

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗΣ

**ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ
ΜΕ ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ**

**ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ
(NIR)**

Διδακτορική Διατριβή

Αγγελική Καυγά

Γεωπόνος, MSc

Πάτρα, 2010

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή Θράσσο Πανίδα επιβλέποντα αυτής της εργασίας και τους Καθηγητές Σπύρο Παντελάκη και Βασίλη Μποντόζογλου μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε αυτά τα χρόνια. Αυτή η διδακτορική διατριβή είναι αποτέλεσμα της συμβολής και των τριών μελών της συμβουλευτικής επιτροπής και τους ευχαριστώ για την καθοδήγησή τους και την εμπιστοσύνη τους προς το πρόσωπό μου και για την βοήθειά τους οποιαδήποτε στιγμή την είχα ανάγκη. Με την προσωπική σχέση που αναπτύχθηκε, με έμαθαν να εργάζομαι συστηματικά και να “μην αγχώνομαι”, πράγματα που τα θεωρώ πολύ σημαντικά για την περαιτέρω ερευνητική μου δραστηριότητα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής τον Καθηγητή Γεώργιο Μαυρογιαννόπουλο, τον Αναπληρωτή Καθηγητή Νικόλαο Ανδρίτσο, τον Αναπληρωτή Καθηγητή Δημοσθένη Γεωργίου και τον Επίκουρο καθηγητή Ιωάννη Καούρη για την ουσιαστική συμβολή τους με σχόλια και παρατηρήσεις στην βελτίωση της διατριβής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Γεωπόνο ΤΕ (MSc) και επιστημονικό συνεργάτη του ΤΕΙ/Μ Γιώργο Αλεξόπουλο καθώς και τους μηχανολόγους μηχανικούς ΤΕ Στέφανο Καρβέλη και Δημήτρη Ντρενογιάννη από το εργαστήριο Τεχνολογίας και Αντοχής Υλικών για την τεχνική τους υποστήριξη στην διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω το τμήμα Θερμοκηπιακών Καλλιεργειών και το ΤΕΙ Μεσολογγίου για την υλικοτεχνική υποστήριξη που μου παρείχαν κατά την εκπόνηση της διατριβής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους συνεργάτες μου στο εργαστήριο Αντοχής Υλικών Δρ. Βασίλη Καππάτο, Δρ. Μιχάλη Παπαδόπουλο, Δρ. Απόστολο Χάμο, Δρ. Χρήστο Κατσιρόπουλο, Δρ. Γιάννη Διαμαντάκο, Δρ. Γεράσιμο Μωραΐτη, Δρ. Αλέξη Κερμανίδη, Δημήτρη Σταματέλο, **Milan Sunaric**, Βαγγέλη Πτωχό, Γιώργο Μυλωνά, Στέφανο Μπέλεση, **Victor Bulungu Watiti** καθώς και τις Αρχοντούλα Κουτσολιάκου Ελένη Σωτηροπούλου και κ. Ελένη Μοναχογιού.

Φυσικά, θέλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου Μάνο και Βασίλη, για την συμπαράσταση και ταυτόχρονα για την “ανοχή” που έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια

Πάτρα

Δεκέμβριος 2009

Πρακτικό εξέτασης της διδακτορικής διατριβής
της κας. Αγγελικής Καυγά με θέμα
**«Ενεργειακή βελτιστοποίηση θερμοκηπίου με χρήση
συστήματος θέρμανσης με υπέρυθρη ακτινοβολία»**

Σήμερα Πέμπτη, 7/1/2010 και ώρα 12:00, στην Αίθουσα Συνεδριάσεων του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Πατρών, πραγματοποιήθηκε η δημόσια παρουσίαση της διδακτορικής διατριβής της υποψήφιας διδάκτορος του ως άνω Τμήματος, κας. Αγγελικής Καυγά, με θέμα «Ενεργειακή βελτιστοποίηση θερμοκηπίου με χρήση συστήματος θέρμανσης με υπέρυθρη ακτινοβολία», ενώπιον της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, που ορίστηκε από την Γενική Συνέλευση με την Ειδική Σύνοψη.

