτερικού αέρα
d [m]	Πάχος υλικού κάλυψης
k [W / (m K)]	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας καλύμματος
e	Συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας καλύμματος
τ	Συντελεστής διαπερατότητας ακτινοβολίας του καλύμματος

τ_{pe}	Συντελεστής διαπερατότητας στην ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (για πολυαιθυλένιο)
$U_{ground} [W / (m^2 K)]$	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας εδάφους
$ACH [1 / h]$	Εναλλαγές αέρα ανά ώρα
$\rho_{air} [kg / m^3]$	Πυκνότητα αέρα
$c_{p_air} [J / (kg K)]$	Ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα
$A_{ground} (m^2)$	Έκταση θερμοκηπίου
$A_{cov} (m^2)$	Εμβαδόν καλύμματος
$A_{wall} (m^2)$	Εμβαδόν τοιχωμάτων
$A_{ceiling} (m^2)$	Εμβαδόν οροφής
$V_{base} (m^3)$	Όγκος βάσης
$V_{ceiling} (m^3)$	Όγκος οροφής
$V_{total} (m^3)$	Συνολικός όγκος θερμοκηπίου

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά βάσης δεδομένων

- Βήμα 3^ο: Υπολογίζονται επαναληπτικά για κάθε ώρα ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή του εξωτερικού αέρα (h_o) καθώς και ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του καλύμματος (U). Παρακάτω απεικονίζεται η διαδικασία υπολογισμού αυτών των δύο μεγεθών με τη βοήθεια ενός διαγράμματος ροής.



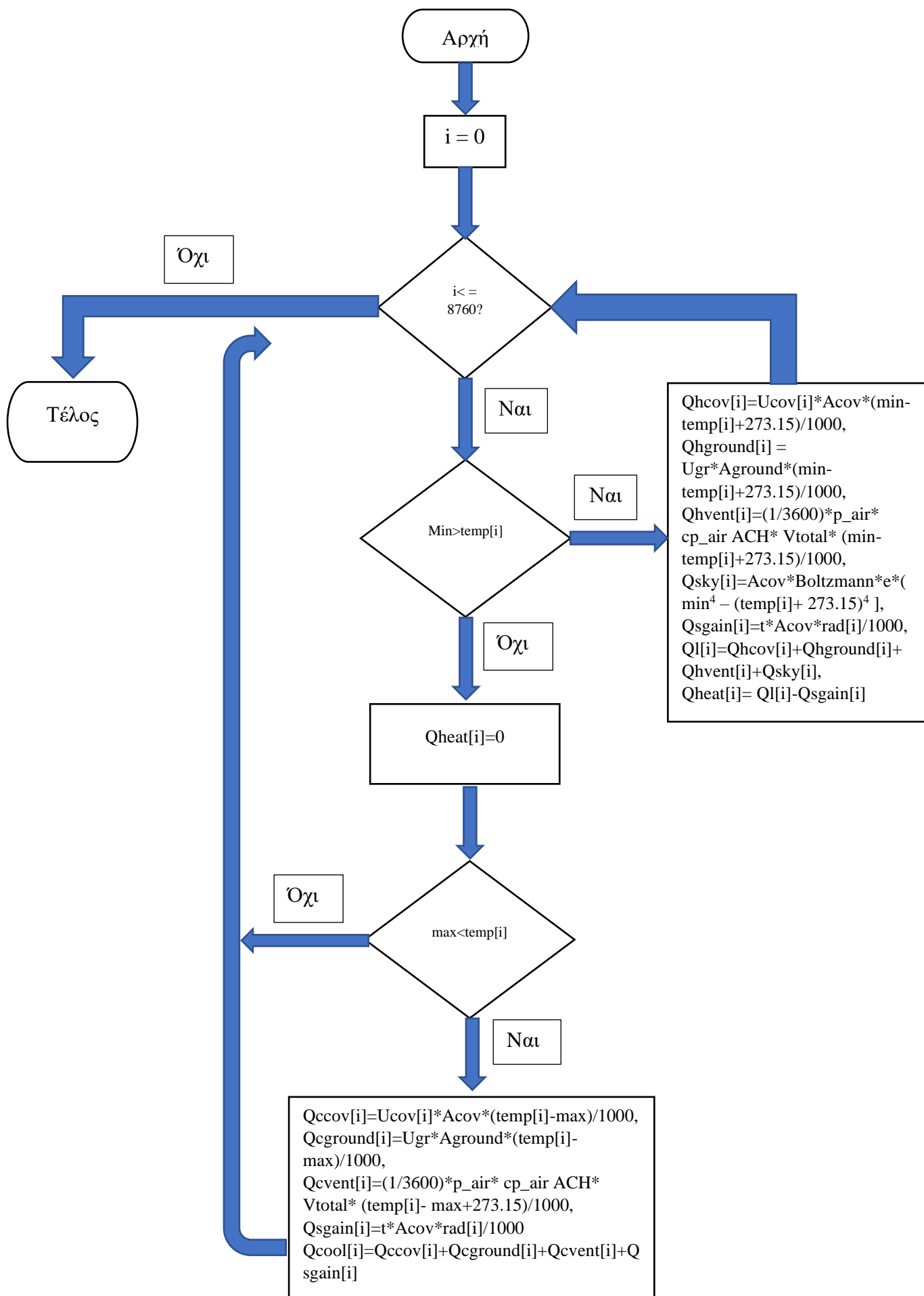
Διάγραμμα 4.1: Διάγραμμα ροής h_o , U

- Βήμα 4^ο: Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που εισήχθησαν στα βήματα 1, 2 και σε συνδυασμό με το μαθηματικό μοντέλο του προηγούμενου κεφαλαίου υπολογίζονται οι ωριαίες θερμικές και ψυκτικές απώλειες του θερμοκηπίου. Αν η ελάχιστη θερμοκρασία σχεδιασμού καλλιέργειας υπερέρχει της ωριαίας εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος, τότε εκτιμώνται οι θερμικές

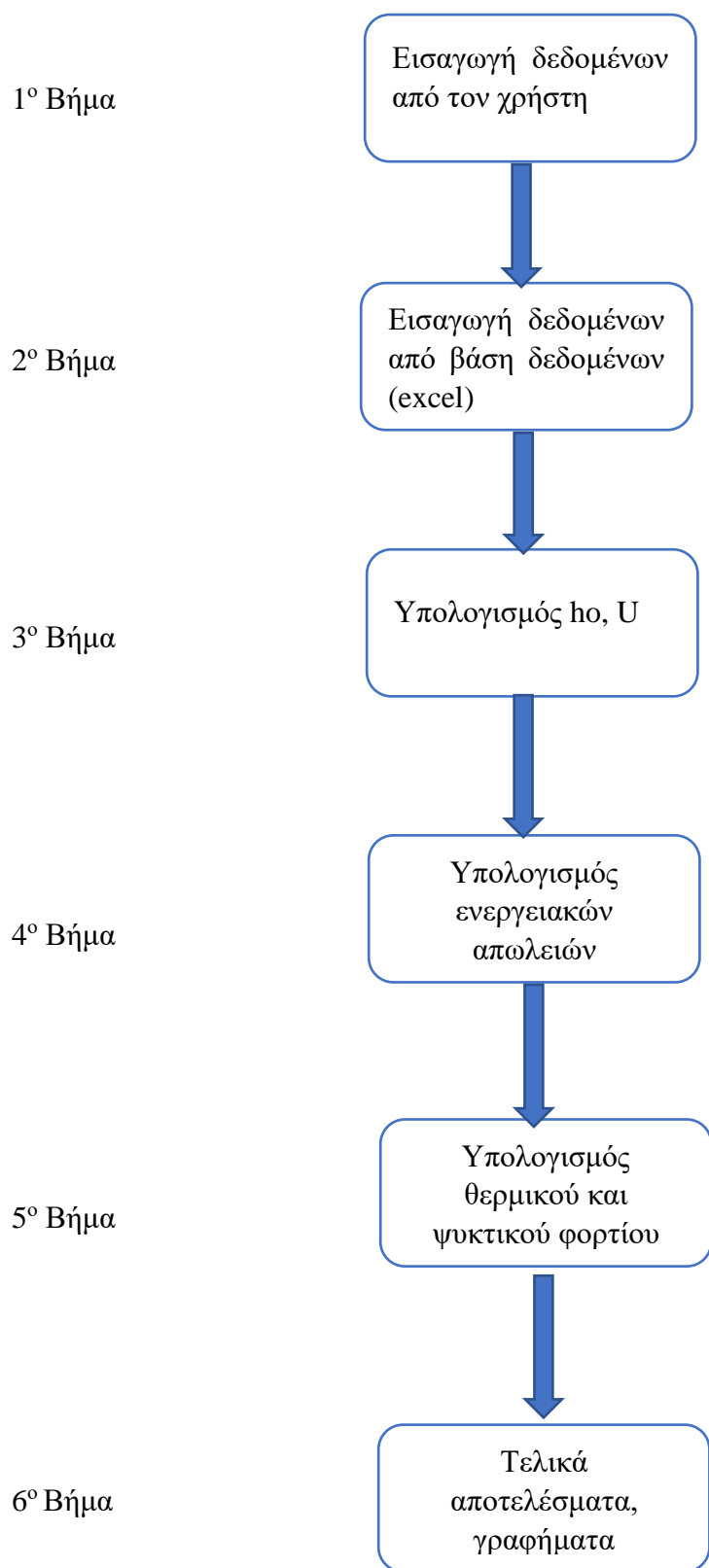
απώλειες, διαφορετικά αν η μέγιστη απαιτούμενη θερμοκρασία του φυτού είναι μικρότερη της εξωτερικής θερμοκρασίας, τότε υπολογίζονται οι απώλειες ψύξης. Για ενδιάμεσες θερμοκρασίες περιβάλλοντος το μοντέλο δεν υπολογίζει καμία απώλεια.

- Βήμα 5^ο : Με χρήση της μεθόδου του ενεργειακού ισοζυγίου που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο καθώς και του βήματος 4 ο αλγόριθμος παράγει ως έξοδο το ωριαίο θερμικό και ψυκτικό φορτίο του θερμοκηπίου σε kwh. Τα βήματα 4 και 5 απεικονίζονται αναλυτικά στο διάγραμμα 2.
- Βήμα 6^ο : Στη βάση των υπολογισμών του μοντέλου γίνονται περαιτέρω αναλύσεις και γραφήματα

Όλα τα βήματα του αλγορίθμου εμφανίζονται συνοπτικά και στο διάγραμμα 3.



Διάγραμμα 4.2: Θερμικό & Ψυκτικό φορτίο



Διάγραμμα 4.3:Βήματα Εφαρμογής

Qheat: [[1.28134765]	Qcool: [[0.]
[1.78079577]	[0.]
[2.10668662]	[0.]
[2.27051277]	[0.]
[2.1929114]	[0.]
[1.67547504]	[0.]
[0.]	[0.]
[0.]	[0.]
[0.]	[0.]
[0.]	[0.]
[0.]	[0.]
[0.]	[0.]
[0.]	[0.]
[0.]	[0.]
[0.]	[0.]
[3.06934189]	[0.]
[3.27785735]	[0.]
[3.44304082]	[0.]
[3.61070449]	[0.]
[3.72905347]	[0.]
[3.87102461]	[0.]
[4.07147664]	[0.]
[4.25582845]	[0.]
[4.41723556]]	[0.]]

Εικόνα 4.1: Έξοδος προγράμματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

5.1 Εφαρμογή:

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή του αλγορίθμου μελετώντας τη συμπεριφορά ενός θερμοκηπίου με συγκεκριμένα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά για διάφορες κλιματικές ζώνες της χώρας.

5.1.1 Χανιά:

Αρχικά γίνεται εκτίμηση των ενεργειακών απαιτήσεων ενός αμφίρριχτου απλού θερμοκηπίου στα Χανιά με καλλιεργούμενο φυτό την τομάτα η οποία αποτελεί το πιο σύνηθες προϊόν των ελληνικών θερμοκηπιακών καλλιεργειών. Τα κλιματολογικά δεδομένα αντλήθηκαν από έγκυρο site στο διαδίκτυο [34]. Τα δεδομένα εισόδου του χρήστη απεικονίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Γεωγραφική Τοποθεσία	Χανιά
Καλλιέργεια	Τομάτα
Υλικό Κάλυψης	Γυαλί
Σχήμα	Αμφίρρικτο
Πλάτος	10 m
Μήκος	15 m
Ύψος Υδρορροής	3 m
Ύψος Κορφιά	4,5 m
Αριθμός Παραθύρων	2
Ύψος Παραθύρου	1.5 m
Μήκος παραθύρου	1 m
Ύψος Πόρτας	3 m
Μήκος Πόρτας	0,8 m

Πίνακας 5.1: Κατασκευαστικά & Λειτουργικά Χαρακτηριστικά

Ως έξοδος, ο αλγόριθμος υπολόγισε τα ωριαία θερμικά και ψυκτικά φορτία τα οποία έπειτα δύνανται να αναχθούν και σε μηνιαία βάση για την εξαγωγή καλύτερων συμπερασμάτων. Κατά αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται το σύνηθες σφάλμα που

υπεισέρχεται στις αναλύσεις όταν στα μοντέλα χρησιμοποιούνται μέσες τιμές θερμοκρασιών για την εκτίμηση των ενεργειακών απαιτήσεων. Στον παρακάτω πίνακα αναπαρίστανται οι ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση και ψύξη.

Μήνας	Q _{heat} (kwh)	Q _{cool} (kwh)
Ιανουάριος	1852,23	0
Φεβρουάριος	1618,107	0
Μάρτιος	801,66	0
Απρίλιος	202,702	0
Μάιος	0,1596	0
Ιούνιος	0	12248,73
Ιούλιος	0	23543
Αύγουστος	0	23589,3
Σεπτέμβριος	0	3712,81
Οκτώβριος	0	315,57
Νοέμβριος	0	0
Δεκέμβριος	466,537	0

Πίνακας 5.2: Έξοδος προγράμματος, Χανιά

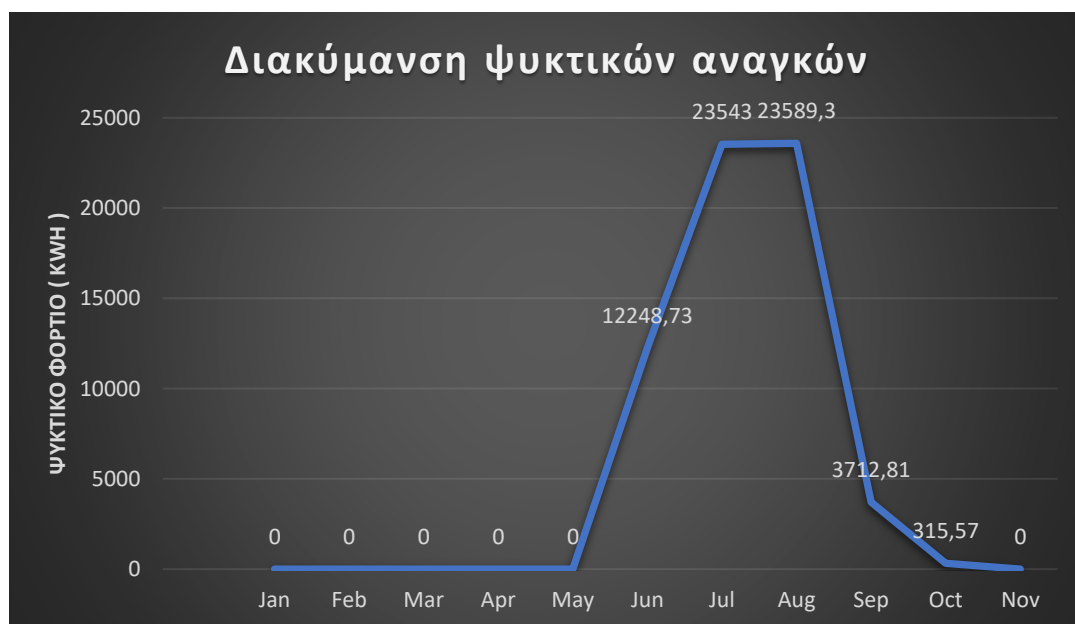
Από την έξοδο του προγράμματος γίνεται αντιληπτό ότι το θερμοκήπιο με τις συγκεκριμένες προδιαγραφές χρειάζεται θέρμανση από τον Ιανουάριο έως το Μάιο καθώς και το Δεκέμβριο. Οι μεγαλύτερες θερμικές ανάγκες προκύπτουν τον Ιανουάριο (1852,23 kwh) ενώ το Μάιο είναι σχεδόν μηδενικές (0,1596 kwh). Ως προς τις ψυκτικές ανάγκες, αυτές εντοπίζονται το χρονικό διάστημα Ιουνίου- Οκτωβρίου με μέγιστο (23589,3 kwh) και ελάχιστο (315,57 kwh) ψυκτικό φορτίο τον Αύγουστο και τον Οκτώβριο αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα, το θερμικό φορτίο εμφανίζει μέγιστο το μήνα Ιανουάριο και φθίνει γραμμικά όσο πλησιάζει το καλοκαίρι εμφανίζοντας τρεις διαφορετικές κλίσεις στα διαστήματα: α) Ιανουαρίου - Φεβρουαρίου, β) Φεβρουαρίου - Απριλίου, γ) Απριλίου – Μαΐου. Ο μεγαλύτερος ρυθμός μείωσης εντοπίζεται μεταξύ Φεβρουαρίου και Απριλίου. Γραμμική αύξηση των θερμικών αναγκών παρατηρείται μόνο από το Νοέμβριο προς τον Δεκέμβριο και δικαιολογείται από τις χαμηλές τιμές θερμοκρασιών που επικρατούν στα Χανιά. Όσον αφορά το ψυκτικό φορτίο, αυξάνεται

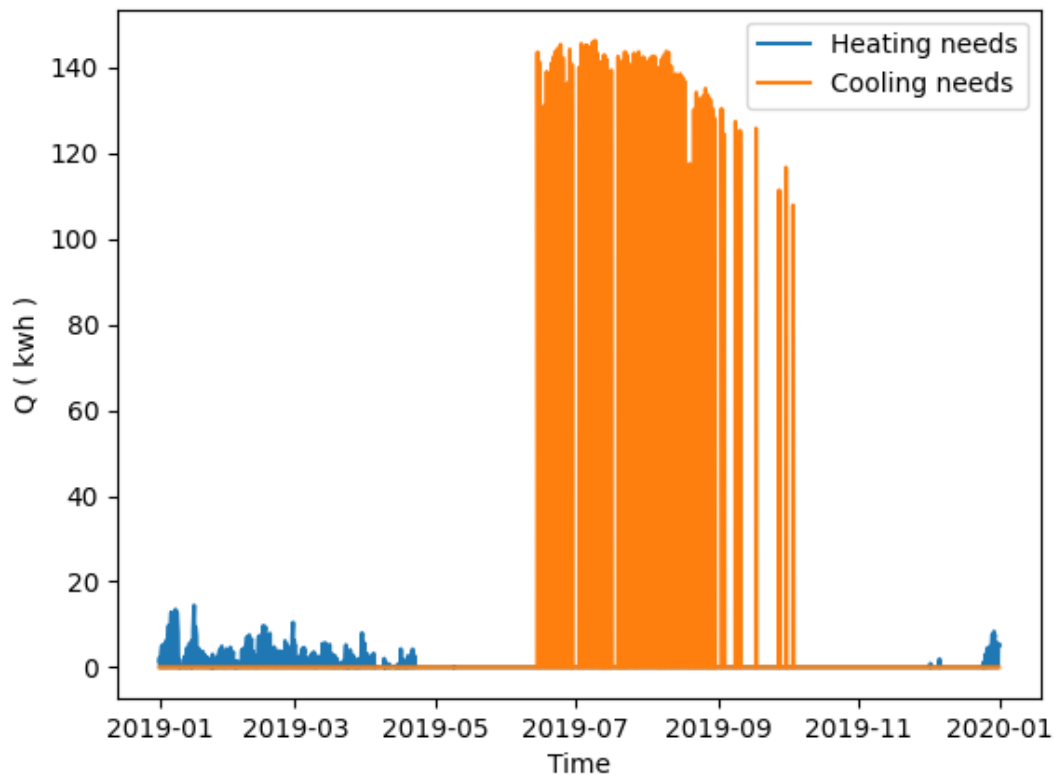
γραμμικά μεταξύ Μαΐου – Ιουλίου, διατηρείται πρακτικά σταθερό λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή στο διάστημα Ιουλίου- Αυγούστου και στη συνέχεια μειώνεται γραμμικά έως ότου μηδενιστεί στα τέλη Οκτωβρίου.