Η επταμελής εξεταστική επιτροπή που αποτελείται από τους

- Θρασύβουλο Πανίδα, Επίκουρο Καθηγητή του οικείου Τμήματος, επιβλέποντα
- Σπύρο Παντελάκη, Καθηγητή του οικείου Τμήματος, μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής
- Βασίλη Μποντόζογλου, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής
- Γεώργιο Μαυρογιαννόπουλο, Καθηγητή του Τμήματος Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών
- Νικόλαο Ανδρίτσο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας
- Δημοσθένη Γεωργίου, Αναπληρωτή καθηγητή του οικείου Τμήματος
- Ιωάννη Καούρη, Επίκουρο καθηγητή του οικείου Τμήματος

έκρινε σφραγισμένα ότι η διατριβή έχει ολοκληρωθεί επιτυχώς, είναι πρωτότυπη, υψηλής στάθμης και αποτελεί ουσιαστική συνεισφορά στην επιστήμη του Μηχανολόγου και Αεροναυπηγού Μηχανικού και την βαθμολόγησε με βαθμό αριστα.

Η Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Θρασύβουλος Πανίδα, Επίκουρος Καθηγητής

Σπύρος Παντελάκης, Καθηγητής

Βασίλης Μποντόζογλου, Καθηγητής

Γεώργιος Μαυρογιαννόπουλος, Καθηγητής

Νικόλαος Ανδρίτσος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Δημοσθένης Γεωργίου, Αναπληρωτής Καθηγητής

Ιωάννης Καούρης, Επίκουρος Καθηγητής

Πάτρα 7/1/2010

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	7
ΠΡΩΤΟΤΥΠΑ ΣΗΜΕΙΑ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο - ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ.....	11
1.2 ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ.....	12
1.3 ΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ.....	15
1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	18
2.1 ΤΟ ΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.....	18
2.1.1 Θερμοκρασία και ανάπτυξη.....	18
2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ.....	22
2.2.1 Συμβατικά Συστήματα Θέρμανσης.....	23
2.2.2 Συστήματα Θέρμανσης με Χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.....	26
2.2.2.1 Ενεργητικά Συστήματα Θέρμανσης.....	29
2.2.2.2 Παθητικά Συστήματα Θέρμανσης.....	31
2.2.2.3 Συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας.....	38
2.2.3 Συστήματα θέρμανσης με χρήση ακτινοβολίας.....	39
2.2.3.1 Υπέρυθρη ακτινοβολία (IR).....	39
2.2.3.2 Συστήματα θέρμανσης με υπέρυθρη ακτινοβολία στα θερμοκήπια.....	40
2.3 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.....	43
2.3.1 Το μικροκλίμα του θερμοκηπίου.....	43
2.3.2 Ενεργειακό ισοζύγιο θερμοκηπίου-Μετάδοση θερμότητας.....	45
2.3.3 Μαθηματικά δυναμικά μοντέλα προσομοίωσης βασιζόμενα σε ισοζύγια ενέργειας και μάζας.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	53
3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	53

3.2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	55
3.2.1 Αγωγή.....	55
3.2.2 Συναγωγή.....	55
3.2.3 Συνδυασμός αγωγής και συναγωγής	56
3.2.4 Ακτινοβολία	58
3.3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	60
3.3.1 Συμβατικό σύστημα θέρμανσης.....	63
3.3.2 Σύστημα θέρμανσης με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας (NIR).....	65
3.3.3 Συντελεστές συναγωγής	66
3.3.4 Συντελεστές εκπομπής.....	71
3.3.5 Θερμοκρασία ουρανού.....	71
3.3.6 Αριθμός εναλλαγών του αέρα (N).....	73
3.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.....	74
3.4.1 Απώλειες θερμότητας λόγω διαφυγών του αέρα από και προς το θερμοκήπιο.....	74
3.4.2 Συνδυασμένες απώλειες θερμότητας από το κάλυμμα λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας.....	75
3.4.3 Απώλειες θερμότητας με αγωγιμότητα προς το έδαφος.....	76
3.5 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΚΑΙ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	77
3.5.1 Παραδοχές του μοντέλου.....	77
3.5.2 Εκτίμηση της συνολικής αβεβαιότητας του μοντέλου.....	79
3.6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ.....	79
3.6.1 Επίδραση εξωτερικής θερμοκρασίας (T_o).....	80
3.6.2 Επίδραση της ταχύτητας του ανέμου (WS) και των διαφυγών (N) του αέρα του θερμοκηπίου.....	81
3.6.3 Επίδραση της θερμοκρασίας ουρανού (T_{sky}) και του συντελεστή εκπομπής του καλύμματος (ϵ_c) του θερμοκηπίου.....	82
3.6.4 Επίδραση της απόδοσης (η) των συστημάτων υπέρυθρης θέρμανσης σε IR	84
3.6.5 Εκτίμηση του αναμενόμενου όφελους σε επιχειρηματικό θερμοκήπιο.....	85