Διάγραμμα 5.1: Μηνιαίες Θερμικές Ανάγκες καλλιέργειας τομάτας, Χανιά

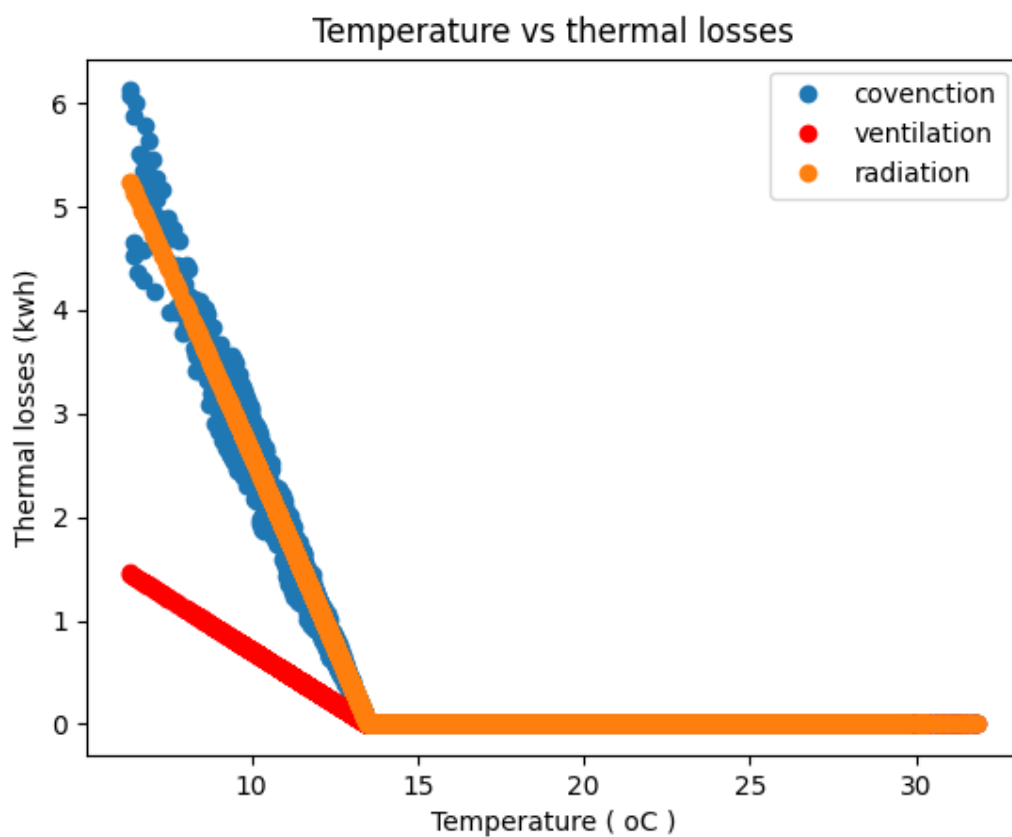


Διάγραμμα 5.2: Μεταβολή ψυκτικών αναγκών, Χανιά

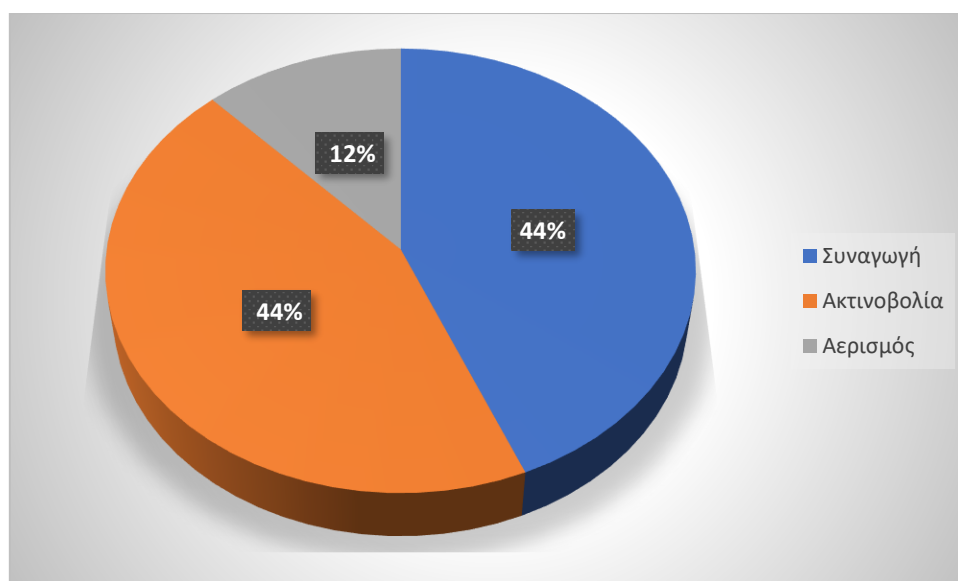


Διάγραμμα 5.3: Ωριαίες θερμικές & ψυκτικές ανάγκες, Χανιά

Όπως απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα, τα τρία κυριότερα είδη θερμικών απωλειών του θερμοκηπίου (συναγωγή, ακτινοβολία, αερισμός) μεταβάλλονται με την θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα για θερμοκρασίες μικρότερες της θερμοκρασίας σχεδιασμού της τομάτας παρατηρείται γραμμική μείωση των ωριαίων θερμικών απωλειών. Από την θερμοκρασία θερμικής άνεσης και μετά οι απώλειες θερμότητας μηδενίζονται. Επιπρόσθετα, στο διάγραμμα «πίτα» διαφαίνεται ότι οι κύριες συνιστώσες απωλειών είναι η συναγωγή (44%) και η ακτινοβολία (44%) σε αντίθεση με τις θερμικές απώλειες λόγω αερισμού οι οποίες αποτελούν το μικρότερο κομμάτι (12%).

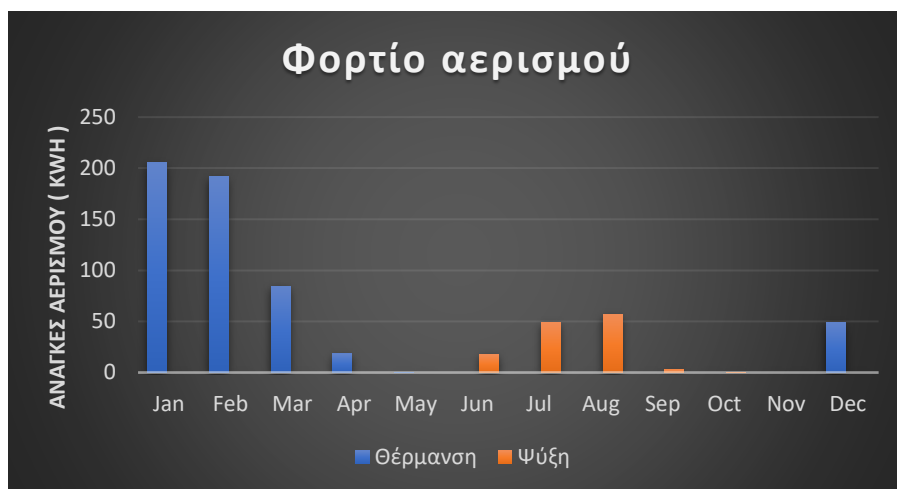


Διάγραμμα 5.4: Επίδραση της εξωτερικής θερμοκρασίας στις προβλεπόμενες ενεργειακές απώλειες



Διάγραμμα 5.5: Κατανομή θερμικών απωλειών, Χανιά

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται το φορτίο αερισμού για θέρμανση και ψύξη της εγκατάστασης.

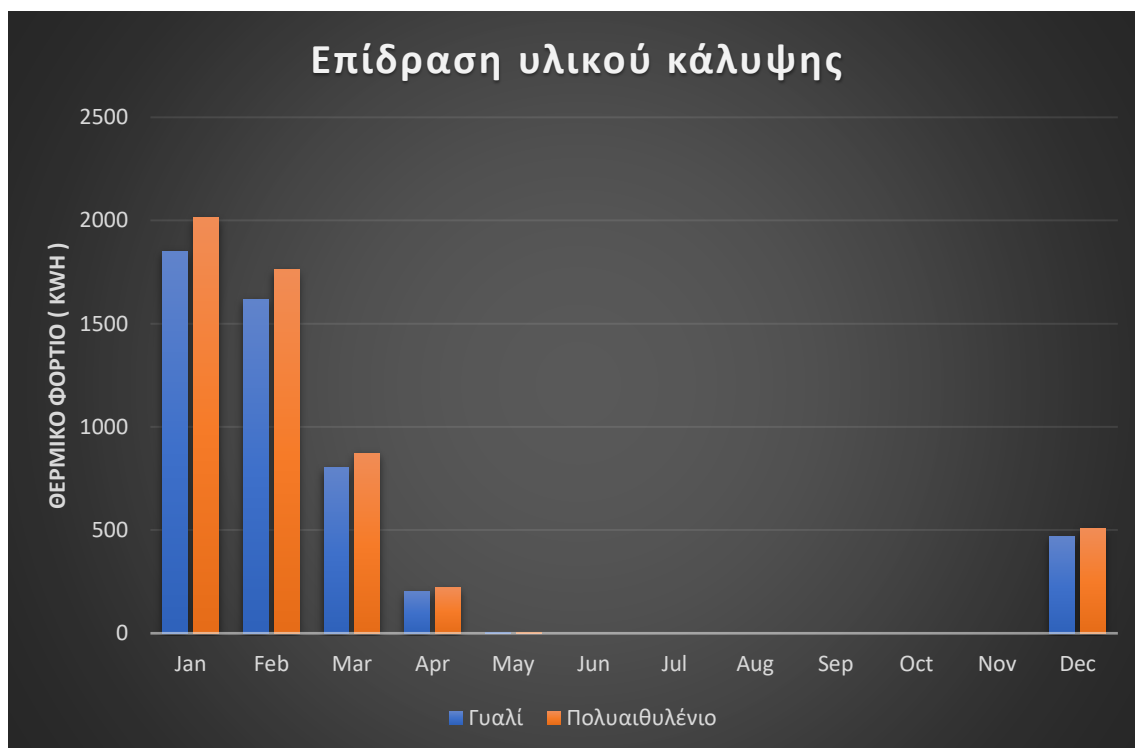


Διάγραμμα 5.6: Φορτίο αερισμού για θέρμανση & ψύξη, Χανιά

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξάρτηση των ενεργειακών φορτίων από τα πλέον χρησιμοποιούμενα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων, το γυαλί ή το πολυαιθυλένιο. Όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα, η χρησιμοποίηση πολυαιθυλενίου αυξάνει τις θερμικές απώλειες της εγκατάστασης κατά 8,64% κατά μέσο όρο. Αυτό οφείλεται κυρίως, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, στο γεγονός ότι το PE εμφανίζει υψηλό ποσοστό διαπερατότητας στη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία εν αντιθέσει με το γυαλί το οποίο είναι πρακτικά αδιαπέραστο σε αυτού του είδους την ακτινοβολία. Αυτή η αύξηση απεικονίζεται και στο διάγραμμα 10.

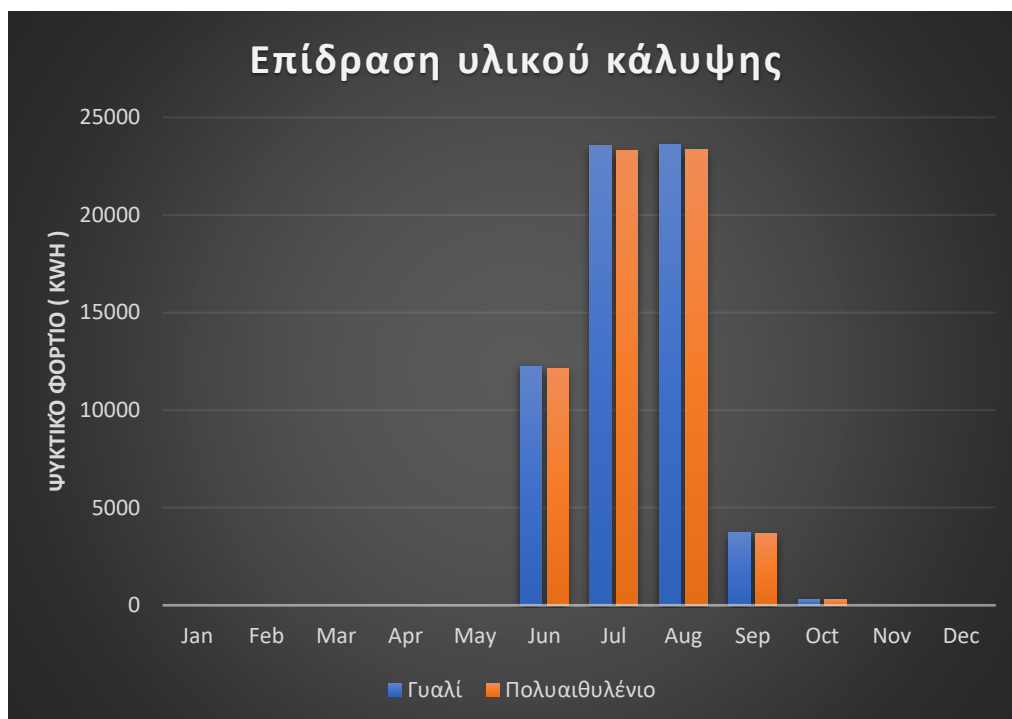
	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Γυαλί	1852,23	1618,107	801,66	202,702	0,1596	0	0	0	0	0	0	466,537
PE	2012,93	1761,24	872,32	219,97	0,173	0	0	0	0	0	0	506,655
%	8,68	8,85	8,81	8,52	8,40	-	-	-	-	-	-	8,60

Πίνακας 5.3: Ποσοστιαία μεταβολή θερμικού φορτίου, Χανιά



Διάγραμμα 5.7: Επίδραση υλικού κάλυψης στο θερμικό φορτίο, Χανιά

Από την άλλη πλευρά, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, οι ψυκτικές ανάγκες δεν διαφοροποιούνται ιδιαίτερα συναρτήσει του υλικού κάλυψης. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την ψύξη αγνοείται η ροή θερμότητας με ακτινοβολία από το κάλυμμα καθώς και η μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία από τον φυτικό θόλο και το έδαφος προς την ατμόσφαιρα. Συνεπώς η επίδραση του καλύμματος εισέρχεται στους υπολογισμούς μόνο κατά τον υπολογισμό του U .



Διάγραμμα 5.8: Επίδραση υλικού κάλυψης στο ψυκτικό φορτίο, Χανιά

Καλαμάτα 5.1.2:

Το μοντέλο εφαρμόστηκε και στην περιοχή της Καλαμάτας η οποία είναι από τις πυκνότερες σε θερμοκήπια πόλεις της Ελλάδας. Εκτός της αλλαγής της γεωγραφικής τοποθεσίας, τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του θερμοκηπίου παρέμειναν ίδια. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται παρακάτω.

Μήνας	Qheat (kwh)	Qcool (kwh)
Ιανουάριος	5740,026	0
Φεβρουάριος	4884,03	0
Μάρτιος	3493,88	0
Απρίλιος	1511,82	0
Μάιος	494,35	421,1
Ιούνιος	0	23717,23
Ιούλιος	0	31095,71
Αύγουστος	0	32561,2

Σεπτέμβριος	0	17428,59
Οκτώβριος	0,64	1407,66
Νοέμβριος	218,38	0
Δεκέμβριος	3042,53	0

Πίνακας 5.4: Έξοδος προγράμματος, Καλαμάτα

Από τα αποτελέσματα του αλγορίθμου συμπεραίνεται ότι το θερμοκήπιο πρέπει να λειτουργήσει θερμαινόμενο το χρονικό διάστημα Ιανουαρίου – Μαΐου και το χρονικό διάστημα Οκτωβρίου – Δεκεμβρίου. Αντίθετα, ψύξη απαιτείται από το Μάιο έως τον Οκτώβριο. Ένα στοιχείο που γίνεται αντιληπτό στην συγκεκριμένη ανάλυση είναι η ταυτόχρονη ύπαρξη θερμικών και ψυκτικών αναγκών τον ίδιο μήνα. Αυτό εξηγείται από το βήμα της προσομοίωσης που ακολουθήθηκε. Συγκεκριμένα, η επίλυση του ενεργειακού ισοζυγίου έγινε για κάθε ώρα και συνεπώς είναι δυνατό να υπάρχουν θερμοκρασίες μικρότερες (πρωτίστως τη νύχτα) της ελάχιστης θερμοκρασίας θερμικής άνεσης της τομάτας που καθιστούν αναγκαία την θέρμανση, αλλά και θερμοκρασίες υψηλότερες της μέγιστης θερμοκρασίας θερμικής άνεσης της καλλιέργειας που αυξάνουν το ψυκτικό φορτίο. Μία ακόμη παρατήρηση σχετίζεται με τη μεγάλη διαφορά που υπάρχει στο θερμικό και ψυκτικό φορτίο συγκριτικά με την προσομοίωση για τα Χανιά. Αυτή η διαφορά οφείλεται στη μεταβολή της γεωγραφικής τοποθεσίας παρότι τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του θερμοκηπίου δεν διαφοροποιήθηκαν. Η γραφική παράσταση των φορτίων του θερμοκηπίου απεικονίζεται στα διαγράμματα 12 και 13.



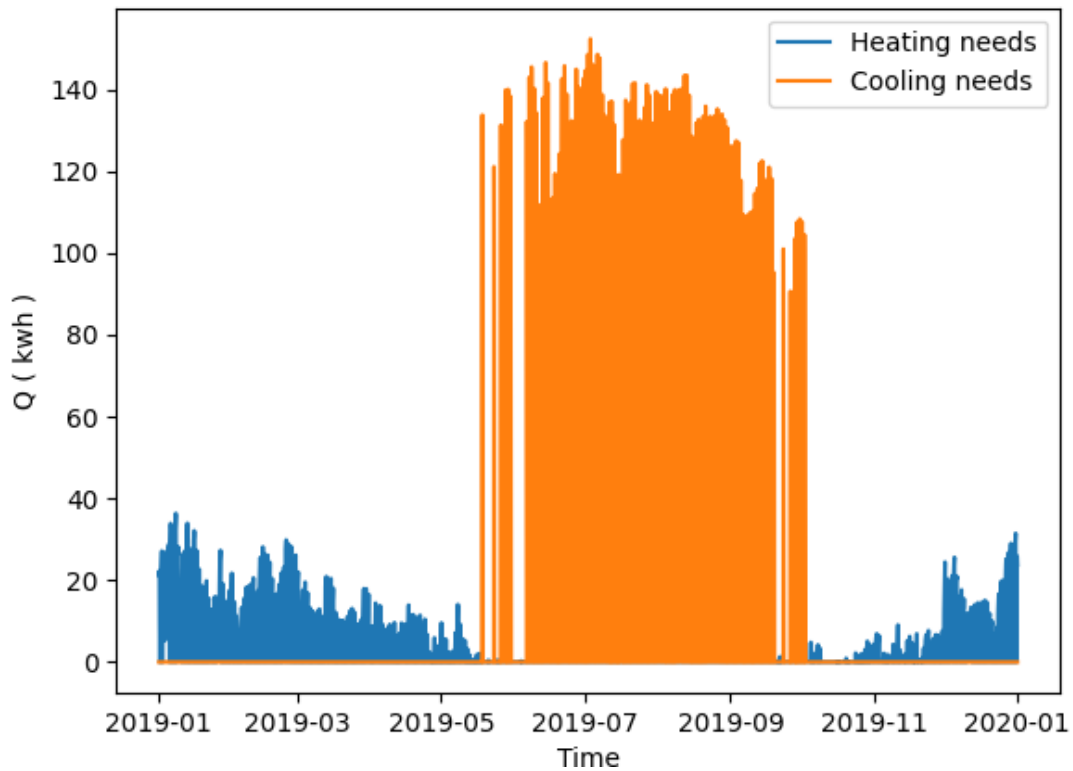
Διάγραμμα 5.9: Διακύμανση θερμικών αναγκών καλλιέργειας τομάτας, Καλαμάτα



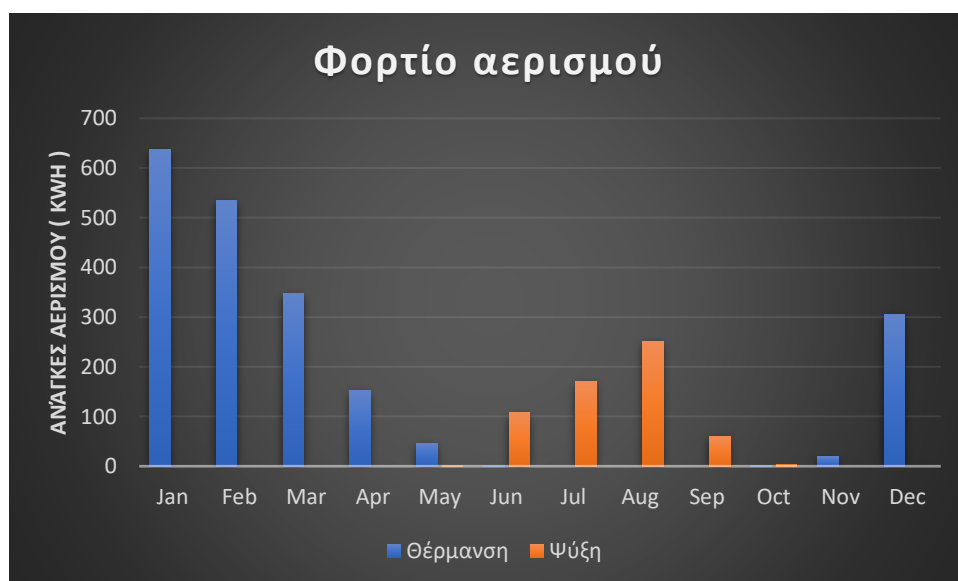
Διάγραμμα 5.10: Διακύμανση ψυκτικών αναγκών καλλιέργειας τομάτας, Καλαμάτα

Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, το ψυκτικό φορτίο ποσοτικά είναι μεγαλύτερο του θερμικού φορτίου. Αυτό συμβαίνει λόγω της μεθοδολογίας του

ενεργειακού ισοζυγίου που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση των φορτίων. Πιο ειδικά, η εισροή ενέργειας με τη μορφή ηλιακής ακτινοβολίας και το φαινόμενο του θερμοκηπίου που ακολουθεί αυξάνει το ψυκτικό φορτίο ενώ αντιθέτως μειώνει το θερμικό φορτίο.

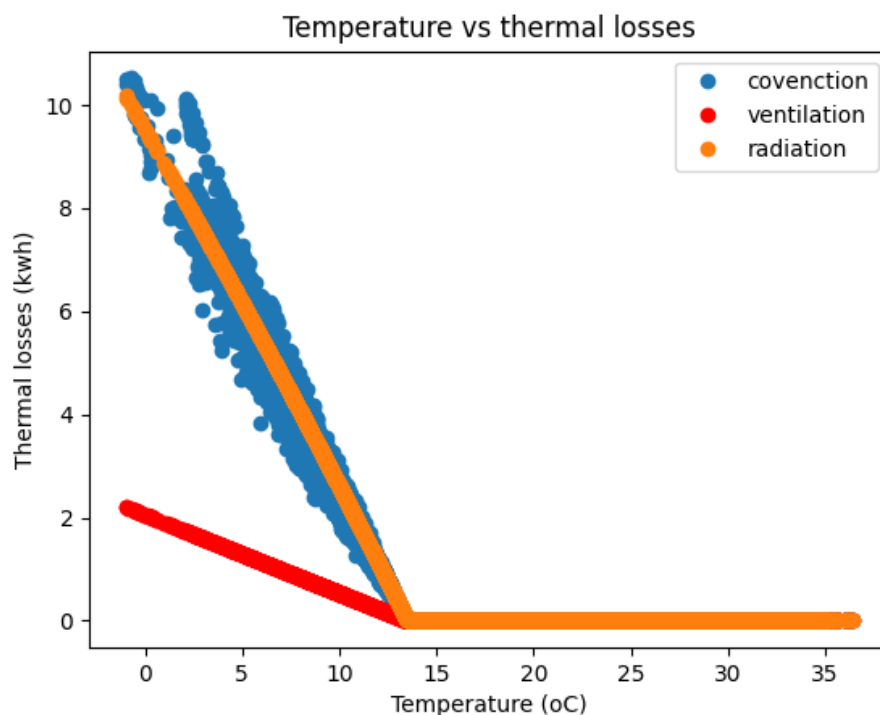


Διάγραμμα 5.11: Ωριαίες θερμικές & ψυκτικές ανάγκες, Καλαμάτα

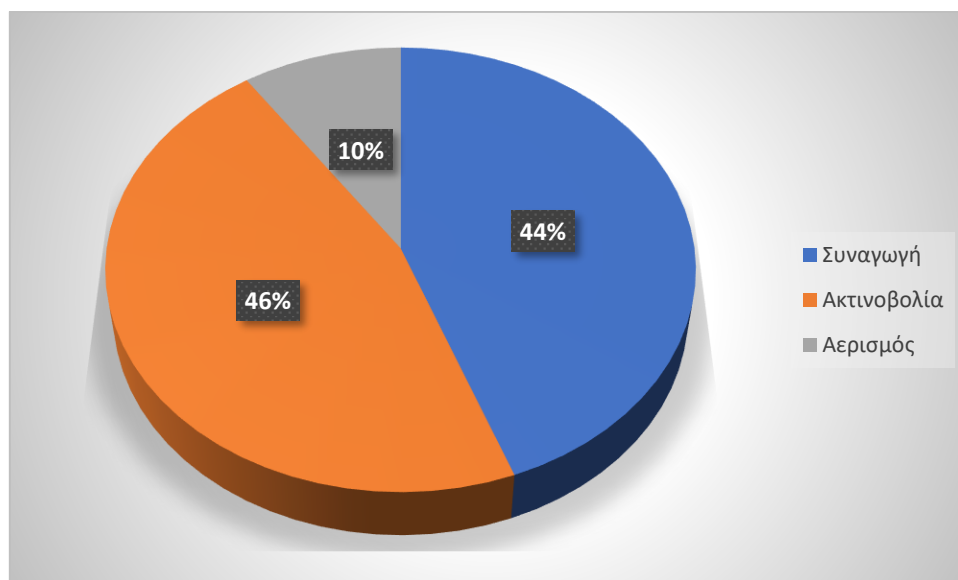


Διάγραμμα 5.12: Φορτία αερισμού για θέρμανση & ψύξη, Καλαμάτα

Οι θερμικές απώλειες εμφανίζουν ισχυρή εξάρτηση από την εξωτερική θερμοκρασία καθώς μειώνονται γραμμικά όσο η θερμοκρασία πλησιάζει τις συνθήκες ελάχιστης θερμικής άνεσης του φυτού. Όπως απεικονίζεται και στο παρακάτω διάγραμμα πίτας οι πιο σημαντικές συνιστώσες των θερμικών απωλειών είναι η συναγωγή (44%) από το κάλυμμα και η ακτινοβολία (46%) ενώ μικρότερη συνεισφορά έχουν οι απώλειες λόγω αερισμού (10%). Παρατηρείται ότι οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας αυξήθηκαν κατά 2% σε σχέση με τα Χανιά ενώ οι απώλειες αερισμού ελαττώθηκαν κατά το ίδιο ποσοστό.



Διάγραμμα 5.13: Εξάρτηση θερμικών απωλειών από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, Καλαμάτα

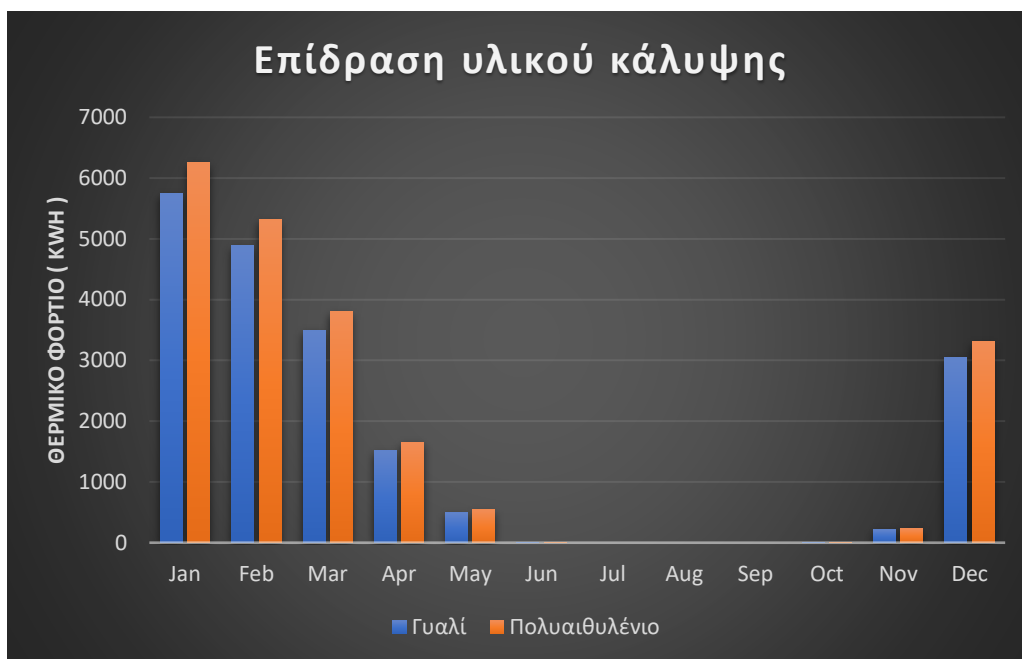


Διάγραμμα 5.14: Κατανομή θερμικών απωλειών, Καλαμάτα

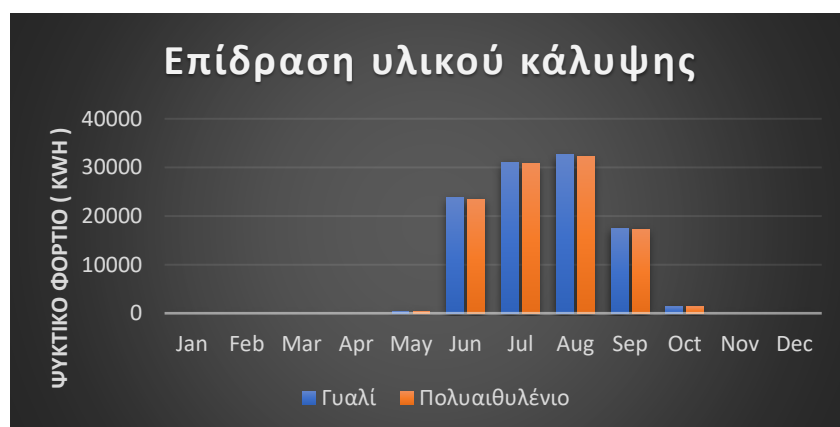
Η τοποθέτηση πολυαιθυλενίου ως υλικό κάλυψης στο θερμοκήπιο αυξάνει το θερμικό φορτίο λόγω των απωλειών ακτινοβολίας. Παρά τις διαφορετικές τιμές θερμικών αναγκών που εμφανίζει η Καλαμάτα συγκριτικά με τα Χανιά, η ποσοστιαία αύξηση που επιφέρει η χρήση PE αντί για γυαλί κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα στο 8 – 9 %. Αντίθετα το ψυκτικό φορτίο εμφάνισε αμελητέα μείωση ($\leq 1\%$) διότι στο ενεργειακό ισοζύγιο κατά τον υπολογισμό των ψυκτικών απαιτήσεων δεν λήφθηκαν υπόψιν οι απώλειες ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος από το έδαφος και τον φυτικό θόλο.

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Γυαλί	5740,026	4884,03	3493,88	1511,82	494,35	4,93	0	0	0	0,64	218,38	3042,53
PE	6254,99	5316,56	3799,023	1650	538,48	5,35	0	0	0	0,69	237,91	3308,99
%	8,97	8,86	8,81	9,14	8,93	8,52	-	-	-	7,81	8,94	8,76

Πίνακας 5.5: Ποσοστιαία μεταβολή θερμικού φορτίου, Καλαμάτα



Διάγραμμα 5.15: Επίδραση υλικού κάλυψης στο θερμικό φορτίο, Καλαμάτα



Διάγραμμα 5.16: Επίδραση υλικού κάλυψης στο ψυκτικό φορτίο, Καλαμάτα

Συνοψίζοντας, από την προσομοίωση προκύπτει ότι στην Καλαμάτα απαιτούνται πολύ μεγαλύτερα θερμικά και ψυκτικά φορτία για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ενός πρότυπου θερμοκηπίου σε σύγκριση με τα Χανιά. Για παράδειγμα στα Χανιά το μήνα Νοέμβριο η θερμική ενέργεια που παρέχεται από την ήλιο επαρκεί για κάλυψη των θερμικών αναγκών, αντίθετα στην Καλαμάτα το ίδιο θερμοκήπιο χρειάζεται επιπλέον ενεργειακή κατανάλωση της τάξης των 218,38 kwh με σκοπό τη διατήρηση ενός ευνοϊκού μικροκλίματος για την τομάτα. Επιπλέον, το Μάιο στα Χανιά δεν απαιτείται η ύπαρξη κάποιου συστήματος ψύξης, αντίθετα στην Καλαμάτα απαιτείται ψυκτικό φορτίο

421,1 kwh για εξασφάλιση ευνοϊκών συνθηκών. Αυτές οι μεγάλες διαφορές στην ενεργειακή συμπεριφορά του θερμοκηπίου καταδεικνύουν το σημαντικό ρόλο που διαδραματίζει η γεωγραφική τοποθεσία.

Θεσσαλονίκη 5.1.3:

Η επόμενη πόλη που επιλέγεται για την ανάλυση της ενεργειακής συμπεριφοράς του πρότυπου θερμοκηπίου είναι η Θεσσαλονίκη. Η Θεσσαλονίκη βρίσκεται στην Γ κλιματική ζώνη της ελληνικής επικράτειας η οποία αποτελείται από περιοχές της βορείου Ελλάδος με πιο ψυχρό κλίμα και επομένως η εκτίμηση των ενεργειακών αναγκών σε αυτές τις περιοχές παρουσιάζει αυξημένο ενδιαφέρον [36]. Παρακάτω φαίνεται η ενεργειακή κατανάλωση για θέρμανση και ψύξη του θερμοκηπίου.

Μήνας	Q _{heat} (kwh)	Q _{cool} (kwh)
Ιανουάριος	10793	0
Φεβρουάριος	6917,84	0
Μάρτιος	4006,71	0
Απρίλιος	2037,75	0
Μάιος	410,46	3036,73
Ιούνιος	0,29	23408,7
Ιούλιος	0	29124,72
Αύγουστος	0	31437,93
Σεπτέμβριος	2,23	14617,97
Οκτώβριος	150,79	997,4
Νοέμβριος	1157,47	0
Δεκέμβριος	7319,52	0

Πίνακας 5.6: Ενεργειακή κατανάλωση για θέρμανση & ψύξη, Θεσσαλονίκη

Το θερμοκήπιο με τα χαρακτηριστικά του πίνακα 7 απαιτεί θέρμανση για 10 μήνες. Η μέγιστη ενεργειακή κατανάλωση για θερμότητα (10793 kwh) υφίσταται τον

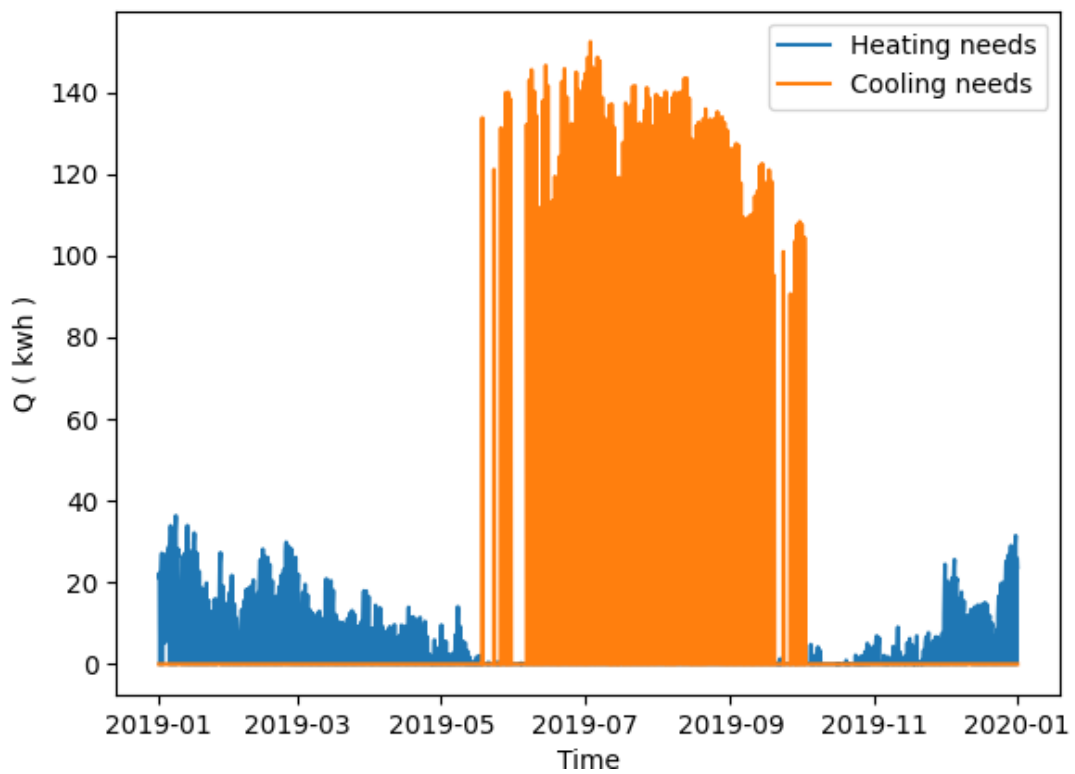
Ιανουάριο καθώς τότε επικρατούν οι μικρότερες θερμοκρασίες με αποτέλεσμα να μεταφέρεται μεγάλη ροή θερμότητας προς τα έξω. Οι μήνες Ιούνιος και Σεπτέμβριος χαρακτηρίζονται από ελάχιστες θερμικές απαιτήσεις 0,29 kwh και 2,23 kwh αντίστοιχα. Η ψύξη της θερμοκηπιακής μονάδας είναι απαραίτητη για 6 μήνες και συγκεκριμένα από το Μάιο έως τον Οκτώβριο. Το μέγιστο ψυκτικό φορτίο (31437,93 kwh) εντοπίζεται τον Αύγουστο ενώ το ελάχιστο (997,4 kwh) τον Οκτώβριο. Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται ο τρόπος διακύμανσης των ενεργειακών αναγκών για θέρμανση και ψύξη ως προς τον χρόνο χρησιμοποιώντας τα μηνιαία και ωριαία δεδομένα εξόδου του προγράμματος.



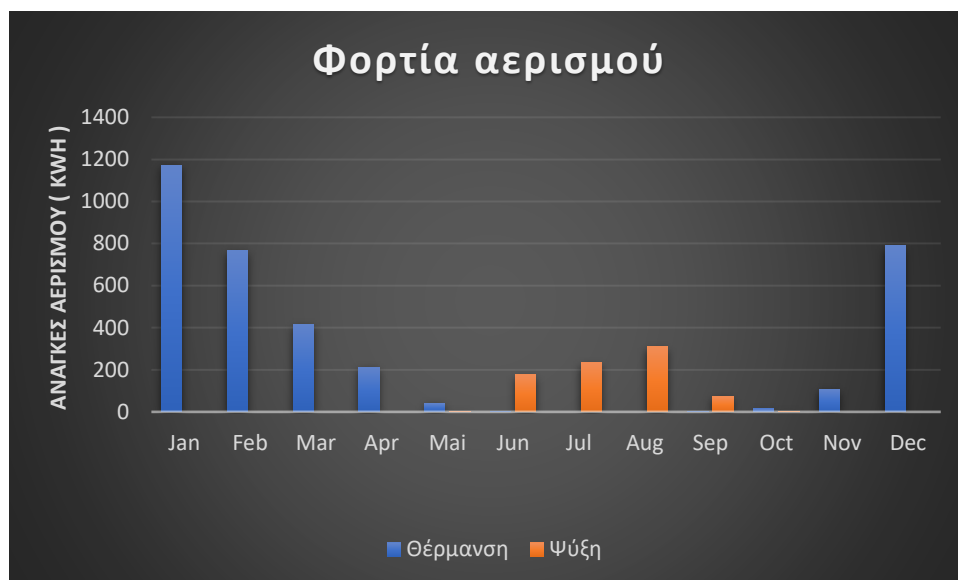
Διάγραμμα 5.17: Διακύμανση θερμικών αναγκών καλλιέργειας τομάτας, Θεσσαλονίκη



Διάγραμμα 5.18: Διακύμανση ψυκτικών αναγκών καλλιέργειας τομάτας, Θεσσαλονίκη

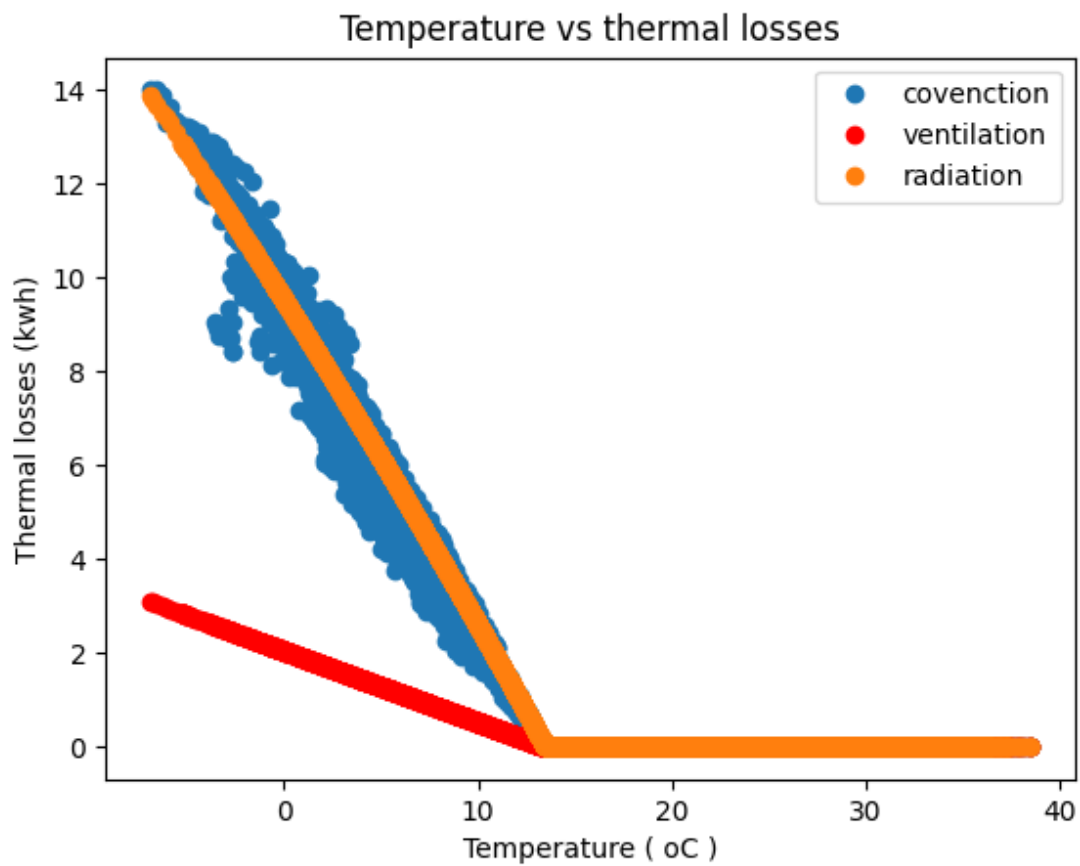


Διάγραμμα 5.19: Ωριαία διακύμανση θερμικών & ψυκτικών απαιτήσεων καλλιέργειας τομάτας, Θεσσαλονίκη

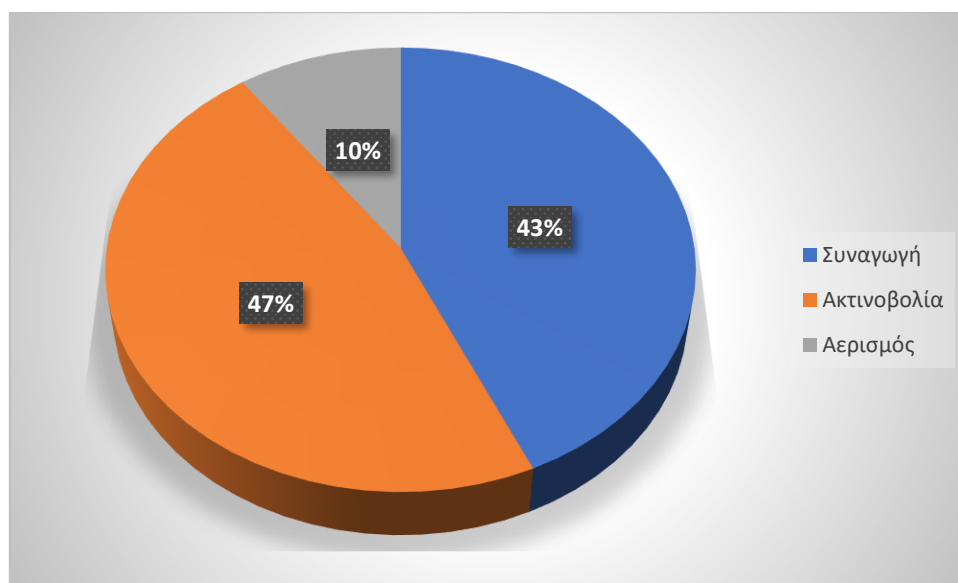


Διάγραμμα 5.20: Φορτία αερισμού για θέρμανση & ψύξη, Θεσσαλονίκη

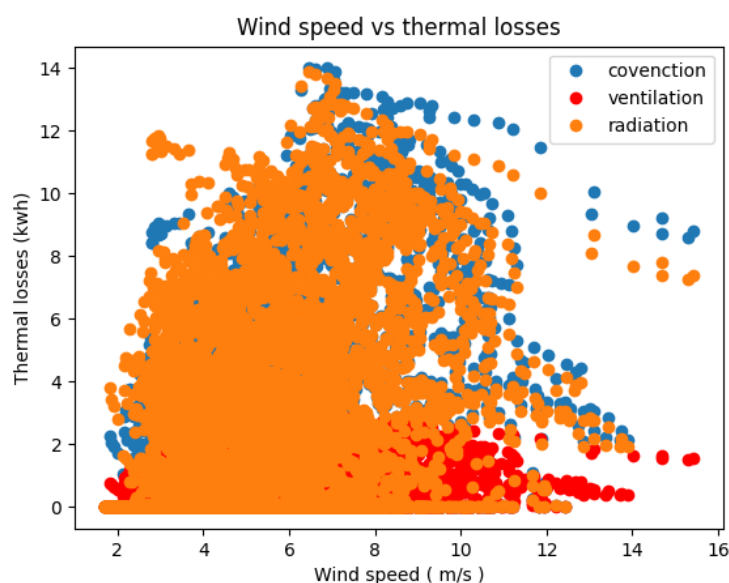
Στην συνέχεια ακολουθεί μια ανάλυση σχετικά με τον τρόπο που επιδρούν οι εξωτερικές συνθήκες (θερμοκρασία, ταχύτητα ανέμου) στις πιο σημαντικές συνιστώσες των θερμικών απωλειών. Από τη μελέτη των παρακάτω διαγραμμάτων καθίσταται σαφές ότι οι θερμικές απώλειες μειώνονται γραμμικά όσο η εξωτερική θερμοκρασία πλησιάζει την ελάχιστη θερμοκρασία σχεδιασμού του φυτού ενώ πέρα από αυτήν μηδενίζονται διότι η ροή θερμότητας προς τα έξω τείνει στο μηδέν. Αντίθετα, τα είδη θερμικών απωλειών εμφανίζουν πολύ μεγάλη διασπορά ως προς την ταχύτητα ανέμου έχοντας τυχαία κατανομή και δεν επηρεάζονται με κάποιο συγκεκριμένο τρόπο από αυτήν. Παρόλα αυτά και στα δύο διαγράμματα φαίνεται ότι η συμβολή του αερισμού είναι η μικρότερη.