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	88
4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ	88
4.1.1 Δομή θερμοκηπίων.....	88
4.1.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά θερμοκηπίου.....	89
4.1.3 Υλικά σκελετού.....	90
4.1.4 Υλικά κάλυψης.....	91
4.1.5 Θεμελίωση.....	92
4.1.6 Λειτουργικά χαρακτηριστικά θερμοκηπίου.....	93
4.1.7 Συστήματα θέρμανσης.....	94
4.1.8 Συστήματα εξαερισμού.....	98
4.1.9 Πειραματική καλλιέργεια.....	99
4.2 ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ - ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	101
4.2.1 Μετρητικά όργανα μικρο-κλίματος πειραματικών θερμοκηπίων.....	101
4.2.2 Μετεωρολογικός σταθμός και μετρητικά όργανα μακρο-κλίματος πειραματικών θερμοκηπίων.....	102
4.2.3 Διαδικασία πειραματικών μετρήσεων.....	106
4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΕΙΡΕΣ	107
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	108
5.1 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	108
5.2 ΠΡΩΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ	111
5.2.1 Χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα (T _α) κατά την διάρκεια θερμικής νύχτας με χρήση θερμού αέρα και απουσία ανεμιστήρα.....	111
5.2.2 Χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα (T _α) του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια θερμικής νύχτας με χρήση θερμού αέρα και παρουσία ανεμιστήρα.....	111
5.2.3 Χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα (T _α) του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια θερμικής νύχτας με χρήση IR.....	112
5.2.4 Θερμική συμπεριφορά πειραματικού θερμοκηπίου με χρήση μέσων τιμών νύχτας.....	113
5.3 ΔΕΥΤΕΡΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ	115
5.3.1 Θερμική συμπεριφορά πειραματικών θερμοκηπίων κατά την χρονική εξέλιξη μιας τυπικής χειμερινής νύχτας.....	115

5.3.2	Θερμική συμπεριφορά πειραματικών θερμοκηπίων με χρήση μέσων τιμών νύχτας.....	116
5.3.3	Μέση ενεργειακή κατανάλωση.....	117
5.3.4	Θερμική συμπεριφορά πειραματικών θερμοκηπίων με χρήση ελάχιστων τιμών - Μέγιστη ενεργειακή απαίτηση.....	119
5.4	ΠΕΡΑΙΤΕΡΩΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	121
5.4.1	Χρονική εξέλιξη της μεταβολής της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα και του καλύμματος στην διάρκεια της μέσης νύχτας.....	121
5.4.2	Επίδραση θερμοκρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος.....	123
5.4.3	Βαθμώρες λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης και κατανάλωση ενέργειας.....	125
5.5	ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	126
5.5.1	Σύγκριση θεωρητικών αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα κατά την πρώτη θερμική περίοδο με χρήση μέσων τιμών νύχτας.....	127
5.5.2	Σύγκριση θεωρητικών αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα κατά την δεύτερη θερμική περίοδο με χρήση μέσων τιμών.....	129
5.5.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου προσομοίωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα κατά την χρονική εξέλιξη της τυπικής χειμερινής νύχτας.....	131
5.5.4	Σύγκριση ενεργειακής κατανάλωσης των πειραματικών θερμοκηπίων με βάση τις γενικές προβλέψεις του μοντέλου προσομοίωσης.....	132
5.6	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ.....	134
5.7	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	135
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.....	138
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο - ΘΕΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....	140
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	142
	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	150
	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	152
	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	153
	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	157

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μετά την πρώτη ενεργειακή κρίση την δεκαετία του '70 κατά την οποία τα περιορισμένα αποθέματα ενέργειας προκάλεσαν την πρώτη σημαντική αύξηση στην τιμή της ενέργειας, η χρήση ενέργειας στα θερμοκήπια έχει γίνει κύριο ερευνητικό ζήτημα. Η ανάγκη για μείωση του ενεργειακού κόστους είναι σημαντική, γιατί η ενέργεια αποτελεί σημαντικό κλάσμα του συνολικού κόστους παραγωγής. Στις Μεσογειακές χώρες έχει υπολογιστεί ότι η χρήση ενέργειας για έλεγχο των συνθηκών περιβάλλοντος και ειδικότερα για τη θέρμανση, είναι 20% - 30% του συνολικού κόστους παραγωγής, ποσοστό το οποίο στις βορειότερες χώρες αυξάνεται. Ταυτόχρονα, με το έντονο ενδιαφέρον για το παγκόσμιο φαινόμενο του θερμοκηπίου και τις κλιματικές αλλαγές, η χρήση των συμβατικών καυσίμων είναι και πάλι στην πολιτική ατζέντα. Έτσι και η βιομηχανία θερμοκηπίων είναι αντιμέτωπη με οικονομική, πολιτική και κοινωνική πίεση για μείωση της χρήσης ενέργειας και βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των θερμοκηπίων μέσω τεχνολογικών καινοτομιών.