Διάγραμμα 5.21: Επίδραση εξωτερικής θερμοκρασίας στις θερμικές απώλειες, Θεσσαλονίκη



Διάγραμμα 5.22: Κατανομή απωλειών θερμότητας, Θεσσαλονίκη

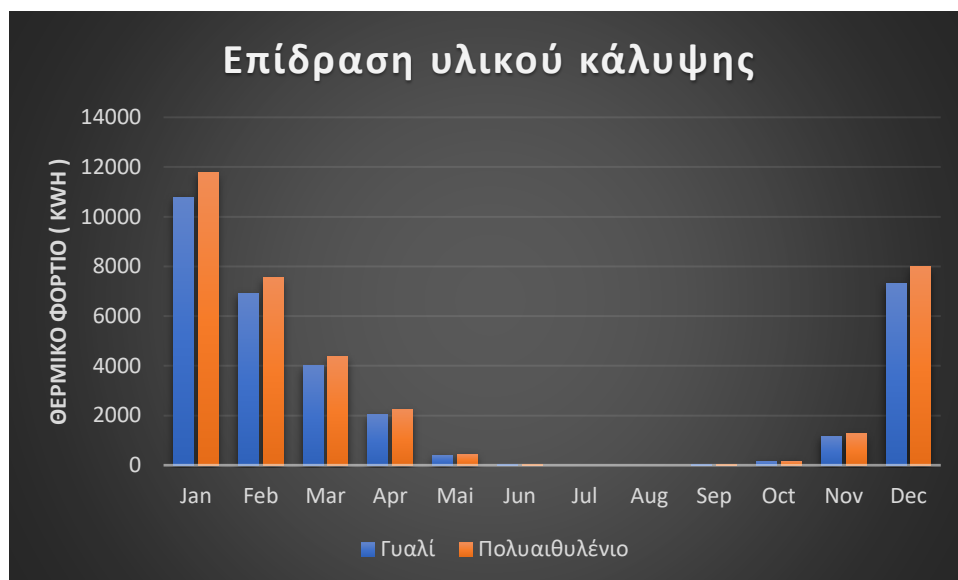


Διάγραμμα 5.23: Επίδραση ταχύτητας ανέμου στις θερμικές απώλειες, Θεσσαλονίκη

Ομοίως με τις προηγούμενες περιπτώσεις, η τιμή της ενεργειακής κατανάλωσης μεταβάλλεται με την επιλογή του υλικού κάλυψης της θερμοκηπιακής εγκατάστασης. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα του παρακάτω πίνακα, η χρησιμοποίηση πολυαιθυλενίου επιφέρει, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας για θέρμανση της τάξης του 8 – 9 %. Παρόλα αυτά το ποσοστό παραμένει σταθερό και ίδιο με τα Χανιά και την Καλαμάτα υποδηλώνοντας ότι ανεξαρτήτως γεωγραφικής τοποθεσίας η ποσοστιαία αύξηση των θερμικών απωλειών παραμένει σταθερή. Η επιρροή του υλικού κάλυψης αναπαρίσταται και στο διάγραμμα 23.

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Γυαλί	1079 3	6917, 84	4006, 71	2037, 75	410,4 6	0,29	0	0	2,23	150,7 9	1157, 47	7319 ,52
PE	1178 2,19	7539, 06	4366, 13	2222, 55	447,2 9	0,31	0	0	2,43	164,9 5	1258, 93	7978
%	9,17	8,98	8,97	9,07	8,97	6,90	-	-	8,97	9,39	8,77	9

Πίνακας 5.7: Υπολογισμός θερμικών αναγκών για διαφορετικά καλύμματα, Θεσσαλονίκη



Διάγραμμα 5.24: Επίδραση υλικού κάλυψης στο θερμικό φορτίο, Θεσσαλονίκη

Τα αποτελέσματα του προγράμματος σε συνδυασμό με την ανάλυση τους αναδεικνύουν την υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση για θέρμανση που απαιτείται για την ομαλή λειτουργία του πρότυπου θερμοκηπίου στην Θεσσαλονίκη συγκριτικά με αυτήν που χρειάζεται στα Χανιά ή την Καλαμάτα. Παραδείγματος χάριν, στην Θεσσαλονίκη τον Ιανουάριο που σημειώνονται οι μικρότερες θερμοκρασίες, η απαιτούμενη ενέργεια θέρμανσης κυμαίνεται στις 10793 kWh ενώ στα Χανιά το ίδιο θερμοκήπιο θα χρειαζόταν μόλις 1852,23 kWh, δηλαδή μείωση του θερμικού φορτίου περίπου 5 φορές. Αναφορικά με την ενεργειακή κατανάλωση για ψύξη προκύπτει ότι στην Θεσσαλονίκη απαιτείται λιγότερη από την Καλαμάτα όμως περισσότερη από τα Χανιά για ορισμένους μήνες.

Φλώρινα 5.1.4:

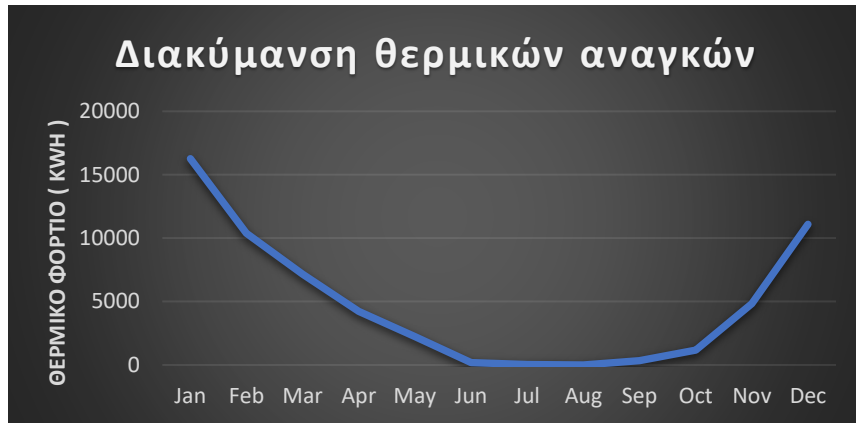
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πίνακα 14, η εγκατάσταση του πρότυπου θερμοκηπίου στην Φλώρινα προϋποθέτει θέρμανση για κάθε μήνα. Η μέγιστη ενεργειακή κατανάλωση (16267,14 kWh) εντοπίζεται τον Ιανουάριο ενώ η ελάχιστη τον Αύγουστο και αναφέρεται σε ορισμένες νυχτερινές ώρες για τις οποίες η εξωτερική θερμοκρασία λαμβάνει μικρότερη τιμή από αυτήν που έχει θεσπιστεί ως κατώτατο όριο για την θερμοκρασία της τομάτας [35]. Αντίθετα, ενεργειακή κατανάλωση για ψύξη απαιτείται μόνο για τέσσερις μήνες (Ιούνιος – Σεπτέμβριος) με μέγιστες ψυκτικές ανάγκες τον

Αύγουστο (25229,9 kwh) και ελάχιστες τον Σεπτέμβριο (4605,85 kwh). Η θερμοκηπιακή μονάδα παρουσιάζει αισθητά υψηλότερα θερμικά και μικρότερα ψυκτικά φορτία συγκριτικά με τις προηγούμενες πόλεις. Αυτή η διαπίστωση εξηγείται από το γεγονός ότι η Φλώρινα βρίσκεται στην Δ κλιματική ζώνη της ελληνικής επικράτειας στην οποία εντάσσονται οι πόλεις με το πιο ψυχρό κλίμα [36].

Μήνας	Qheat (kwh)	Qcool (kwh)
Ιανουάριος	16267,14	0
Φεβρουάριος	10376,36	0
Μάρτιος	7148,09	0
Απρίλιος	4224,27	0
Μάιος	2227,6	0
Ιούνιος	180,6	11888,53
Ιούλιος	34,32	19932,66
Αύγουστος	1,27	25229,9
Σεπτέμβριος	351,3	4605,85
Οκτώβριος	1160,42	0
Νοέμβριος	4844,94	0
Δεκέμβριος	11094,35	0

πίνακας 5.8: Ενεργειακές ανάγκες για θέρμανση & ψύξη, Φλώρινα

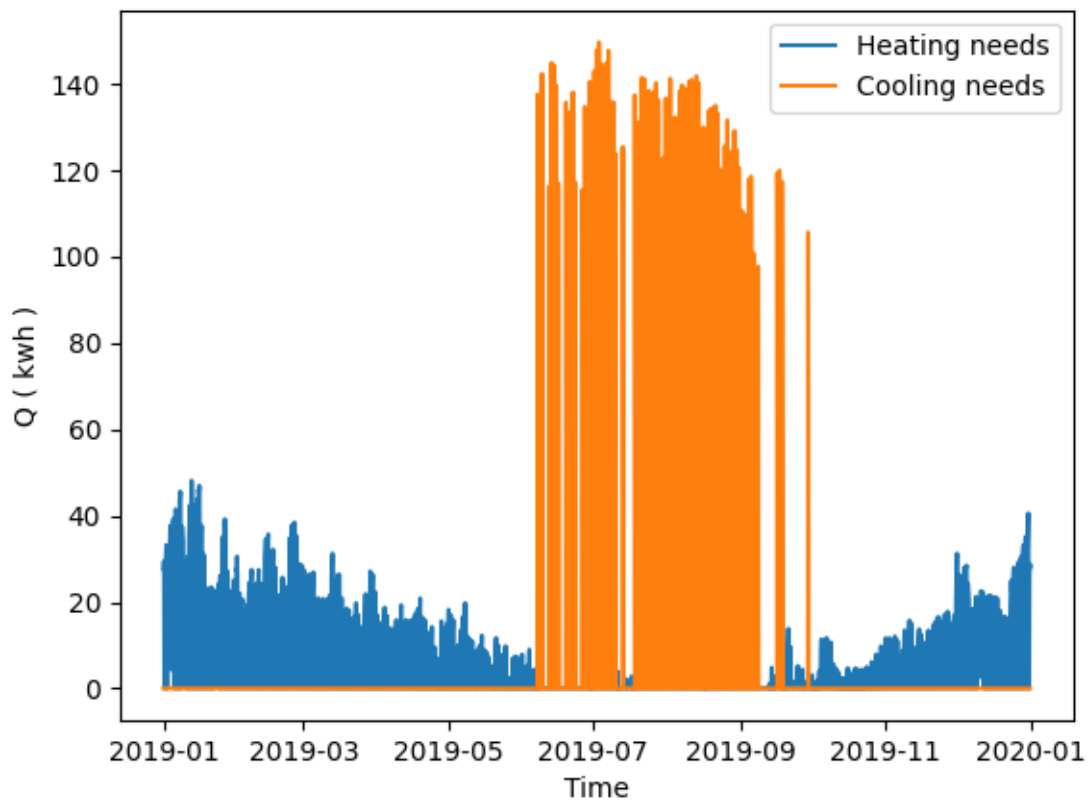
Όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα, το θερμικό φορτίο εμφανίζει μέγιστο το μήνα Ιανουάριο και μειώνεται με γραμμικό προφίλ όσο πλησιάζει το καλοκαίρι εμφανίζοντας τρεις διαφορετικές κλίσεις στα διαστήματα: α) Ιανουαρίου - Φεβρουαρίου, β) Φεβρουαρίου - Απριλίου, γ) Απριλίου – Ιουνίου. Ο μεγαλύτερος ρυθμός μείωσης εντοπίζεται μεταξύ Ιανουαρίου και Φεβρουαρίου. Γραμμική αύξηση των θερμικών αναγκών παρατηρείται από τις αρχές φθινοπώρου μέχρι τον Δεκέμβριο και δικαιολογείται από τις χαμηλές τιμές θερμοκρασιών που επικρατούν στην Φλώρινα με αποτέλεσμα την ροή θερμότητας προς τα έξω. Όσον αφορά το ψυκτικό φορτίο, αυξάνεται γραμμικά από αρχές Ιουνίου έως τον Αύγουστο όπου αποκτά τη μέγιστη τιμή του. Στη συνέχεια ακολουθεί πτωτική πορεία μηδενιζόμενο τα τέλη Σεπτεμβρίου.



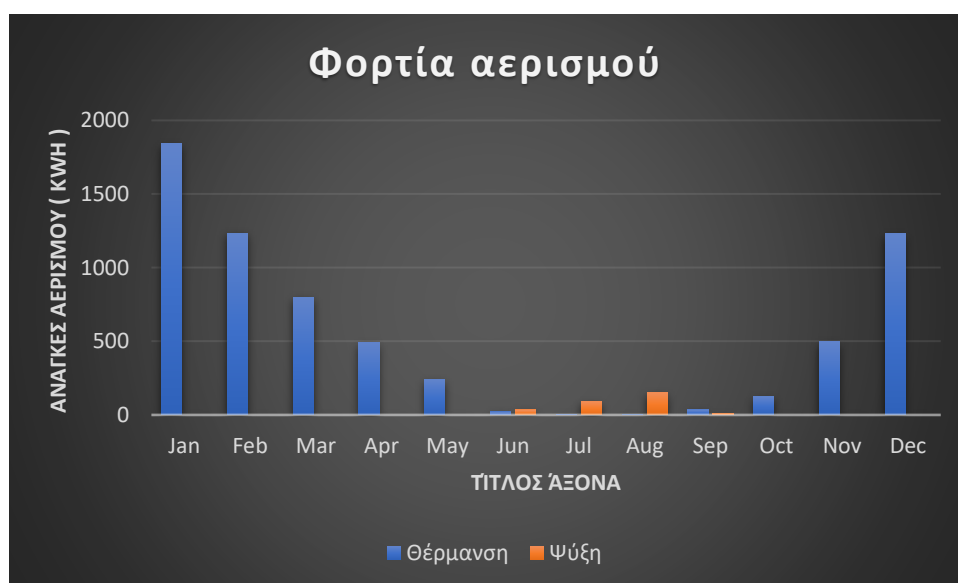
Διάγραμμα 5.25: Διακύμανση θερμικών αναγκών καλλιέργειας τομάτας, Φλώρινα



Διάγραμμα 5.26: Διακύμανση ψυκτικών αναγκών καλλιέργειας τομάτας, Φλώρινα

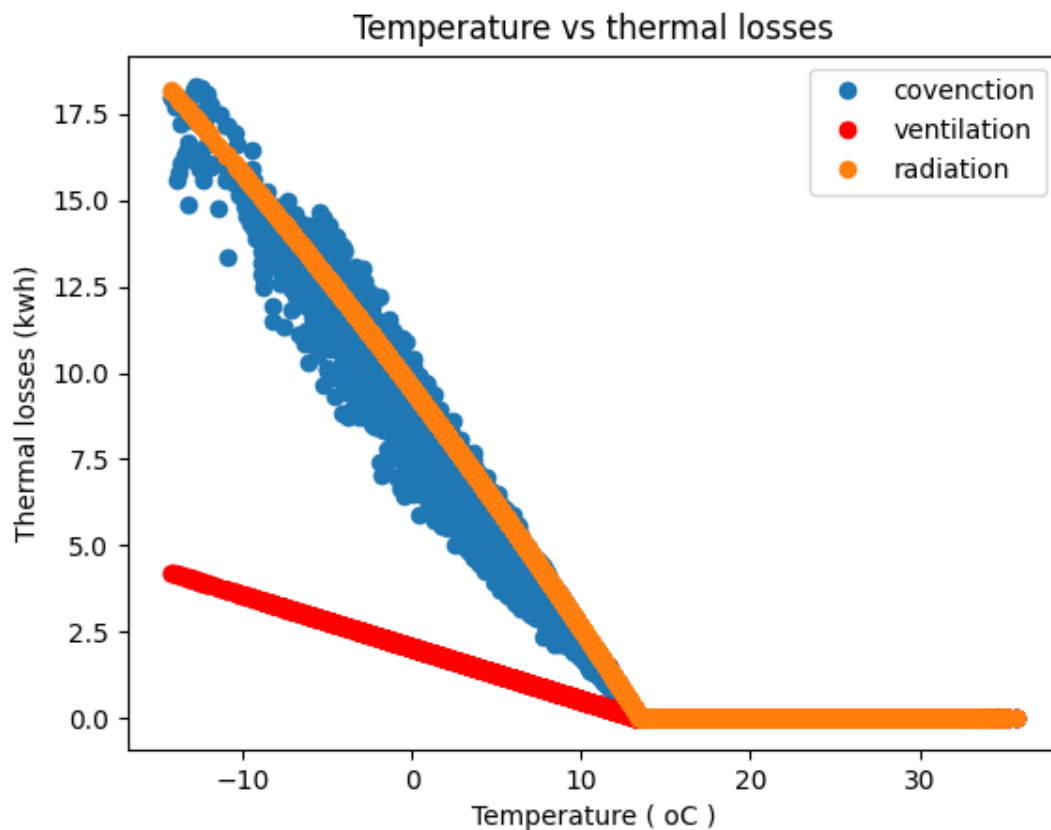


Διάγραμμα 5.27: Ωριαίες θερμικές & ψυκτικές ανάγκες καλλιέργειας τομάτας, Φλώρινα

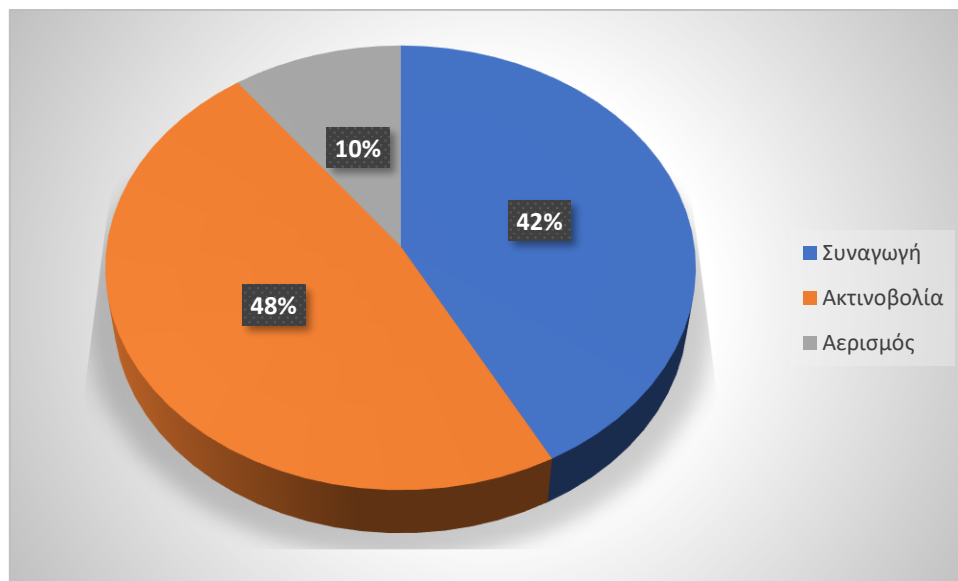


Διάγραμμα 5.28: Φορτία αερισμού για θέρμανση & ψύξη, Φλώρινα

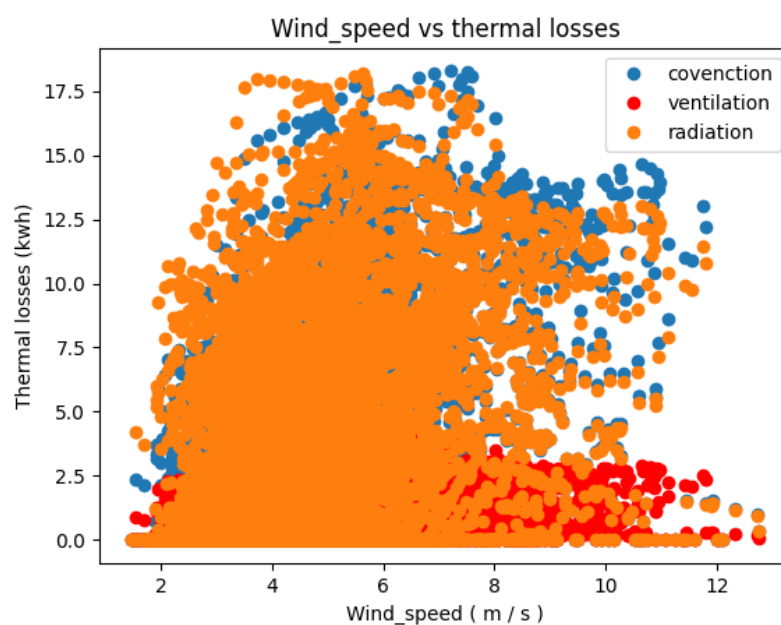
Από τη μελέτη των παρακάτω διαγραμμάτων γίνεται αντιληπτό ότι οι θερμικές απώλειες μειώνονται γραμμικά όσο η εξωτερική θερμοκρασία πλησιάζει την ελάχιστη θερμοκρασία σχεδιασμού του φυτού ενώ πέρα από αυτήν μηδενίζονται διότι η ροή θερμότητας προς τα έξω τείνει στο μηδέν. Αντίθετα, τα είδη θερμικών απωλειών εμφανίζουν πολύ μεγάλη διασπορά ως προς την ταχύτητα ανέμου έχοντας τυχαία κατανομή και δεν επηρεάζονται με κάποιο συγκεκριμένο τρόπο από αυτήν. Παρόλα αυτά και στα δύο διαγράμματα φαίνεται ότι η συμβολή του αερισμού είναι η μικρότερη. Καθίσταται σαφές ότι η γραμμική μείωση των απωλειών θερμότητας με την εξωτερική θερμοκρασία είναι ανεξάρτητη της γεωγραφικής τοποθεσίας και επηρεάζεται από αυτήν μονάχα ποσοτικά δίχως να υπάρχει κάποια αλλαγή στο μοτίβο. Στο διάγραμμα 27 οι απώλειες θερμότητας λόγω ακτινοβολίας εμφανίζονται αυξημένες (48%) συγκριτικά με τα αντίστοιχα διαγράμματα στις προηγούμενες πόλεις. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι στην Φλώρινα επικρατούν σημαντικά χαμηλότερες εξωτερικές θερμοκρασίες οι οποίες σε συνδυασμό με την διαφορά της 4^{ης} δύναμης αυξάνουν τον βαθμό απωλειών.



Διάγραμμα 5.29: Μεταβολή θερμικών απωλειών με την εξωτερική θερμοκρασία, Φλώρινα



Διάγραμμα 5.30: Κατανομή απωλειών θερμότητας, Θεσσαλονίκη



Διάγραμμα 5.31: Μεταβολή απωλειών θερμότητας με την ταχύτητα του ανέμου

Σύμφωνα με τον επόμενο πίνακα συμπεραίνεται ότι η επιλογή του πολυαιθυλενίου ως υλικού κάλυψης αυξάνει τις ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης για θέρμανση. Τα αποτελέσματα συμφωνούν με τη μοντελοποίηση του κεφαλαίου 3 καθώς για πλαστικό κάλυμμα εισάγεται η επιπλέον θερμική απώλεια με ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που διαπερνά το κέλυφος. Αντίθετα, με βάση τα αποτελέσματα του

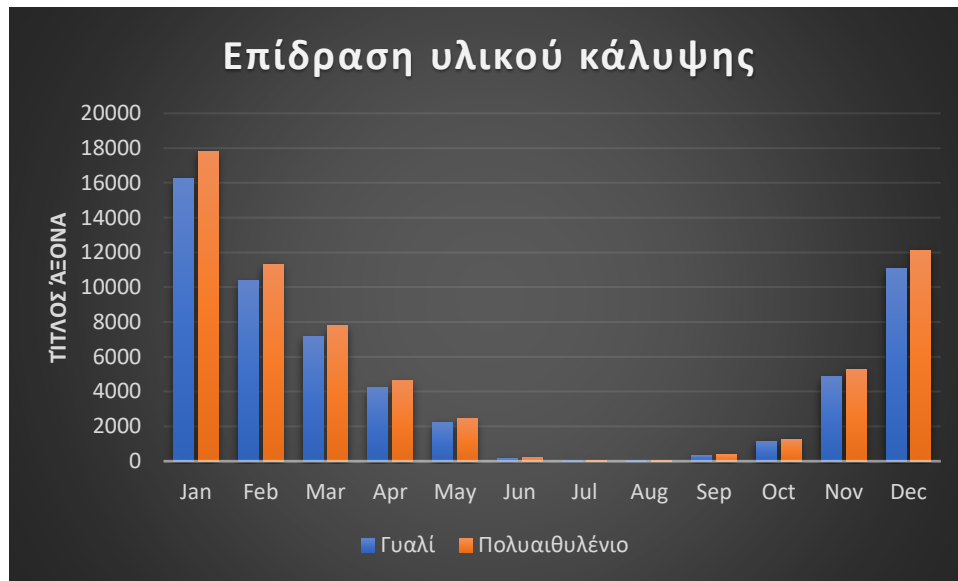
πίνακα 16 η τοποθέτηση PE επιφέρει μια ελάχιστη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης για ψύξη της τάξεως του 1%. Η οπτική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων φαίνεται στα διαγράμματα 28, 29.

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Γυαλί	16267,14	10376,36	7148,09	4224,27	2227,6	180,6	34,32	1,27	351,3	1160,42	4844,94	11094,35
PE	17809,44	11329,9	7789,68	4618,86	2431,52	197,41	37,66	1,41	383,75	1269,22	5286,5	12119,24
%	9,48	9,19	8,98	9,34	9,15	9,31	9,73	11,02	9,24	9,38	9,11	9,24

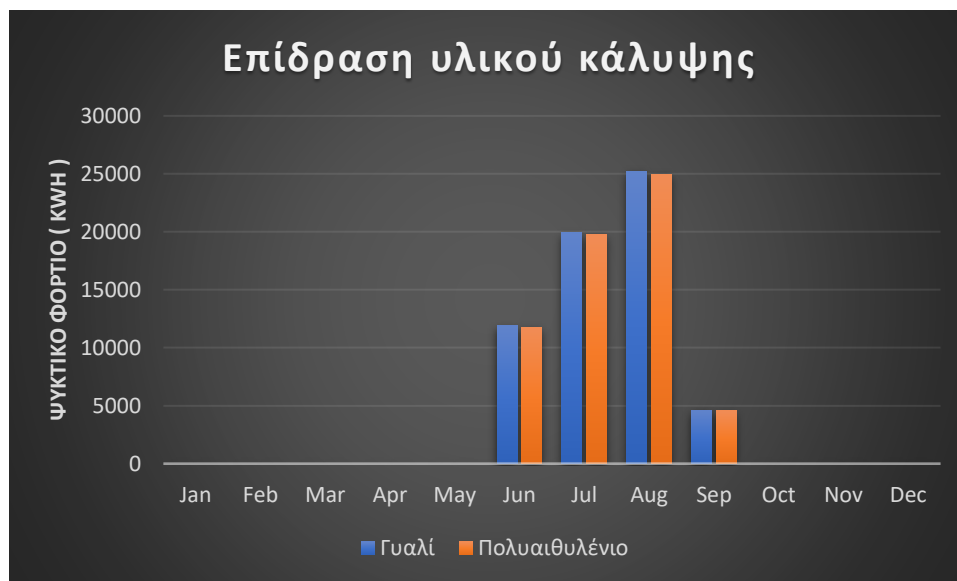
Πίνακας 5.9: Υπολογισμός θερμικών αναγκών για διάφορα καλύμματα, Φλώρινα

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Γυαλί	0	0	0	0	0	11888,53	19932,66	25229,9	4605,85	0	0	0
PE	0	0	0	0	0	11760,99	19723,28	24968,83	4555,78	0	0	0
%	0	0	0	0	0	-1,07	-1,05	-1,05	-1,10	0	0	0

Πίνακας 5.10: Υπολογισμός ψυκτικών αναγκών για διάφορα καλύμματα, Φλώρινα



Διάγραμμα 5.32: Μεταβολή του θερμικού φορτίου με το υλικό κάλυψης, Φλώρινα

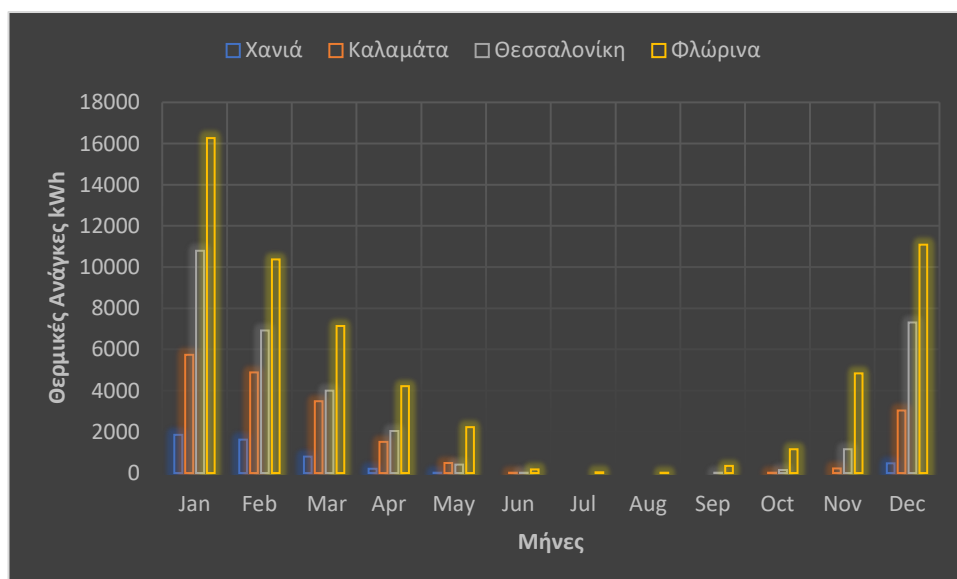


Διάγραμμα 5.33: Μεταβολή ψυκτικού φορτίου με το υλικό κάλυψης, Φλώρινα

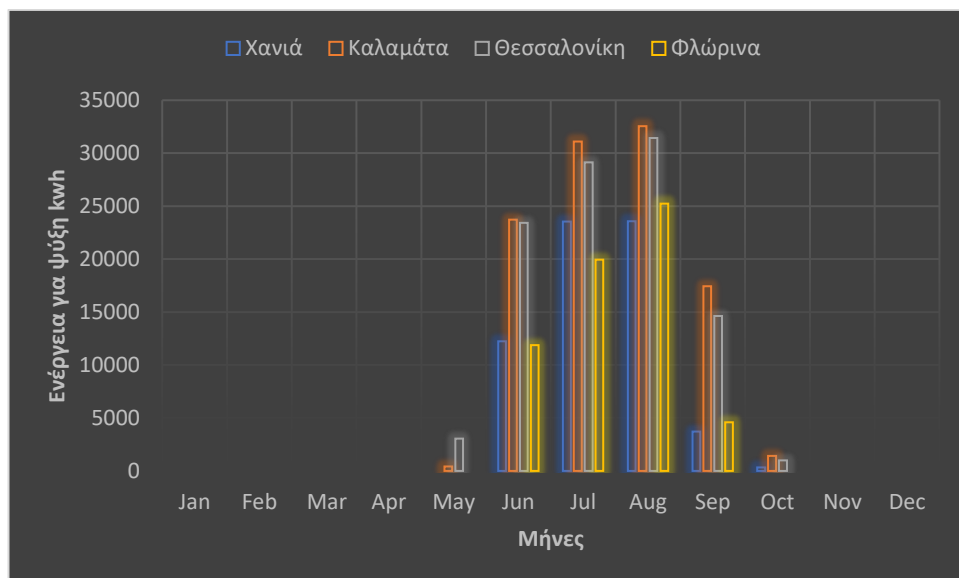
5.2 Συζήτηση αποτελεσμάτων:

Όπως απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα, η επιλογή της γεωγραφικής τοποθεσίας διαδραματίζει προεξάρχοντα ρόλο στην απαιτούμενη ενέργεια για θέρμανση σε ένα πρότυπο θερμοκήπιο. Η αλλαγή γεωγραφικής τοποθεσίας, όπως φάνηκε από την ανάλυση σε αυτό το κεφάλαιο, προκαλεί μεταβολή σε μία σειρά από σημαντικές για τον έλεγχο του κλίματος του θερμοκηπίου μεταβλητές (εξωτερική θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου κ.ά.). Κατά αυτόν τον τρόπο μια ίδια σε λειτουργικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά θερμοκηπιακή μονάδα η οποία βρίσκεται σε διαφορετικές περιοχές εμφανίζει μεγάλη απόκλιση στις θερμικές ανάγκες. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα που προκύπτει από την ανάλυση είναι η εγκατάσταση ενός θερμοκηπίου με τα ίδια γνωρίσματα στα Χανιά και στην Φλώρινα. Το συγκεκριμένο θερμοκήπιο στην Φλώρινα θα απαιτούσε θερμική ενέργεια 16000 kWh το μήνα Ιανουάριο ενώ τον ίδιο μήνα στα Χανιά θα χρειαζόταν λιγότερο από 2000 kWh για να επιτευχθεί η ομαλή λειτουργία του.

Παρόμοια, στο διάγραμμα 32 διαφαίνονται συγκεντρωτικά, για τις διάφορες πόλεις του μοντέλου, οι απαιτήσεις σε ενέργεια για ψύξη. Η Καλαμάτα παρουσιάζει τις μεγαλύτερες ανάγκες για ψύξη.



Διάγραμμα 5.34: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση



Διάγραμμα 5.35: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ενεργειακών απαιτήσεων για ψύξη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

6.1 Εισαγωγή:

Η θερμοκρασία αποτελεί την πιο σημαντική παράμετρο στα περισσότερα συστήματα κλιματολογικού ελέγχου των θερμοκηπίων. Η διατήρηση ορθών θερμοκρασιακών συνθηκών εντός του θερμοκηπίου διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στην ομαλή ανάπτυξη της καλλιέργειας. Τους χειμερινούς μήνες αλλά και τις νυχτερινές ώρες η λειτουργία ενός συστήματος θέρμανσης συνιστά επιτακτική ανάγκη για την κάλυψη των θερμικών αναγκών της εγκατάστασης. Έχει αποδειχτεί ότι τα συστήματα θέρμανσης απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος του κεφαλαίου που διατίθεται για την εγκατάσταση και λειτουργία μιας θερμοκηπιακής μονάδας και συνεπώς απαιτείται μεγάλη προσοχή για την επιλογή του πλέον κατάλληλου.

Στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται μια ανασκόπηση και αξιολόγηση των κυριότερα χρησιμοποιούμενων τεχνολογιών θέρμανσης των θερμοκηπιακών μονάδων. Στη συνέχεια καταρτίζεται ένας πίνακας ταξινόμησης των συνηθέστερων συστημάτων θέρμανσης ως προς την καταλληλότητά τους για τις διάφορες περιοχές που μελετήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

6.2 Συμβατικά συστήματα θέρμανσης:

Τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης αποτελούν την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία θέρμανσης στα θερμοκήπια. Εμφανίζουν υψηλή απόδοση αλλά η χρήση ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, μαζούτ κ.α.) οδηγεί σε μεγάλη ενεργειακή κατανάλωση.

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό ενός συμβατικού συστήματος θέρμανσης είναι οι ακόλουθοι:

- Ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας σε όλο τον όγκο του θερμοκηπίου
- Μη υψηλή κατανάλωση ενέργειας από το σύστημα

Αερόθερμα:

Τα αερόθερμα εντάσσονται στην κατηγορία των τοπικών συστημάτων θέρμανσης και αποτελούν συνήθη τεχνολογία των θερμοκηπίων διότι παρέχουν μια πληθώρα πλεονεκτημάτων μεταξύ των οποίων είναι τα εξής [2], [5], [8], [11] :

- Χαμηλό κόστος αρχικής εγκατάστασης και συντήρησης συγκριτικά με την κεντρική θέρμανση με νερό.
- Καλή ομοιομορφία θέρμανσης και γρήγορη θέρμανση του χώρου
- Μικρές διαστάσεις
- Υψηλή αποδοτικότητα
- Αυξημένη αυτοματοποίηση
- Δεν παρουσιάζει αδράνεια στην αλλαγή της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα

Από την άλλη πλευρά παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα:

- Μείωση σχετικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου
- Άμεση ψύξη του χώρου σε περίπτωση βλάβης κυρίως σε ψυχρά κλίματα
- Η θερμότητα μεταδίδεται σε μικρότερο ποσοστό στο έδαφος
- Υψηλή κατανάλωση ηλεκτρισμού που φτάνει έως το 15% της απαιτούμενης ενέργειας
- Κίνδυνος έκθεσης της καλλιέργειας σε καυσαέρια



Εικόνα 6.1: Αερόθερμο οροφής [2]

Κεντρικά συστήματα θέρμανσης:

Τα κεντρικά συστήματα θέρμανσης καταλαμβάνουν τον περισσότερο χώρο της εγκατάστασης. Χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον σε θερμοκήπια μεγάλης έκτασης τα οποία διαθέτουν γυαλί ως υλικό κάλυψης. Τα μεγαλύτερα ποσά θερμότητας εντοπίζονται στο κέντρο του θερμοκηπίου και όχι περιμετρικά. Επομένως ένα μέρος των σωληνώσεων απαιτείται να τοποθετηθεί δίπλα στο κάλυμμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα συγκεκριμένα συστήματα να μην προτιμώνται σε θερμοκήπια με περίβλημα PE διότι εμφανίζουν υψηλή διαπερατότητα στην ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που εκπέμπεται από τις σωληνώσεις έχοντας ως συνέπεια μεγάλες απώλειες θερμότητας [5].

Κεντρικό σύστημα θέρμανσης με σωληνώσεις θερμού νερού:

Η ορθή σχεδίαση αυτών των συστημάτων οδηγεί σε ικανοποιητική θέρμανση του αέρα και του εδάφους καθώς και σε μεγαλύτερη ομοιομορφία της θερμοκρασίας στον χώρο του θερμοκηπίου. Η καλύτερη στρωματοποίηση της θερμοκρασίας επιφέρει μειωμένες ενεργειακές απώλειες. Παρόλα αυτά εκδηλώνουν το μειονέκτημα της υψηλής θερμικής αδράνειας συγκριτικά με το σύστημα θερμού αέρα. Τα εν λόγω συστήματα θέρμανσης προϋποθέτουν λέβητα, βαλβίδες και διάφορα άλλα εξαρτήματα.

Η παραγωγή της θερμότητας γίνεται σε boiler σε σταθερή θέση μέσα ή έξω από την θερμοκηπιακή μονάδα. Το μέσο μετάδοσης της ενέργειας είναι το νερό που καταλήγει στο θερμοκήπιο με τη βοήθεια σωληνώσεων. Οι σωλήνες αποτελούνται συνήθως από χάλυβα διαμέτρου 5 cm. Καταλαμβάνουν χώρο σε όλη τη μονάδα δημιουργώντας μια μεγάλη στερεά επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας με τους μηχανισμούς της συναγωγής και της ακτινοβολίας. Το μήκος των σωληνώσεων είναι κατά βάση το διπλάσιο από το μήκος της περιμέτρου του θερμοκηπίου.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η θερμότητα εσωτερικά του θερμοκηπίου χάνεται ταχύτερα στην περιφέρεια από ότι στα κεντρικά. Επομένως για να μειωθεί η θερμοκρασιακή στρωματοποίηση το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας θα πρέπει να μεταφέρεται περιφερειακά με χρήση μεγάλου μήκους σωλήνων. Η τοποθέτηση του συνόλου των σωλήνων περιμετρικά δεν είναι η ενδεδειγμένη λύση καθώς οι ψυχρές επιφάνειες της οροφής προκαλούν τοπικά ψυχρές θέσεις εντός του θερμοκηπίου. Γενικά το 33% των σωληνώσεων (μεταξύ 2 και 6 σειρών) τοποθετείται κατά τη περίμετρο του

θερμοκηπίου ενώ τα 2/3 των σωλήνων τοποθετούνται εσωτερικά και χαμηλά στον φυτικό θόλο ή μεταξύ των φυτών και της οροφής. Μία άλλη κατηγορία μέσων μεταφοράς της παραγόμενης στο λέβητα θερμότητας είναι οι πτερυγιοφόροι σωλήνες οι οποίοι επιτρέπουν μεγαλύτερη μεταφορά θερμότητας ανά μονάδα μήκους σε σχέση με τους χαλύβδινους [2], [5], [8].



Εικόνα 6.2: Σωληνώσεις κεντρικού συστήματος θέρμανσης [5]

Κεντρικό σύστημα θέρμανσης με σωληνώσεις ατμού:

Αντίθετα με τα κεντρικά συστήματα θέρμανσης με θερμό νερό διακρίνονται από μεγαλύτερο βαθμό πολυπλοκότητας κατά την εγκατάστασή τους και προϋποθέτουν περισσότερη συντήρηση. Τα συστήματα θέρμανσης με ατμό προϋποθέτουν μεγαλύτερο επενδυτικό κεφάλαιο ενώ έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται πρωτίστως στη Β. Ευρώπη διότι ο ατμός δύναται να μεταφερθεί αποδοτικά σε μεγάλες αποστάσεις. Οι σωλήνες ατμού όσο λειτουργεί το σύστημα θέρμανσης φτάνουν σε θερμοκρασία 102^ο C σε πίεση σχεδόν 25 Pa, σε αντίθεση με τους σωλήνες θερμού νερού που αναπτύσσουν χαμηλότερη θερμοκρασία (85- 95^ο C). Η μετατροπή της λανθάνουσας θερμότητας σε αισθητή μέσω της συμπύκνωσης του νερού

εντός των σωληνώσεων έχει ως συνέπεια την ανάγκη για μικρότερη επιφάνεια σωλήνα για την απόδοση ίδιας ποσότητας ενέργειας εντός του θερμοκηπίου, σε σχέση με τα συστήματα θερμού νερού. Αυτή η μείωση του εμβαδού επιφέρει οικονομία στον χώρο που καταλαμβάνουν τα συγκεκριμένα συστήματα θέρμανσης. Επιπροσθέτως, ο ατμός κατά τη ροή του διαμέσου των σωληνώσεων αντιμετωπίζει μικρότερες αντιστάσεις απ' όσο τα συστήματα θερμού νερού και οι σωλήνες διακρίνονται από μικρότερες διαστάσεις (διάμετρος 2.5 – 4 cm) [2], [5], [8].

6.3 Συστήματα θέρμανσης με ΑΠΕ:

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, η λειτουργία ενός συστήματος θέρμανσης είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την κάλυψη των θερμικών αναγκών του θερμοκηπίου και επομένως για την ομαλή ανάπτυξη της καλλιέργειας. Η κατανάλωση καυσίμων αποτελεί έναν σημαντικό οικονομικό παράγοντα τον οποίο οφείλουν να σεβαστούν οι μελετητές και οι παραγωγοί προτού προβούν στην εγκατάσταση ενός συμβατικού συστήματος θέρμανσης. Αυτό το πρόβλημα είναι ικανό να επιλυθεί με τη βοήθεια εναλλακτικών τεχνικών θέρμανσης.

Τα τελευταία χρόνια οι τεχνολογίες θέρμανσης με ΑΠΕ (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας) έχουν εμφανιστεί στο προσκήνιο, ως επακόλουθο του υψηλού κόστους και της περιορισμένης διαθεσιμότητας των συμβατικών καυσίμων.

Οι ΑΠΕ προσφέρουν μια σειρά από πλεονεκτήματα τα οποία τις καθιστούν ιδιαίτερα δημοφιλείς ως μέσο θέρμανσης των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων.

- Είναι ανεξάντλητες και δρουν θετικά προς την κατεύθυνση απαγκίστρωσης από τους κλασικούς ενεργειακούς πόρους (πχ. Ορυκτά καύσιμα) οι οποίοι σταδιακά εξαντλούνται.
- Διαθέτουν χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν σχετίζεται με μεταβολές της οικονομίας και πιο ειδικά με τις τιμές των συμβατικών καυσίμων εξοικονομώντας ενέργεια κατά αυτόν τον τρόπο.
- Δεν μολύνουν το περιβάλλον
- Ταξινομούνται στις πράσινες μορφές ενέργειας διότι προκαλούν μηδενική εξάντληση των επίγειων αποθεμάτων και ελάχιστες εκπομπές αερίων ρύπων κατά την χρησιμοποίησή τους.

Τα μειονεκτήματα τους είναι τα ακόλουθα:

- Εμφανίζουν αυξομειώσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας στη διαθεσιμότητα τους απαιτώντας την ύπαρξη εναλλακτικών μορφών ενεργειακών πηγών.
- Κοστοβόρα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και εγκαταστάσεων εκμετάλλευσής τους.

Η απόδοση των συστημάτων ΑΠΕ είναι άμεση συνάρτηση των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή καθώς και των χαρακτηριστικών της καλλιέργειας. Οι θερμικές ανάγκες του θερμοκηπίου μπορούν να καλυφθούν σε ικανοποιητικό βαθμό μέσα από την ηλιακή ενέργεια, κατά κύριο λόγο, και με τη βοήθεια της γεωθερμικής ενέργειας, της βιομάζας και της αιολικής ενέργειας [26].

Η γεωθερμική ενέργεια αναφέρεται στην θερμότητα που εντοπίζεται στα πιο βαθιά τμήματα του υπεδάφους και περιέχεται σε φυσικούς ατμούς και στα θερμά νερά. Το νερό αποτελεί το συνηθέστερο ρευστό μεταφοράς, από το υπέδαφος προς την επιφάνεια με τη βοήθεια γεωτρήσεων ή απλών διεξόδων, της συγκεκριμένης μορφής ενέργειας.

Η θέρμανση των θερμοκηπίων οφείλεται στα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας. Τα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας εντοπίζονται σε ιζηματογενείς λεκάνες ή τεκτονικά βυθίσματα και έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων θερμών νερών. Σε αυτή την περίπτωση η άντληση του ρευστού που περιέχει την θερμική ενέργεια πραγματοποιείται με χρήση αγωγών. Η γεωθερμία ως τρόπος κάλυψης των θερμικών αναγκών της θερμοκηπιακής μονάδας χαρακτηρίζεται από διάφορα πλεονεκτήματα [12]:

- Υψηλός βαθμός συσχέτισης των περιοχών με εντοπισμένα γεωθερμικά πεδία και των περιοχών που είναι κατάλληλες για εγκατάσταση θερμοκηπίων.
- Τα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας συνιστώνται για θέρμανση θερμοκηπιακών μονάδων.
- Τα συστήματα θέρμανσης δεν είναι ιδιαίτερα σύνθετα.
- Η γεωθερμική ενέργεια περιγράφεται ως οικονομικός τρόπος θέρμανσης.

Το κυριότερο μειονέκτημα της γεωθερμίας αφορά στην υψηλή αλατότητα από την οποία διακρίνεται το γεωθερμικό νερό. Τα διάφορα πετρώματα ενισχύουν το μέσο με

άλατα τα οποία δρουν διαβρωτικά στα συνήθη μέταλλα με αποτέλεσμα να απαιτείται η χρήση εναλλακτών από πιο ακριβά μέταλλα.