Η κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανση του θερμοκηπίου αποτελεί ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα διότι οι απώλειες του θερμοκηπίου σε θερμότητα λόγω των λεπτών τοιχωμάτων του και της κατασκευής του, είναι πολύ μεγάλες, 6-12 φορές μεγαλύτερες από εκείνες ενός συνήθους κτίσματος ίσου όγκου. Η θερμότητα παρέχεται στο θερμοκήπιο κυρίως μέσω συμβατικών συστημάτων θέρμανσης (συστήματα σωληνώσεων θερμού νερού, συστήματα θερμού αέρα) και σε περιορισμένη έκταση με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, γεωθερμία, βιομάζα). Για να επιτευχθεί με αυτές τις μεθόδους η απαραίτητη θερμοκρασία στο επίπεδο των φυτών, το εσωτερικό του θερμοκηπίου πρέπει να θερμανθεί στην ίδια ή υψηλότερη θερμοκρασία από την επιθυμητή θερμοκρασία των φυτών με αποτέλεσμα την δημιουργία ισοθερμοκρασιακού κλίματος σε ολόκληρο το θερμοκήπιο (όλον κλίμα). Το αποτέλεσμα αυτής της πρακτικής σε όλες τις μελέτες που διεξάγονται είναι ότι, τα θερμοκήπια καταναλώνουν απαράδεκτα υψηλά ποσά ενέργειας σε σχέση με την ενέργεια που απορροφάται από τα φυτά, για να καλύπτουν τις αυξημένες ενεργειακές απώλειες που λόγω κατασκευής παρουσιάζουν.

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται μια ολοκληρωμένη πρόταση για την δημιουργία ενός "ψυχρού θερμοκηπίου" στο οποίο τα φυτά θα λαμβάνουν απευθείας την ενέργεια που χρειάζονται προκειμένου να φτάσουν και να διατηρήσουν την επιθυμητή για την ανάπτυξη τους θερμοκρασία χωρίς να υπάρχει ανάγκη για αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται σύστημα θέρμανσης με μικρού μήκους υπέρυθρη ακτινοβολία (NIR). Σε αυτά τα συστήματα η θερμότητα μεταδίδεται απευθείας από την πηγή στον δέκτη, στην προκειμένη περίπτωση στα φυτά και το έδαφος και το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ισοθερμοκρασιακού κλίματος μόνο στην περιοχή του φυτικού θόλου (τοπικό κλίμα).

Ειδικότερα η παρούσα εργασία αντιμετωπίζει τη θερμική συμπεριφορά του θερμοκηπίου λαμβάνοντας υπόψη όλα τα ουσιαστικά θερμικά φαινόμενα που συμβαίνουν κατά την διάρκεια θέρμανσης (με συμβατικό και με σύστημα θέρμανσης με ακτινοβολία) και παρουσία καλλιέργειας. Γι αυτό τον λόγο δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στην ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου που προσομοιάζει επαρκώς τις κύριες διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας μέσα στο θερμοκήπιο, το οποίο περιλαμβάνει ένα σύνολο λειτουργικών συνθηκών, και στο οποίο καθορίζονται με σχετική ακρίβεια οι

παράγοντες που επηρεάζουν την θερμική συμπεριφορά του θερμοκηπίου. Το μοντέλο προσομοίωσης δίνει την δυνατότητα αξιόπιστης περιγραφής του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου, και σαφούς εκτίμησης των ενεργειακών αναγκών του και με τις δυο τεχνικές θέρμανσης. Έτσι προσδιορίζεται το εξοικονομούμενο ενεργειακό όφελος που προκύπτει με τη χρήση συστήματος θέρμανσης με ακτινοβολία.