Η βιομάζα έχει βιολογική προέλευση. Είναι ανεξάντλητη και φιλική προς το περιβάλλον ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Η συνεχής ανανέωση της οφείλεται στην ικανότητα των φυτών να φωτοσυνθέτουν. Τη βιομάζα απαρτίζουν όλα τα προϊόντα και υποπροϊόντα φυτικής αλλά και ζωικής προέλευσης σε συνδυασμό με μερικά αστικά λύματα [8].

Οι πιο κύριες μέθοδοι παραγωγής ενέργειας από βιομάζα είναι η πρωτίστως η καύση της οργανικής ουσίας και δευτερευόντως η αεριοποίηση. Η καύση της βιομάζας επιφέρει τη δημιουργία ιδιαίτερα θερμών αερίων (800 οC έως 1000 οC).

Παρά την ευκολία και την απλότητα της συγκεκριμένης μορφής ενέργειας, η βιομάζα δεν κατέχει τα ηνία ως τεχνική θέρμανσης των θερμοκηπίων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η βιομάζα περιγράφεται από χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, δημιουργώντας έτσι την απαίτηση για σημαντικά μεγαλύτερες ποσότητες θέρμανσης των θερμοκηπιακών καλλιεργειών με αποτέλεσμα να κρίνεται ως αντισυμβατική μέθοδος [2], [5].

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται ευρέως, ούσα η πιο δημοφιλής μορφή ΑΠΕ για κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των θερμοκηπίων. Ο ήλιος συνιστά μία ανεξάντλητη πηγή ενέργειας η οποία είναι συνήθως εύκολα προσβάσιμη. Ειδικότερα στην Ελλάδα, οι υψηλές τιμές ηλιοφάνειας που επικρατούν, οδηγούν σε πιο αποδοτική αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας σε εφαρμογές θέρμανσης θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων. Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα που απορρέουν από την χρησιμοποίηση της ηλιακής ενέργειας συνοψίζονται παρακάτω.

- Μηδενικό κόστος πρώτης ύλης (ήλιος).
- Δεν απαιτείται επεξεργασία της πρώτης ύλης
- Δεν υπάρχει μεταφορικό κόστος
- Φιλική προς το περιβάλλον

Το πιο μεγάλο μειονέκτημα της ηλιακής ενέργειας αφορά το γεγονός ότι διατίθεται αποκλειστικά κατά τη διάρκεια της ημέρας και η ποσότητα της είναι άμεση συνάρτηση των διαφόρων εποχών του έτους καθώς και των περιβαλλοντικών συνθηκών της εκάστοτε περιοχής. Το χειμώνα επικρατούν μικρότερες τιμές ενώ το καλοκαίρι

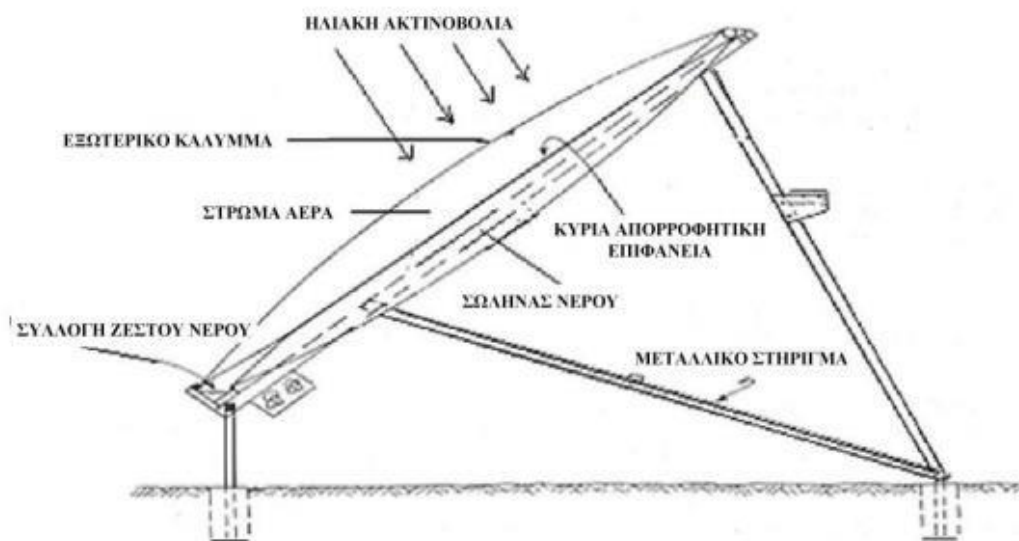
μεγαλύτερες έχοντας ως συνέπεια την αδυναμία συγχρονισμού της παροχής και ζήτησης ενέργειας για θέρμανση η οποία απαιτείται κυρίως τους χειμερινούς μήνες και τις νυχτερινές ώρες. Η απουσία σταθερότητας στη διάθεση της ηλιακής ενέργειας δημιουργεί την ανάγκη χρησιμοποίησης όχι μόνο συστημάτων συλλογής αλλά και αποθηκών της ενέργειας για βραχυχρόνια ή μακροχρόνια χρήση. Τα θερμοκήπια που χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για κάλυψη των θερμικών τους αναγκών διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα ενεργητικά και τα παθητικά ηλιακά θερμοκήπια [2], [5], [8], [11].

Ενεργητικά συστήματα θέρμανσης:

Τα ενεργητικά ηλιακά θερμοκήπια περιλαμβάνουν ηλιακά συστήματα τα οποία αποτελούνται από ένα σύστημα συλλογής και μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα το οποίο βρίσκεται εκτός θερμοκηπίου συνδυαζόμενο με ένα ανεξάρτητο σύστημα αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας [2].

Τα ενεργητικά συστήματα θέρμανσης δεν είναι τόσο δημοφιλή συγκριτικά με τα παθητικά και η χρησιμοποίησή τους στα θερμοκήπια είναι περιορισμένη ενώ κρίνεται ακατάλληλη όσον αφορά εγκαταστάσεις μικρών διαστάσεων. Τα μειονεκτήματα αυτών των συστημάτων είναι τα εξής:

- Υψηλό κόστος ηλιακών συσσωρευτών
- Καταλαμβάνουν μεγάλο ποσοστό εδάφους
- Απαραίτητη ύπαρξη εφεδρικού συστήματος
- Σύστημα αποθήκευσης και διανομής θερμότητας στο χώρο του θερμοκηπίου



Εικόνα 6.3: Εξωτερικός ηλιακός συλλέκτης για τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας [25]

Παθητικά συστήματα θέρμανσης:

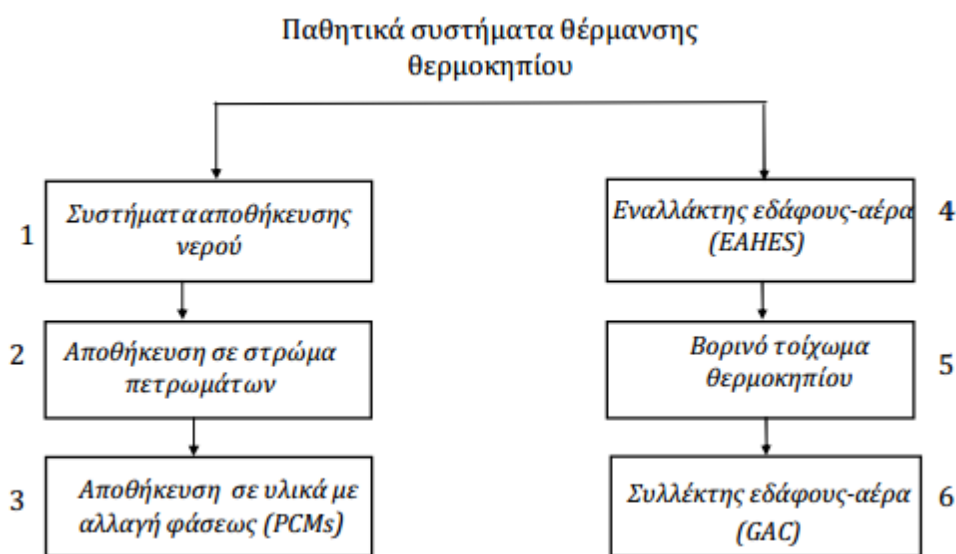
Αντίθετα με τα ενεργητικά συστήματα θέρμανσης, τα παθητικά συστήματα θέρμανσης διαθέτουν το σύστημα συλλογής θερμότητας εντός του θερμοκηπίου, ενώ και το ίδιο το θερμοκήπιο είναι ικανό να χρησιμοποιηθεί ως συλλέκτης εφόσον σχεδιάζεται με σκοπό τη μεγιστοποίηση των ηλιακών κερδών. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα διακρίνονται βάσει των χαρακτηριστικών του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας. Ως μέσα αποθήκευσης θερμότητας έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα υλικά τα οποία παρατίθενται παρακάτω [2], [30].

- Νερό
- Λανθάνουσα θερμότητα
- Διάφορα πετρώματα
- Υπέδαφος του θερμοκηπίου (θαμμένοι σωλήνες).

Τα παθητικά συστήματα θέρμανσης χαρακτηρίζονται από σημαντικά μικρότερο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας σε αντίθεση με τα ενεργητικά συστήματα. Τα παθητικά συστήματα χρησιμοποιούνται για αύξηση της αποθηκευμένης θερμότητας μέσα στο θερμοκήπιο κατά την ημέρα είτε για αφαίρεση και μετάδοση της πρόσθετης θερμότητας από το θερμοκήπιο σε περιοχή αποθήκευσης ενέργειας. Η θερμότητα που

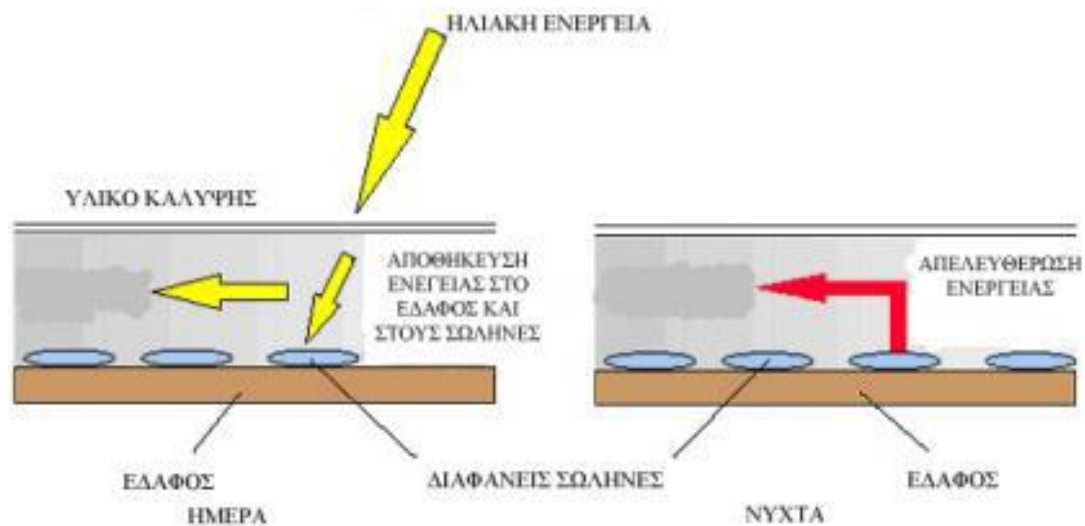
αποθηκεύτηκε κατά τη διάρκεια της ημέρας απελευθερώνεται τη νύχτα εντός του θερμοκηπίου προκειμένου να ικανοποιηθούν οι θερμικές του ανάγκες.

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα τυγχάνουν ιδιαίτερης αναγνώρισης διότι δεν είναι πολύπλοκα, διακρίνονται από μειωμένο κόστος και λειτουργούν φυσικά δίχως να είναι απαραίτητη η χρήση εξωτερικών πηγών ενέργειας. Οι πιο συνήθεις τεχνολογίες αφορούν στα συστήματα αποθήκευσης νερού, χρήσης θερμικών αποθηκευτικών μονάδων από στρώματα πετρωμάτων καθώς και αποθήκευση σε υλικά αλλαγής φάσεως (PCMs). Επιπροσθέτως, άλλα σημαντικά παθητικά συστήματα θέρμανσης που έχουν εφαρμοστεί για την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου σε νυχτερινές συνθήκες είναι ο εναλλάκτης εδάφους – αέρα (EAHES), η κινητή μόνωση – κουρτίνες εξοικονόμησης ενέργειας, και η αποθήκευση θερμότητας στο βόρειο τοίχωμα του θερμοκηπίου [2], [5], [29].



Εικόνα 6.4: Διάφοροι τύποι παθητικών συστημάτων θέρμανσης [2]

Παρακάτω απεικονίζεται ο τρόπος λειτουργίας ενός παθητικού ηλιακού συστήματος θέρμανσης.



Εικόνα 6.5: Τρόπος λειτουργίας του παθητικού ηλιακού συστήματος θέρμανσης [8]



Εικόνα 6.6: Παθητικό ηλιακό σύστημα με πλαστικές σακούλες [11]

Υβριδικά συστήματα θέρμανσης:

Τα ηλιακά συστήματα σε θερμοκήπια βρίσκουν εφαρμογή σε πολλές περιπτώσεις (υπάρχουν σχεδόν 50000 ha ηλιακών θερμοκηπίων σε ευρωπαϊκό επίπεδο) δίχως να

εμφανίζουν υψηλά ποσοστά επιτυχίας, διότι χαρακτηρίζονται από μεγάλο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Όπως προέκυψε στο προηγούμενο κεφάλαιο από τα αποτελέσματα της ενεργειακής μας μελέτης, η ηλιακή ενέργεια δεν έχει την δυνατότητα να καλύψει, από μόνη της, το σύνολο των θερμικών απαιτήσεων του θερμοκηπίου. Σε αντίθετη περίπτωση το μοντέλο μας θα εμφάνιζε αποκλειστικά μηδενικές θερμικές ανάγκες για κάθε ώρα ($Q_h = 0$). Έχει εκτιμηθεί ότι το βέλτιστο ποσοστό κάλυψης θερμικών αναγκών κυμαίνεται από 50-60% έως 10-12%. Το μεγάλο εύρος οφείλεται στην αύξηση των θερμικών αναγκών σε ψυχρότερα κλίματα (χαμηλότερη εξωτερική θερμοκρασία \rightarrow μεγαλύτερες ενεργειακές απώλειες). Η ηλιακή ενέργεια είναι προτιμότερο να συνδυαστεί σε υβριδικά συστήματα με άλλα συστήματα θέρμανσης. Σε ένα υβριδικό ενεργειακό σύστημα, χρησιμοποιούνται δύο ή παραπάνω διαφορετικές ενεργειακές πηγές, ανανεώσιμες ή συμβατικές, προκειμένου να παράγουν θερμότητα με απώτερο σκοπό την κάλυψη των ίδιων επιπέδων ζήτησης. Επομένως, η βέλτιστη επιλογή είναι η λειτουργία ενός πρόσθετου συμβατικού συστήματος θέρμανσης που παράγει μικρά ποσά ενέργειας (πχ αερόθερμο) προκειμένου να δράσει υποστηρικτικά ως προς το παθητικό ηλιακό σύστημα [5], [8].

6.4 Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου:

Στα συμβατικά συστήματα θέρμανσης τα χρησιμοποιούμενα καύσιμα είναι σε στερεά μορφή (γαιάνθρακες), σε υγρή μορφή (μαζούτ) και σε αέρια (υγραέριο). Η επιλογή ή μη του καθενός εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως η διαθεσιμότητα του ανά περιοχή, η τιμή του καθώς και το πόσο φιλικό είναι προς το περιβάλλον [3].

Το πιο δημοφιλές καύσιμο είναι το γαϊαέριο διότι μέσω αυτού καθίσταται εύκολη η αυτοματοποίηση της λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης. Επιπλέον, χαρακτηρίζεται από μικρό κόστος εγκατάστασης, δεν απαιτούνται δοχεία αποθήκευσης και καίγεται με μεγάλη απόδοση με αποτέλεσμα μικρότερη ανάγκη συντήρησης του καυστήρα [3].

Στη συνέχεια, τα πιο χρησιμοποιούμενα καύσιμα είναι το πετρέλαιο και το μαζούτ. Παρότι συμβάλλουν στην αυτοματοποίηση του συστήματος θέρμανσης, αυξάνουν τις ανάγκες συντήρησης του καυστήρα (κάθε 10 ημέρες).

Οι καυστήρες γαιάνθρακα και ξύλου χρησιμοποιούνται επίσης αποτελεσματικά στη θέρμανση του θερμοκηπίου. Στην πλειοψηφία τους αυτοματοποιούνται εύκολα αλλά απαιτούν μεγάλο αποθηκευτικό χώρο για τα καύσιμα και περισσότερη εργασία συντήρησης. Η αποδοτικότητα καύσης του ξύλου εκτιμάται σε 60% ενώ του πετρελαίου σε 70%. Είναι κοινά αποδεκτό ότι 1 τόνος ξύλου ισοδυναμεί με 400 lit πετρελαίου. Συνεπώς για χαμηλή τιμή του ξύλου ή του γαιάνθρακα εξασφαλίζεται σημαντική οικονομία [3].

Εφόσον οι απαιτήσεις ενέργειας για θέρμανση έχουν υπολογιστεί από το μοντέλο μας, η απαραίτητη ποσότητα του καυσίμου (F) μπορεί να προσδιοριστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$F = Qh * \frac{3600}{n * Qf} \quad (\text{kg ή lit}) \quad (6.1)$$

Qh: Η συνολικά απαιτούμενη ενέργεια για θέρμανση σύμφωνα με το μοντέλο (kWh).

n: Η αποδοτικότητα της παραγόμενης θερμότητας και της μεταφοράς της στο θερμοκήπιο

Qf: Η κατώτερη θερμογόνος τιμή του καυσίμου (kJ/ lit ή kg).

Αν η καύση πραγματοποιείται σε καυστήρα εντός του θερμοκηπίου, τότε το n εκφράζει την απόδοση του καυστήρα, ενώ αν η θερμότητα παράγεται εκτός του θερμοκηπίου και μεταφέρεται σε αυτό, τότε στο n περικλείονται και οι απώλειες ενέργειας κατά τη μεταφορά.

Στερεό καύσιμο	Μέση θερμογόνος τιμή		Πυκνότητα [kg/m ³]
	[kJ/kg]	[kcal/kg]	
Ανθρακίτης	31980	7650	850-1000
Καστανό κάρβουνο (υψηλής ποιότητας)	20900	5000	600
Καστανό κάρβουνο (χαμηλής ποιότητας)	7520	1800	600
Λιγνίτης	16000	3800	600
Τύρφη ξανθή	15470	3700	300-400
Καυσόξυλα(σκληρά ξύλα)	14630	3500	400-600
Καυσόξυλα(μαλακά ξύλα)	12500	3000	
Κωκ (Cooking coal)	28010	6700	340-450

Πίνακας 6.1: Θερμογόνος δύναμη στερεών καυσίμων

Υγρό καύσιμο	Καθαρή θερμογόνος τιμή		Πυκνότητα [kg/m ³]
	[kJ/l]	[kJ/kg]	
Βενζίνη	30290	42220	0,724
Καθαρό πετρέλαιο	33570	42050	0,780
Πετρέλαιο μεταφορών και θέρμανσης	35570	42600	0,835
Πετρέλαιο ελαφρύ θέρμανσης	36370	42050	0,865
Πετρέλαιο βαρύ θέρμανσης (μαζούτ)		40960	0,940

Πίνακας 6.2: Θερμογόνος δύναμη υγρών καυσίμων

6.5 Πίνακας επιλογής συστημάτων θέρμανσης:

Σύστημα / Περιοχή	Χανιά	Καλαμάτα	Θεσσαλονίκη	Φλώρινα
Αερόθερμο	***	***	**	*
ΚΣΘ (νερό)	**	**	***	***
ΚΣΘ (ατμός)	*	*	*	*
Βιομάζα	*	*	*	*
Γεωθερμία	*	*	*	*
Ηλιακή Ενέργεια	***	***	**	**
Υβριδικά ηλιακά συστήματα	***	***	***	***

Πίνακας 6.3: Πίνακας προτιμήσεων τεχνολογιών θέρμανσης ανά περιοχή

*** : Ισχυρή προτίμηση

** : Μέτρια προτίμηση

* : Αδιάφορη προτίμηση

Ο παραπάνω πίνακας έχει καταρτιστεί σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών θέρμανσης, όπως αυτά αποτυπώθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο, καθώς και στη

βάση των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν από το μοντέλο για τις συγκεκριμένες περιοχές της χώρας.

Οι θερμάστρες συναγωγής δεν αναφέρονται διότι είναι μία αρκετά ερασιτεχνική μέθοδος θέρμανσης η οποία αποσκοπεί μονάχα στην αποτροπή δημιουργίας παγετού εντός του θερμοκηπίου και όχι στην διασφάλιση περεταίρω κατάλληλων συνθηκών για διασφάλιση της ομαλής ανάπτυξης της καλλιέργειας.

Η σχετικά μικρή έκταση του θερμοκηπίου (150m^2) κάνει περισσότερο προτιμητέα την επιλογή ενός τοπικού συστήματος θέρμανσης. Έτσι λοιπόν επιλέγεται το αερόθερμο διότι διακρίνεται από χαμηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης το οποίο σε συνδυασμό με την καλύτερη θερμοκρασιακή στρωματοποίηση (μειωμένες απώλειες) και τη μικρή διαστασιολόγηση, το καθιστά ιδιαίτερα ελκυστική λύση. Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας είναι η γρήγορη ανταπόκριση που εμφανίζει στην αλλαγή θερμοκρασίας με αποτέλεσμα να προσαρμόζεται στα ωριαία δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο (αυτό ως ανάδραση σε περίπτωση που διευρυνθεί το μοντέλο λαμβάνοντας περιβαλλοντικές τιμές από αισθητήρες). Το αερόθερμο δεν κρίνεται τόσο συμφέρον στις περιοχές με ψυχρότερα κλίματα (Θεσσαλονίκη, Φλώρινα) διότι μια ενδεχόμενη βλάβη επιφέρει άμεση ψύξη που θα οδηγήσει σε πολύ μεγαλύτερες θερμικές απώλειες σε αυτές τις περιοχές έχοντας ως συνέπεια την καταστροφή της καλλιέργειας.

Το κεντρικό σύστημα θέρμανσης με σωληνώσεις θερμού νερού θα προτιμάται κυρίως στις βόρειες περιοχές διότι μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερα ποσά θερμότητας που εκεί είναι περισσότερο αναγκαία για κάλυψη των θερμικών απαιτήσεων. Επιπρόσθετα είναι πιο απλά και οικονομικά από τα αντίστοιχα συστήματα ατμού που χρησιμοποιούνται συνήθως στη Βόρεια Ευρώπη.

Η ηλιακή ενέργεια ως η πλέον χρησιμοποιούμενη μορφή ΑΠΕ, αποτελεί βέλτιστη λύση στα Χανιά και στη Καλαμάτα λόγω των υψηλότερων ποσών ηλιακής ακτινοβολίας που επικρατούν εκεί. Η ηλιακή ενέργεια τις ώρες κατά την διάρκεια της ημέρας που υπερκαλύπτει τις θερμικές απώλειες ($Q_h < 0 \rightarrow Q_h = 0$) μπορεί να αποθηκευτεί σε κάποιο ηλιακό σύστημα θέρμανσης (πχ υλικά αλλαγής φάσης) προκειμένου να απελευθερωθεί τις νυχτερινές ώρες κατά τις οποίες απαιτείται θέρμανση σύμφωνα με το μοντέλο ($Q_h > 0$).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ

7.1 Εισαγωγή:

Είναι κοινά αποδεκτό ότι η ψύξη ενός θερμοκηπίου είναι πιο σύνθετη και απαιτητική διαδικασία από την θέρμανση. Η ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από το θερμοκήπιο αυξάνει τις ενεργειακές ανάγκες για ψύξη. Σε χώρες όπως η Ελλάδα η εκτίμηση των ψυκτικών αναγκών είναι μείζονος σημασίας για την ομαλή ανάπτυξη της καλλιέργειας. Εφόσον οι ψυκτικές ανάγκες έχουν εκτιμηθεί από το μοντέλο, το επόμενο βήμα είναι η ανασκόπηση των μεθόδων μέσω των οποίων μπορούν αυτές να ικανοποιηθούν. Η ψύξη στα θερμοκήπια περιλαμβάνει τις έννοιες του αερισμού και του δροσισμού.

7.2 Αερισμός:

Ο αερισμός μίας θερμοκηπιακής μονάδας έχει δύο διαφορετικές μορφές. Πρώτον αφορά στην ανάδευση του εσωτερικού αέρα με στόχο την θερμοκρασιακή ομοιομορφία σε όλο τον χώρο του θερμοκηπίου. Δεύτερον, αναφέρεται στον ρυθμό ανανέωσης του θερμού αέρα του θερμοκηπίου με τον αέρα του περιβάλλοντος. Αυτή η μορφή αερισμού καλείται εξαερισμός. Με χρήση του εξαερισμού επιτυγχάνεται αφενός η πτώση της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου κατά την καλοκαιρινή περίοδο, σε ανεκτά για την καλλιέργεια επίπεδα και αφετέρου η μείωση της υγρασίας καθώς και η τροποποίηση των επιπέδων συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα [2], [14].

Οι κλιματολογικές συνθήκες στην Ελλάδα επιβάλλουν συχνά την ανάγκη για εξαερισμό από την άνοιξη έως το φθινόπωρο. Ακόμα και σε χειμερινές συνθήκες, στις νότιες περιοχές υπάρχουν ώρες κατά τις οποίες το θερμοκήπιο πρέπει να ψυχθεί. Τα βασικά χαρακτηριστικά που καθιστούν αποδοτικό ένα σύστημα εξαερισμού είναι τα ακόλουθα:

- ✓ Αποδεκτή ισχύς, προκειμένου να περιορίζεται η αύξηση της θερμοκρασίας κατά τις θερμές ημέρες του καλοκαιριού
- ✓ Δημιουργία ομοιομορφίας στην θερμοκρασία εντός του θερμοκηπίου
- ✓ Χαμηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας
- ✓ Απλότητα, αξιοπιστία, αυτοματοποίηση

Διακρίνονται δύο είδη εξαερισμού:

1. Φυσικός αερισμός κατά τον οποίον ο αέρας κινείται με δυναμικό τις διαφορές πίεσης οι οποίες προκύπτουν από ανέμους και θερμοκρασιακές διαφορές εντός και εκτός του θερμοκηπίου.
2. Δυναμικός εξαερισμός στον οποίον οι διαφορές πίεσης που μετακινούν τον αέρα οφείλονται σε ηλεκτροκίνητους ανεμιστήρες.

Οι ανάγκες για εξαερισμό αποτελούν συνάρτηση πολλών παραγόντων μεταξύ των οποίων διακρίνονται οι εξής:

- Η θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος
- Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία
- Η μέγιστη θερμοκρασία ανάπτυξης της καλλιέργειας
- Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του θερμοκηπίου
- Ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής από τα φυτά

7.2.1 Φυσικός Αερισμός

Ο φυσικός αερισμός του θερμοκηπίου αποτελεί παράγοντα μείζονος σημασίας για τον έλεγχο του κλίματος του. Περιλαμβάνει ένα ρεύμα αέρα το οποίο κινείται από σταθερά πεδία πίεσης δημιουργούμενα από τον άνεμο, μια τυρβώδη ροή που κινείται από διακυμάνσεις πιέσεων του αέρα και ένα φαινόμενο ανομοιομορφίας που οφείλεται σε δυνάμεις άνωσης και σε διαφορές θερμοκρασίας. Ο φυσικός αερισμός αποτελεί τη πιο συνήθη μέθοδο ανανέωσης του αέρα για τα θερμοκήπια με την πλειοψηφία τους να περιλαμβάνει ένα τέτοιο σύστημα εξαερισμού [24].

Στα περισσότερα πειράματα που αφορούν τον εξαερισμό έχουν χρησιμοποιηθεί tracer τεχνικές οι οποίες περιλαμβάνουν μετρήσεις σε θερμοκήπια που διαθέτουν ανεμιστήρες στην οροφή και πλευρικά του θερμοκηπίου. Παρόλα αυτά οι τεχνικές tracer απαγορεύουν την ταυτοποίηση των στοιχείων της ροής δίχως να μπορούν να προβλέψουν το μοντέλο ροής του αέρα [30].

Ο τρόπος λειτουργίας του φυσικού αερισμού καθορίζεται από την ταχύτητα του ανέμου και από δυνάμεις άνωσης. Πρόσφατη μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι είναι η απαραίτητη η γνώση της σύνδεσης των χαρακτηριστικών του συστήματος εξαερισμού

(πχ διαστάσεις) και των χαρακτηριστικών του ανέμου (ταχύτητα και φορά κίνησης) για την επίτευξη αποδοτικού φυσικού εξαερισμού. Συνεπώς καταδεικνύεται η υψηλή εξάρτηση του ρυθμού ανανέωσης αέρα από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η ταχύτητα και φορά του ανέμου, οι θερμοκρασιακές διαφορές εντός και εκτός θερμοκηπίου και τα ανοίγματα του αερισμού [14].

Τα ανοίγματα φυσικού αερισμού αφορούν κυρίως παράθυρα (πλευρικά ή οροφής) και πόρτες. Για τον ρυθμό φυσικού αερισμού προτείνεται η ακόλουθη σχέση:

$$Q = EAV \quad (7.1)$$

Q: παροχή αέρα [m^3/s]

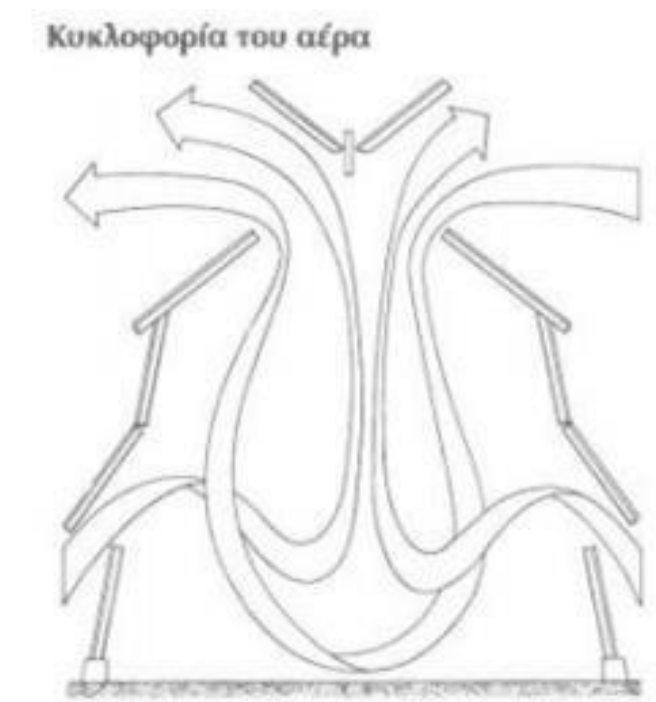
E: απόδοση ανοιγμάτων

A: εμβαδόν ανοίγματος [m^2]

V: ταχύτητα ανέμου [m/s]

Η αντικατάσταση του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου από τον αέρα του περιβάλλοντος επιφέρει αλλαγές σε παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα οι οποίες είναι κύριοι ρυθμιστικοί παράγοντες για την ομαλή ανάπτυξη της καλλιέργειας. Σε χειμερινές συνθήκες ο φυσικός αερισμός λειτουργεί αποβάλλοντας την περιττή υγρασία και προσφέροντας την κατάλληλη ατμόσφαιρα για να αναπτυχθεί η καλλιέργεια. Το καλοκαίρι οι κύριοι λόγοι για αερισμό συγκεντρώνονται γύρω από τον δροσισμό αφαιρώντας την πρόσθετη θερμότητα του θερμοκηπίου. Η γνώση των χαρακτηριστικών εξαερισμού μίας θερμοκηπιακής εγκατάστασης είναι αναγκαία για τον ορθό έλεγχο των εσωτερικών κλιματολογικών συνθηκών της. Ο χαρακτηρισμός του αερισμού γίνεται με βάση τον ρυθμό ανανέωσης ανά ώρα N που εκφράζει τον όγκο του αέρα του θερμοκηπίου που ανανεώνεται σε μία ώρα (1/h).

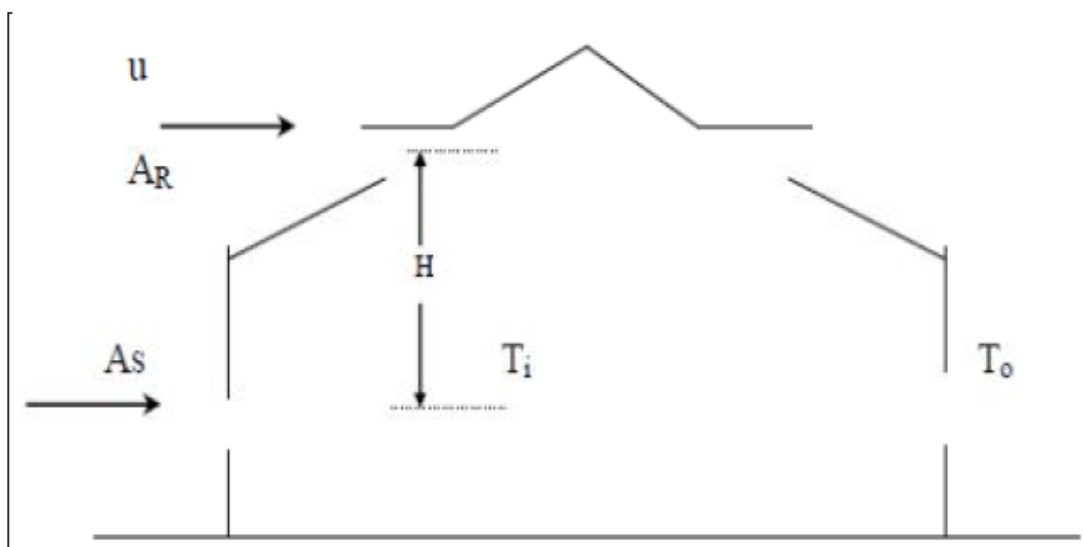
Ο φυσικός αερισμός οφείλει την λειτουργία του στην φυσική αρχή σύμφωνα με την οποία ο πιο ελαφρύς θερμός αέρας του θερμοκηπίου ανέρχεται πάνω και εξέρχεται από τα παράθυρα οροφής και συγχρόνως ο πιο ψυχρός αέρας του περιβάλλοντος εισέρχεται από τα πλευρικά παράθυρα μειώνοντας την θερμοκρασία του χώρου. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ο τρόπος ροής του αέρα σε ένα σύστημα φυσικού αερισμού.



Εικόνα 7.1: Ροή αέρα σε σύστημα φυσικού αερισμού [2]

Στα θερμοκήπια στα οποία βρίσκονται εγκατεστημένα ανοίγματα στην οροφή και στο πλάι ο φυσικός αερισμός έχει ως κινητήριο δύναμη τον συνδυασμό των διαφορών πίεσης οι οποίες γεννώνται από τους παρακάτω παράγοντες [14], [23].

- Δυνάμεις άνωσης που προκύπτουν από θερμοκρασιακές διαφορές (φαινόμενο καμινάδας) μεταξύ του εσωτερικού του θερμοκηπίου και του εξωτερικού του περιβάλλοντος
- Ταχύτητα του ανέμου διότι ο αέρας εισέρχεται από τα πλευρικά παράθυρα με τη μεγαλύτερη πίεση και εξέρχεται από τα απέναντι παράθυρα στα οποία επικρατεί μικρότερη πίεση.



Εικόνα 7.2: Σύστημα φυσικού αερισμού με παράθυρα οροφής και πλευρικά [3]

Η επιφάνεια των ανοιγμάτων φυσικού αερισμού πρέπει να καταλαμβάνει το 25-30% της συνολικής επιφάνειας εδάφους (Aground) ούτως ώστε ο ρυθμός εναλλαγής του αέρα να κρίνεται ικανοποιητικός. Το ελάχιστο ποσοστό επιφάνειας των ανοιγμάτων αερισμού είναι συνάρτηση των κλιματολογικών δεδομένων της περιοχής και του είδους των καλλιεργήσιμων φυτών [15], [20].

Ο βέλτιστος τρόπος φυσικού αερισμού είναι η ταυτόχρονη λειτουργία πλευρικών ανοιγμάτων και παραθύρων οροφής κατά μήκος του θερμοκηπίου. Αυτός ο συνδυασμός επιτρέπει αποδοτικό εξαερισμό, ιδίως τις θερινές περιόδους του έτους. Τα ανοίγματα μπορούν να λειτουργούν αυτοματοποιημένα με χρήση ηλεκτροκινητήρων οι οποίοι εκκινούν με τη βοήθεια θερμοστάτη έπειτα από τη λήψη της επικρατούσας θερμοκρασίας εντός του θερμοκηπίου. Η χρήση ανεμόμετρου κρίνεται απαραίτητη με σκοπό να λαμβάνεται υπόψιν και η ταχύτητα του αέρα, διαφορετικά ένας δυνατός άνεμος είναι ικανός να επιφέρει υπερβολική μείωση της θερμοκρασίας του χώρου. Η λειτουργία αποκλειστικά ενός τέτοιου συστήματος δεν είναι δυνατόν να δημιουργήσει πολύ χαμηλές θερμοκρασίες εντός του θερμοκηπίου, ειδικά τις ημέρες με άπνοια. Η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι συνήθως μεγαλύτερη κατά 6°C σε σχέση με την εξωτερική [14].

Στον χειμερινό σχεδιασμό, τα ανοίγματα οροφής επαρκούν για την ρύθμιση της θερμοκρασίας. Τα πλευρικά παράθυρα πρέπει να παραμένουν κλειστά για την αποτροπή

εισβολής ψυχρού κύματος αέρα το οποίο μπορεί να έχει καταστρεπτικές συνέπειες για τα φυτά. Την άνοιξη και το φθινόπωρο έχει εκτιμηθεί ότι στις ελληνικές συνθήκες είναι απαραίτητες 40 ωριαίες αλλαγές του αέρα του θερμοκηπίου. Το καλοκαίρι όμως, λόγω των υψηλών εξωτερικών θερμοκρασιών, κρίνεται απαραίτητη για την διατήρηση ανεκτών επιπέδων θερμοκρασίας η εφαρμογή δυναμικού εξαερισμού σε συνδυασμό με κάποιο σύστημα δροσισμού [3].

Για τον υπολογισμό του φορτίου αερισμού έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι όπως tracer gas τεχνικές, ενεργειακά ισοζύγια και μετρήσεις διαφορών εσωτερικής και εξωτερικής πίεσης. Το ενεργειακό ισοζύγιο αντιμετωπίζει τον αερισμό ως απώλεια διότι αφαιρεί την πλεονάζουσα ενέργεια που βρίσκεται στο θερμοκήπιο υπό μορφή θερμότητας.

Πολλές μελέτες έχουν αποδείξει τη σημαντικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας στο ρυθμό του εξαερισμού. Σε συνθήκες υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμοκρασία στον χώρο του θερμοκηπίου εμφανίζεται αυξημένη με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγαλύτερος ρυθμός εξαερισμού. Επομένως σε περιοχές με ήπιους ανέμους η θερμοκρασιακή διαφορά έχει μεγαλύτερη επίδραση στον φυσικό αερισμό των θερμοκηπίων. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η παροχή αέρα μέσω ανοιγμάτων σχετίζεται με την διαφορά πίεσης μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος. Διάφοροι μελετητές διεξήγαγαν πειράματα προκειμένου να μετρήσουν τις διαφορές πίεσης που επικρατούν στο εσωτερικό και το εξωτερικό του θερμοκηπίου, ταυτοποιώντας κατά αυτόν τον τρόπο τους συντελεστές πίεσης του αέρα και τις μεταβολές του σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του ανέμου. Εκτιμήθηκε ότι ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα αποτελεί συνάρτηση του συντελεστή πίεσης ανέμου CW [31], [30], [24].

7.2.2 Δυναμικός Εξαερισμός:

Ο φυσικός αερισμός αποτελεί το κύριο μέσο δροσισμού των περισσότερων θερμοκηπίων στις χώρες της Μεσογείου. Αυτή η μέθοδος είναι αποδοτική σε περίπτωση δυνατού ανέμου ή όταν η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος λαμβάνει ως μέγιστη τιμή τους 30ο C και με την προϋπόθεση ότι τα ανοίγματα (πλευρικά και οροφής) επαρκούν σε αριθμό και σε επιφάνεια. Τους θερινούς μήνες, σε συνθήκες άπνοιας, ο φυσικός αερισμός δεν είναι επαρκής.

Ο δυναμικός εξαερισμός στον οποίο η ανανέωση του αέρα του θερμοκηπίου συντελείται κάθε λεπτό είναι πιο αποδοτικός στην ψύξη των θερμοκηπίων στην περίπτωση όπου ο εξωτερικός αέρας είναι αρκετά κρύος ή αρκετά ξηρός. Παρόλα αυτά, τα συστήματα αυτού του είδους εξαερισμού είναι ιδιαίτερα κοστοβόρα λόγω του εξοπλισμού και της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας και συνεπώς η ευρεία χρησιμοποίησή τους είναι δύσκολο να επιτευχθεί.

Με τη βοήθεια του δυναμικού αερισμού υλοποιούνται ωριαίες αλλαγές αέρα μεγαλύτερες των 40 (1/h), γεγονός το οποίο είναι ανέφικτο με τη χρήση συστημάτων φυσικού αερισμού. Έτσι λοιπόν καθίσταται απαραίτητη η χρήση ηλεκτροκίνητων ανεμιστήρων οι οποίοι τοποθετούνται στο τοίχωμα του θερμοκηπίου. Ειδικότερα σε περιοχές με υψηλά ποσά ηλιακής ακτινοβολίας, η επίτευξη θερμοκρασιακής διαφοράς 6°C εντός και εκτός θερμοκηπίου επιβάλλει ρυθμούς ανανέωσης αέρα 60 ανά ώρα [32].

Η εγκατάσταση ηλεκτρικών ανεμιστήρων συμβάλλει στην εναλλαγή του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου ανεξάρτητα από τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στο εξωτερικό περιβάλλον. Η λειτουργία των εξαεριστήρων βασίζεται στην απορρόφηση εξωτερικού αέρα και την διοχέτευση του εντός του θερμοκηπίου, απωθώντας κατά αυτόν τον τρόπο τον αέρα που πρέπει να ανανεωθεί (εξαερισμός με υπερπίεση). Ο πιο συνήθης τρόπος λειτουργίας τους όμως σχετίζεται με την απομάκρυνση του εσωτερικού αέρα της θερμοκηπιακής μονάδας προς το εξωτερικό περιβάλλον. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται υποπίεση, με αποτέλεσμα την εισροή φρέσκου αέρα από τα παράθυρα της απέναντι πλευράς [15].

Η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για μία μονάδα δυναμικού εξαερισμού ανέρχεται σε 15 έως 50 MJ / m² με ισχύ 5 έως 15 W / m². Οι προαναφερθείσες τιμές μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο εξαεριστήρα. Πάνω από 60 ωριαίες αλλαγές αέρα κρίνονται οικονομικά ασύμφορες επομένως αν απαιτείται μεγαλύτερη μείωση της θερμοκρασίας, αυτή μπορεί να επιτευχθεί μέσω συστημάτων σκίασης ή ενός συστήματος δροσισμού με εξάτμιση νερού. Οι απαιτήσεις εξαερισμού για την διατήρηση της θερμοκρασίας εξαρτώνται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, τη μέγιστη δυνατή θερμοκρασία ευδοκίμησης της καλλιέργειας και από το μέγεθος του θερμοκηπίου [2], [3].

Τα θερμοκήπια με εγκατεστημένο σύστημα δυναμικού εξαερισμού προσφέρουν αποδεκτή ανανέωση του αέρα εντός του θερμοκηπίου ιδιαίτερα σε περιπτώσεις άπνοιας και αποτελούν μοναδική λύση σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η δημιουργία και λειτουργία ενός συστήματος φυσικού αερισμού είναι δύσκολη από οικονομικής ή τεχνικής πλευράς.

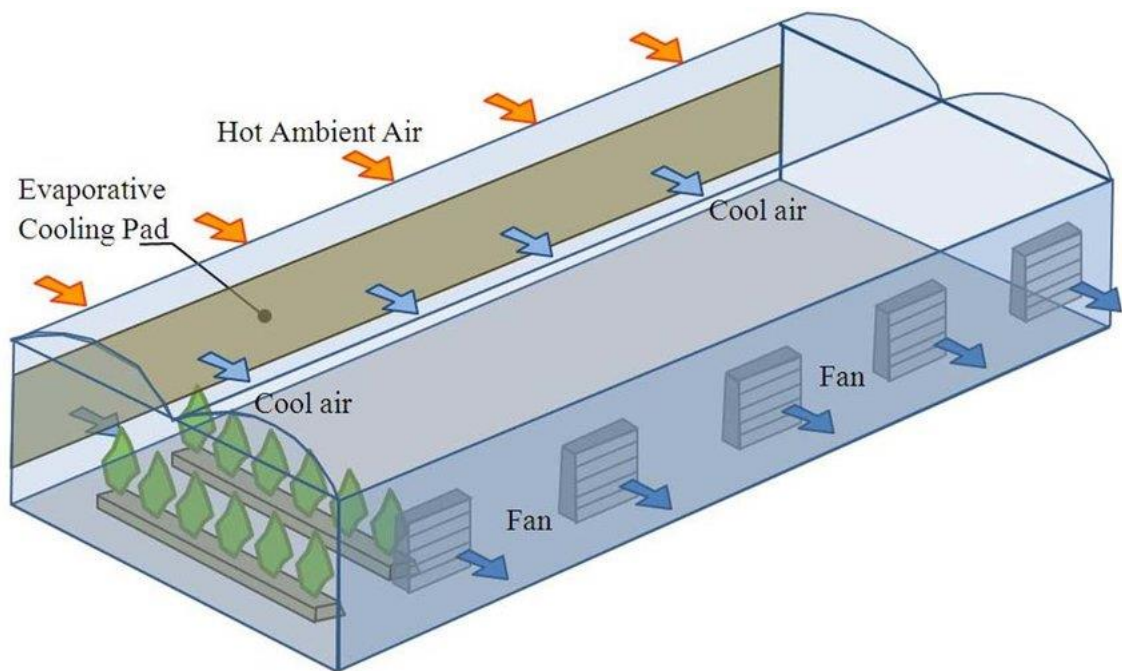
Τέλος, ιδιαίτερη σημασία έχει το γεγονός ότι ο δυναμικός εξαερισμός μπορεί να συνδυαστεί, με μικρές προσθήκες στο θερμοκήπιο, με κάποιο σύστημα δροσισμού με σκοπό τη περαιτέρω μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Παρόλα αυτά, κύριο μειονέκτημα των συστημάτων δυναμικού αερισμού είναι η κατανάλωση μεγάλης ποσότητας ενέργειας το καλοκαίρι, καθώς και η ανάγκη εγκαθίδρυσης του θερμοκηπίου σε περιοχή με παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

7.3 Δροσισμός:

Ο δροσισμός του θερμοκηπίου εμφανίζει αυξανόμενο ενδιαφέρον ειδικά σε χώρες με θερμό κλίμα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και της ελλιπούς πίεσης αέρα που επικρατεί εκεί. Ο φυσικός αερισμός δεν είναι επαρκής για την αποβολή της πλεονάζουσας ενέργειας κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών και επομένως έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για δροσισμό του θερμοκηπίου σε συνδυασμό με τον εξαερισμό προκειμένου να επιτευχθεί ένα ευνοϊκό μικροκλίμα για την ανάπτυξη της καλλιέργειας.