Ο έλεγχος της ποιότητας του μοντέλου προσομοίωσης και η περαιτέρω βελτίωσή του γίνεται με σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα, η συλλογή και επεξεργασία των οποίων αποτελεί τον πυρήνα της έρευνας. Τα πειραματικά δεδομένα προέρχονται από πειράματα που διεξήχθησαν σε δύο πειραματικά θερμοκήπια συζευγμένα με αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό, στα οποία εφαρμόζεται συμβατικό σύστημα θέρμανσης και θέρμανση με υπέρυθρη ακτινοβολία αντίστοιχα. Αυτό δίνει την δυνατότητα πιστοποίησης των δυνατοτήτων της θέρμανσης με ακτινοβολία και ποσοτικοποίησης του ενεργειακού οφέλους που επιτυγχάνεται.

Συμπερασματικά, η συστηματική θεωρητική και πειραματική μελέτη ενός "ψυχρού" θερμοκηπίου με χρήση μικρού μήκους υπέρυθρης ακτινοβολίας (**NIR**) και ενός "θερμού θερμοκηπίου" με χρήση συμβατικού συστήματος θέρμανσης αναδεικνύουν το κύριο πλεονέκτημα της υπέρυθρης ακτινοβολίας, δηλαδή η θερμότητα να μεταδίδεται απευθείας από το σύστημα ακτινοβολίας στα φυτά και το έδαφος χωρίς να παρεμβάλεται ο αέρας του εσωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου. Αυτό οδηγεί σε ομοιομορφία θέρμανσης του φυτικού θόλου και ταυτόχρονα σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας της τάξεως του **40-50%**

ABSTRACT

After the first energy crisis in the seventies during which limited energy supplies led to an important increase in energy prices, greenhouse energy consumption has again become a major research issue. The energy cost reduction need is significant, since energy forms a substantial fraction of the total production costs. In Mediterranean countries it has been estimated that energy consumption for environment conditions control and more specifically for heating, consists 20% - 30% of total production cost, a percentage that is higher in northern countries. Moreover, due to the recent pronounced interest in the global greenhouse effect and climatic change, the use of fossil fuels is once again in the political agenda. Therefore the greenhouse industry is confronted with economical, political and social pressure to reduce energy usage and improve the greenhouse energy efficiency via technological innovations.

Energy consumption for greenhouse heating represents a serious concern because greenhouse heat losses due to thin covers and construction specifics are 6-12 times higher than those of a common building of equal volume. Traditionally, thermal energy is transmitted to the greenhouse mainly through conventional heating systems (either by hot water circulation through a piping system or by air heaters) and, in a limited scale, through renewable energy sources (solar, geothermal, biomass). In order for the plants to reach required temperature through these methods, the greenhouse interior has to be heated to the same or even to a slightly higher temperature than the value targeted for the plants (entire climate). This practice results in extremely increased heat losses compared to the energy absorbed by plants, because of the increased energy losses due to construction specifications.

The present thesis formulates a complete proposal for the creation of a "cold greenhouse" where plants will directly receive the needed energy in order to reach and preserve the desirable growth temperature without having to increase the internal greenhouse air temperature. The near infrared radiation (NIR) is used for this purpose. In the radiation system, heating is transmitted straight from the source to the receiver, in this particular case plants and soil. The result is an isothermal climate formation in the plant canopy (local climate).

Specifically this study investigates the greenhouse thermal performance taking into account all the essential thermal phenomena that take place during heating (conventional and IR heating) and cultivation. For this reason, emphasis is given to the development of a mathematical model that simulates the main heating transfer procedures inside the greenhouse, takes into account a sum of operational conditions and determines all factors influencing the greenhouse thermal performance with relevant accuracy. The simulation model allows a credible description of greenhouse environment as well as a clear estimation of its energy needs with both heating systems. Thus the resulting energy saving by IR heating usage is determined.

Quality control of the simulation model and its forward improvement is done by comparing the theoretical results with experimental data. Collecting and processing these data forms the research kernel. The experimental data correspond to experiments that took place in two experimental greenhouse connected with automatic meteorological station where conventional and IR heating have been used respectively.

This method makes possible the identification of IR heating potential and quantification of energy saving.

Concluding, the systematic theoretical and experimental study of a “cold” greenhouse using near IR heating, and of a “warm” greenhouse using conventional heating, proves the main advantage of IR heating that is that, the heat is directly transferred from the radiation system to the plants and the soil without interference of the internal greenhouse air. This leads to uniform heating of the plant canopy and at the same time to a significant energy saving of 40-50%.