Δύο είναι οι κυριότερες τεχνικές δροσισμού των θερμοκηπίων [20].

- Ψύξη του αέρα πριν την είσοδο του στο θερμοκήπιο κατά την οποία συνδυάζεται το σύστημα δυναμικού εξαερισμού με το σύστημα δροσισμού με υγρή παρεία (Cooling system)
- Τροποποίηση της ηλιακής ενέργειας εντός του θερμοκηπίου σε λανθάνουσα θερμότητα με σκοπό τη μείωση του φορτίου αισθητής θερμότητας. Αναφέρεται στο σύστημα υδρονέφωσης (Fog system).



Εικόνα 7.3: Δροσισμός θερμοκηπίου με σύστημα υγρής παρειάς.



Εικόνα 7.4: Σύστημα δροσισμού με τεχνητή ομίχλη

Ο τρόπος λειτουργίας των συστημάτων υδρονέφωσης στηρίζεται στη μετατροπή της θερμότητας λόγω ηλιακής ακτινοβολίας σε λανθάνουσα θερμότητα με εξάτμιση των σταγονιδίων νερού τα οποία ψεκάζονται από τις ειδικές συσκευές υδρονέφωσης χαμηλής και υψηλής πίεσης. Αναφορικά με την υδρονέφωση χαμηλής πίεσης, τα σταγονίδια νερού διαθέτουν μέγεθος μεγαλύτερο από 200μm και πέφτουν στο έδαφος και στα φυτά. Στη συνέχεια εξατμίζονται ανάλογα με την θερμοκρασία της επιφάνειας πρόσκρουσης. Για την εκτόξευση των σταγονιδίων χρησιμοποιούνται κλασικοί εκτοξευτές ή μικροεκτοξευτές. Για το σύστημα υδρονέφωσης υψηλής πίεσης, τα σταγονίδια του νερού έχουν μικρότερο μέγεθος (δεκάδες μm) και διατηρούνται στον αέρα του θερμοκηπίου μέχρι να εξατμιστούν πλήρως. Η παραγωγή της ομίχλης από τα σταγονίδια που στη συνέχεια διατηρούνται αιωρούμενα στον αέρα συντελείται με δύο είδη υλικών. α) σωλήνες διανομής, β) δίσκοι. Η εξάτμιση των σταγονιδίων νερού γίνεται σχεδόν εξ' ολοκλήρου στον αέρα, ενώ ένα μικρό ποσοστό νερού πέφτει στα φυτά [14].

Οι αποδόσεις των συστημάτων δροσισμού κρίνονται ιδιαίτερα ικανοποιητικές και ενισχύονται ακόμα περισσότερο με ταυτόχρονη ορθή διαχείριση του αερισμού και με την ύπαρξη καλής ποιότητας νερού και εφαρμογής συστημάτων απιονισμού του νερού προς αποφυγή της απόφραξης των μικροεκτοξευτήρων.

7.4 Σκίαση:

Μία ακόμα τεχνολογία ψύξης των θερμοκηπίων συνιστά η ελάττωση του ποσοστού θερμότητας που εισέρχεται στο θερμοκήπιο με τη μορφή ηλιακής ακτινοβολίας. Υπάρχουν οι εξής τρόποι για να μειωθεί αυτό το ποσοστό:

- Μείωση της διαπερατότητας του θερμοκηπίου με τοποθέτηση σκιάστρων
- Μείωση της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων του θερμοκηπίου με χρήση ψεκασμού στη στέγη ή με κυκλοφορία νερού.
- Συνδυασμός των παραπάνω

Διακρίνονται δύο βασικοί τύποι σκίασης:

- Η συνεχόμενη σκίαση. Προκύπτει με λεύκανση των τοιχωμάτων ή με σκίαστρο σε σταθερή θέση που καλύπτει το περίβλημα του θερμοκηπίου

- Η προσωρινή σκίαση. Χρησιμοποιείται ύφασμα κουρτίνας το οποίο αφαιρείται χειροκίνητα ή αυτόματα όταν τα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας και εσωτερικής θερμοκρασίας ανέλθουν σε πολύ υψηλά επίπεδα.

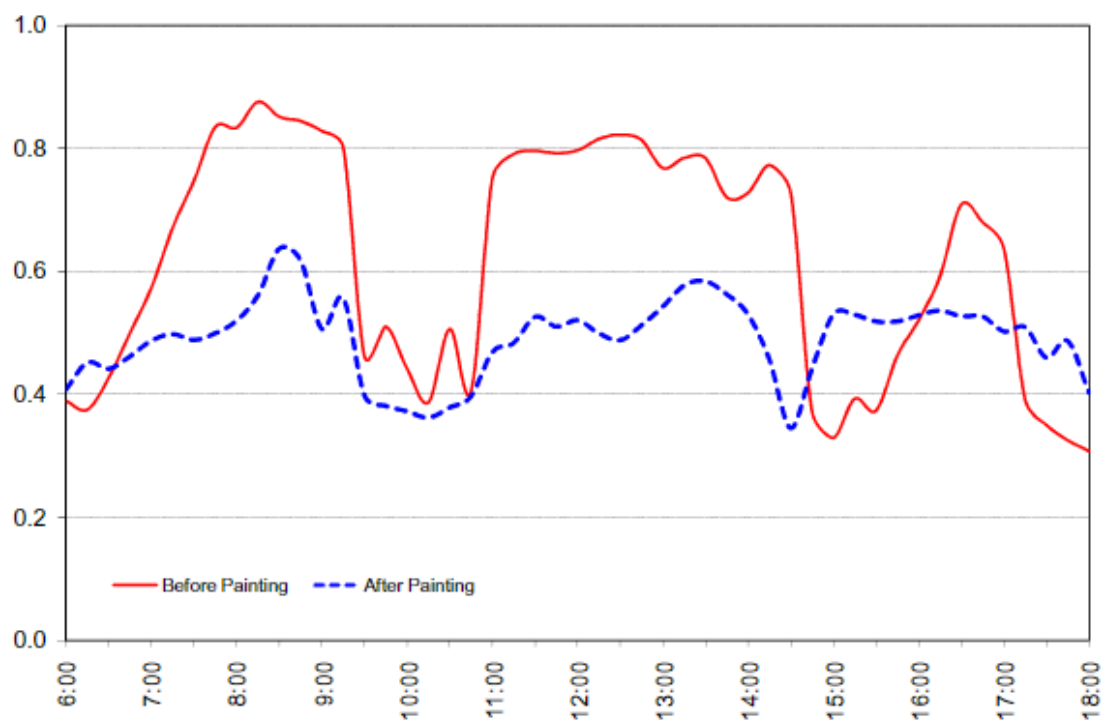
Λεύκανση:

Η μέθοδος της λεύκανσης είναι μια οικονομική μέθοδος η οποία τυγχάνει ευρείας χρήσης από τους παραγωγούς και αφορά στην σκίαση μέσω λεύκανσης του καλύμματος του θερμοκηπίου με σκοπό την ελάττωση του φορτίου της ηλιακής ακτινοβολίας. Το βασικό πλεονέκτημα της είναι ότι εμφανίζει την ίδια συμπεριφορά σε όλο το ηλιακό φάσμα της ακτινοβολίας απορροφώντας με τον ίδιο τρόπο τόσο το φωτοσυνθετικά ενεργό κομμάτι PAR (400-700 nm) όσο και το ευρύτερο φάσμα. Η υλοποίηση της λεύκανσης σε υαλόφρακτα θερμοκήπια έχει αποδειχτεί ότι αύξησε την απόδοση χρήσης ακτινοβολίας. Αυτό συμβαίνει διότι αυξήθηκε σημαντικά ο λόγος της διάχυτης ακτινοβολίας ως προς την υπέρυθη ακτινοβολία που εισέρχεται στο θερμοκήπιο και το θερμαίνει. Ενδεικτικά, εκτιμάται ότι έχει επιτευχθεί μείωση της θερμοκρασίας από 7 έως 9° C εντός του θερμοκηπίου. Ένα ιδιαίτερα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πως η λεύκανση δεν επιδρά αρνητικά στον εξαερισμό οροφής του θερμοκηπίου, σε αντίθεση με την σκίαση η οποία επηρεάζει αρνητικά τα ανοίγματα οροφής. Ως κύρια προϊόντα λεύκανσης χρησιμοποιούνται ο ασβέστης και η κιμωλία [14], [23].

Σκίαστρα:

Οι περισσότερες μελέτες έχουν επικεντρωθεί γύρω από διάφορες άλλες μεθόδους σκίασης όπως τα εξωτερικά ή εσωτερικά σκίαστρα, τα σταθερά ή κινούμενα παραπετάσματα (στόρια), ασχολούμενες πρωτίστως με τις μειώσεις που επιφέρει στην εισροή της ακτινοβολίας ο μηχανισμός σκίασης. Με όρους ενεργειακού ισοζυγίου, η επίδραση της σκίασης εκφράζεται με χρήση ενός επιπλέον συντελεστή τ_2 (από 0 έως 1) στην εξίσωση $Q = \tau_1 * \tau_2 * A * S_j$ η οποία αποδεικνύει τη μείωση της εισερχόμενης ενέργειας στο θερμοκήπιο. Οι αναφερθείσες τεχνικές σκίασης είναι αντιοικονομικές αλλά προσφέρουν σημαντικές επιδόσεις ως προς την σκίαση και την θερμική μόνωση του θερμοκηπίου. Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται η επίδραση της σκίασης στη μείωση

του συντελεστή διαπερατότητας της ακτινοβολίας για τις ώρες που υφίσταται φως [6].



Διάγραμμα 7.1: Επίδραση σκίασης στη μείωση του τ μια τυπική ημέρα

Τα τελευταία χρόνια έχει εμφανιστεί στο εμπόριο μεγάλος αριθμός σκιάστρων τα οποία αποτελούνται από ακρυλικό, πολυπροπυλένιο, πολυεστέρα και πολυαμίδιο. Προσφέρουν μεγάλη ποικιλία περατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία. Πλέον η πιο εξελιγμένη μέθοδος σκιάστρων είναι τα σκιάστρα εξοικονόμησης ενέργειας αποτελούμενα από λεπτό στρώμα αλουμινίου που ανακλούν υψηλό ποσοστό της ακτινοβολίας στο περιβάλλον. Σε θερμές περιόδους, η χρήση τους ως κουρτίνες σκίασης επιφέρει μείωση θερμοκρασίας από 8 έως 10°C, ποσό το οποίο διαφέρει ανάλογα με το αν τοποθετούνται στην οροφή ή στα πλευρικά τοιχώματα. Μία τόσο μεγάλη μείωση θερμοκρασία επιτυγχάνεται με συνδυασμένο σύστημα ψύξης το οποίο περιλαμβάνει κουρτίνες σκίασης και φυσικό αερισμό πχ. Αυτά τα συστήματα σκίασης έχουν διττό χαρακτήρα διότι τον χειμώνα είναι δυνατή η χρήση τους ως κουρτίνες θερμομόνωσης οι οποίες οδηγούν σε μείωση των θερμικών απωλειών τη νύχτα. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η θερμοκρασία του εσωτερικού του θερμοκηπίου μέχρι και 5° C διότι διατηρείται στο θερμοκήπιο η θερμότητα υπό μορφή θερμικής ακτινοβολίας. Επιπλέον, πραγματοποιείται μείωση της κατανάλωσης των καυσίμων για θέρμανση που φτάνει το 50%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο κύριος πυρήνας της εργασίας βρίσκεται γύρω από την ανάπτυξη και εφαρμογή του μοντέλου εκτίμησης θερμικών και ψυκτικών αναγκών ενός θερμοκηπίου. Το πρόγραμμα κρίνεται ιδιαίτερα απλό και φιλικό προς την χρήση του από τον οποιοδήποτε διότι απαιτεί από τον χρήστη την εισαγωγή στοιχειωδών χαρακτηριστικών όπως του υλικού κάλυψης, της τοποθεσίας που επιθυμεί να εγκαταστήσει το θερμοκήπιο καθώς και του φυτού το οποίο θα καλλιεργηθεί. Τα πιο ειδικά μεγέθη όπως ο ρυθμός ανανέωσης αέρα, ο συντελεστής διαπερατότητας κλπ. τροποποιούνται στο Excel.

Τα πλεονεκτήματα του μοντέλου μας είναι η ξεχωριστή μοντελοποίηση όλων των απωλειών θερμότητας οι οποίες εντάσσονται στο ενεργειακό ισοζύγιο. Πιο ειδικά, μοντελοποιήθηκαν ξεχωριστά οι απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας, οι απώλειες από το έδαφος και οι απώλειες λόγω αερισμού σε αντίθεση με άλλα μοντέλα που χρησιμοποιούν μονάχα μία εξίσωση για να μοντελοποιήσουν το σύνολο των απωλειών. Επιπλέον, ο συντελεστής θερμοπερατότητας U υπολογίστηκε αναλυτικά με μαθηματικές εκφράσεις δίχως να ληφθεί έτοιμος από πίνακες.

Το μοντέλο εφαρμόστηκε για 4 πόλεις (Χανιά, Καλαμάτα, Θεσσαλονίκη, Φλώρινα) σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες της ελληνικής επικράτειας. Οι συγκεκριμένες περιοχές επιλέχθηκαν διότι αποτελούν χώρο εγκατάστασης πολλών θερμοκηπίων. Οι διαφορετικές ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση και ψύξη που προέκυψαν σε διαφορετικές περιοχές για ένα κατά τα άλλα ίδιο θερμοκήπιο πιστοποιούν τη μεγάλη σημασία που έχει η επιλογή της περιοχής εγκατάστασης του θερμοκηπίου. Η περιοχή φάνηκε πως επηρεάζει τις ενεργειακές ανάγκες της καλλιέργειας διότι επιδρά σε μια σειρά από κλιματολογικούς παράγοντες μείζονος σημασίας για το ενεργειακό ισοζύγιο όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα ανέμου.

Στα κεφάλαια 5 και 6 έγινε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των κυριότερων τεχνολογιών θέρμανσης και ψύξης που χρησιμοποιούνται στα θερμοκήπια. Επισημάνθηκαν τα χαρακτηριστικά της καθεμίας ενώ παρατέθηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα.

Το μοντέλο διαθέτει μεγάλα περιθώρια βελτίωσης. Ενδεικτικά κάποιες προτάσεις είναι οι εξής:

- Αύξηση της βάσης δεδομένων με μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες ανάπτυξης για περισσότερα φυτά.
- Επέκταση του συστήματος ως ΣΥΑ ώστε να αποφασίζει το βέλτιστο, μέσα από ένα πλήθος εναλλακτικών συστημάτων θέρμανσης και ψύξης στη βάση διαφόρων κριτηρίων όπως η κατανάλωση ενέργειας, η απόδοση κ.α.
- Επέκταση του συστήματος προκειμένου να συνδέεται και να λαμβάνει τις μετρήσεις αισθητήρων του θερμοκηπίου ώστε να παίρνει αποφάσεις (real time) όπως το άνοιγμα ή κλείσιμο των παραθύρων.
- Προσθήκη όλων των περιοχών της χώρας στις οποίες επικρατούν ευνοϊκές συνθήκες ανάπτυξης της καλλιέργειας.
- Επέκταση των υλικών κάλυψης

Βιβλιογραφία

- [1] Αραμπατζής, Γ., Ασημακόπουλος, Δ. Κ. & Λυγερού, Β. Ι. (2012) *Μεταφορά θερμότητας και μάζας*, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- [2] Ασπράγκαθος, Α., Μπεθάνης, Χ. (2015) *Χρήση Ηλιακών συστημάτων για θέρμανση/ψύξη θερμοκηπίων και μεθοδολογίες υπολογισμού θερμικών/ψυκτικών φορτίων* (Διπλωματική εργασία), Σχολή ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
- [3] Τσεκούρας, Α., Χριστόπουλος, Π. (2017) *Ενεργειακή Μελέτη και Εγκατάσταση Θερμοκηπίου καλλιέργειας οπωροκηπευτικών* (Διπλωματική εργασία), ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, Πάτρα
- [4] Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων, (1992) *Τεχνικές Προδιαγραφές Θερμοκηπίων*, Γεν. Δ/ση Φυτικής Παραγωγής, Αθήνα.
- [5] Καύγα, Α. (2010) *Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Θερμοκηπίου Με Χρήση Συστήματος Θέρμανσης Με Υπέρυθρη Ακτινοβολία* (Διδακτορική Διατριβή), Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- [6] Ταταράκη, Κ. (2019) *Συστήματα Συμπαράγωγής Ηλεκτρισμού, Θερμότητας και Ψύξης σε Θερμοκήπια: Έλεγχος Βιωσιμότητας και Σχεδιασμός* (Διδακτορική Διατριβή), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [7] Αραμπατζής, Γ., Ασημακόπουλος, Δ., Καρταλίδης, Α. (2013) *Ορθολογική και Αειφορική Διαχείριση Ενέργειας*, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα.
- [8] Ντίνας, Γ. (2012) *Πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση υβριδικού ηλιακού συστήματος εξοικονόμησης ενέργειας και στήριξης υδροπονικής καλλιέργειας σε θερμοκήπιο* (Διδακτορική Διατριβή), Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- [9] Παπανικόλας, Α. (2019) *Θερμική Μοντελοποίηση & Προσομοίωση Ηλιακού Συλλέκτη* (Διπλωματική εργασία), Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [10] Αρχείο Εργ. Αγροτικών Κατασκευών & Εξοπλισμού, Γεωπονική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

- [11] Μαυρογιαννόπουλος, Ν. (2005) *Θερμοκήπια, Περιβάλλον- Υλικά- Κατασκευή- Εξοπλισμός*, Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε, Αθήνα.
- [12] Μαρτζόπουλος, Γ., (2006) *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας Στη Γεωργία*, Διδακτικές Σημειώσεις, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη
- [13] Ντόγρας, Κ., (2001) *Καλλιέργεια Λαχανικών στο Θερμοκήπιο*, Διδακτικές Σημειώσεις για τους φοιτητές του τμήματος Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- [14] Κάραλη, Ζ., Αρέστης, Π. (2016) *Μελέτη ενεργειακών αναγκών θερμοκηπίων και προτάσεις για την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη μέρους των ενεργειακών τους αναγκών* (Πτυχιακή εργασία), ΤΕΙ Πάτρας, Πάτρα.
- [15] Γραφιαδέλλης, Μ. (1987) *Σύγχρονα θερμοκήπια*, Εκδόσεις Α. Γαρταγάνη, Θεσσαλονίκη
- [16] Adelard, L., Pignolet-Tardan, F. (1998) *Sky Temperature Modelisation and Applications in Building Simulation*, Renewable Energy, pages 418-430.
- [17] Sonneveld, C., Voogt, W. (2009) *Plant Nutrition of Greenhouse Crop*, Berlin: Springer
- [18] Gene, A., Giacomelli and William J. Roberts. (1993) *Greenhouse Covering Systems*, HortTechnology
- [19] von Elsner, B., Briassoulis, D., Waaijenberg, D., Mistriotis, A., von Zabeltitz, Chr., Gratraud, J., Russo, G., Suay-Cortes, R. (1999) *Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouses in European Union Countries: Part I, Design Requirements*, Journal of Agricultural Engineering Research, accepted for publication
- [20] von Zabeltitz, Chr. (2011) *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates*, Berlin: Springer
- [21] Pardossi, A., Tognoni, F., Incrocci, L. (2004) *Mediterranean Greenhouse Technology*, Chronica Horticulturae <https://www.ishs.org/>

- [22] Chartzoulakis, K., Psarras, G. (2005) *Global change effects on crop photosynthesis and production in Mediterranean: the case of crete, Greece*, Agriculture, Ecosystems & Environment
- [23] Baille, A., Kittas, C., Katsoulas, N. (2001) *Influence of whitening on greenhouse microclimate and crop energy partitioning* Agricultural Forest Meteorology
- [24] Baille, A., Boulard, T. (1995) *Modelling of Air Exchange Rate in a Greenhouse Equipped with Continuous Roof Vents*, INRA, Station de Bioclimatologie, France
- [25] Van Henten, E., Mears, D.R. (2007) *Innovation in greenhouse engineering*, Acta horticulturae.
- [26] Bhattacharjee, S., (2020) *Protected Cultivation* <http://fppt.com/>
- [27] Rozakis, S., Soldatos, P., Papadakis, G. (1997) *Evaluation of an integrated Renewable Energy System for Electricity Generation in Rural Areas*, Energy Policy
- [28] Mears, D., Roberts, W., Cipolletti, J. (1980) *Solar Heating of Commercial Greenhouses*, Kube Pac Inc. New Brunswick, Nj: Department Of Biological And Agricultural Engineering, Cook College, Rutgers University.
- [29] Santamouris, M., Balaras, C., Daskalaki, E. (2003) *Passive solar agricultural greenhouses: A worldwide classification and evaluation of technologies and systems used for heating purposes*, Department of Applied Physics, University of Athens, Athens.
- [30] Papadakis, G., Boulard, T. (1996) *The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses*, Agricultural University of Athens, Engineering Department, Athens, Greece
- [31] Fernandez, J., Bailey, B. (1992) *Measurement and prediction of greenhouse ventilation rates*, Agricultural Forest Meteorology, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- [32] Kittas, C., Boulard, G., Papadakis, G. (1997) *Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: Sensitivity to temperature and wind effects*, American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan, USA

[33] <https://www.directindustry.com/prod/hukseflux-thermal-sensors-bv/product-88003-1118486.html>

[34] <https://www.renewables.ninja/>

[35] <http://www.gaiapedia.gr>

[36] https://eclass.uniwa.gr/modules/document/file.php/IA153/%CE%9A%CE%9B%CE%99%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%91%20%CE%94%CE%95%CE%94%CE%9F%CE%9C%CE%95%CE%9D%CE%91_%CE%9A%CE%A4%CE%99%CE%A1%CE%99%CE%91.pdf