ΠΡΩΤΟΤΥΠΑ ΣΗΜΕΙΑ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

1. Επιβεβαίωση της βασικής αρχής λειτουργίας συστήματος θέρμανσης με ακτινοβολία (υλοποίηση «ψυχρού θερμοκηπίου» και παραγωγή ποιοτικού προϊόντος) και διατήρηση της καλλιέργειας στις κατάλληλες συνθήκες.
2. Χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος (NIR) στην θέρμανση των θερμοκηπίων
3. Ανάλυση με απλοποιημένο υπολογιστικό μοντέλο που λαμβάνει υπ' όψη τις ιδιαιτερότητες της θέρμανσης με ακτινοβολία
 - § *Αξιολόγηση παραδοχών για την ανάπτυξη του μοντέλου*
 - § *Εκτίμηση ενεργειακού οφέλους θέρμανσης θερμοκηπίου με ακτινοβολία*
4. Αξιόπιστη μέτρηση/εκτίμηση του ενεργειακού οφέλους από την θέρμανση θερμοκηπίου με υπέρυθρη ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος
 - § *Χρησιμοποίηση δύο πανομοιότυπων πειραματικών θερμοκηπίων που σχεδιάστηκαν με κριτήρια ομοιότητας κλίμακας*
 - § *Συλλογή συγκριτικών αποτελεσμάτων από θερμοκήπια με συστήματα θέρμανσης ακτινοβολίας και συμβατικής θέρμανσης με λεπτομερή καταγραφή του μικροκλίματος των θερμοκηπίων και του εξωτερικού μακροκλίματος*
 - § *Εκτίμηση αποδοτικότητας και ποιότητας καλλιέργειας σε θερμοκήπιο με σύστημα θέρμανσης με ακτινοβολία*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

Η προστατευόμενη καλλιέργεια ή τα Συστήματα Γεωργίας Ελεγχόμενου Περιβάλλοντος (**Controlled Environmental Agriculture-CEA**), χρησιμοποιούνται σε ολόκληρο τον κόσμο ως μια δυναμική διαδικασία παραγωγής. Προστατεύουν την παραγωγή από αντίξοες κλιματολογικές συνθήκες και παράσιτα και προσφέρουν την δυνατότητα τροποποίησης του μικροκλίματος και δημιουργίας ευνοϊκού περιβάλλοντος για την ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών με όρους ποσότητας και ποιότητας (**Van Henten et al, 2006**). Η προστατευόμενη καλλιέργεια έχει αποδειχθεί ότι είναι άκρως αποτελεσματική και τις τελευταίες δεκαετίες έχει εξαπλωθεί σε ολόκληρο τον κόσμο. Ο πίνακας 1-1 περιλαμβάνει την εκτιμώμενη έκταση θερμοκηπίων σε διάφορες περιοχές της γης.

Πίνακας 1-1: Παγκόσμια έκταση θερμοκηπίων (**Giacomelli et al, 2007**)

Περιοχή	Πλαστικά θερμοκήπια και πλαστικά τούνελ (ha)	Υαλόφρακτα θερμοκήπια (ha)	Σύνολο
Δυτική Ευρώπη	150.000	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

Τα επίπεδα τεχνολογίας διαφέρουν ευρέως ανά τον κόσμο. Στις περισσότερες χώρες της Δ. Ευρώπης και της Β. Αμερικής η προστατευόμενη καλλιέργεια ξεκίνησε ως μια πιο εξελιγμένη εκδοχή της ανοικτής καλλιέργειας, προστατεύοντας την παραγωγή

από δυσμενείς καιρικές συνθήκες όπως χαμηλές θερμοκρασίες, άνεμο, βροχή, χαλάζι καθώς επίσης και από έντομα, έτσι ώστε να αποτραπούν απώλειες στην παραγωγή και να μειωθεί ο κίνδυνος της πλήρους απώλειας παραγωγής. Κλείνοντας την παραγωγή με ένα κάλυμμα, προέκυψε ένα ωφέλιμο αποτέλεσμα πάνω στο μικροκλίμα. Σε συνδυασμό με τα υπάρχοντα τότε απλά μέσα ελέγχου του μικροκλίματος (π.χ. συστήματα θέρμανσης και εξαερισμού), έγινε δυνατή η βελτίωση της παραγωγής τροφίμων με υψηλότερα επίπεδα απόδοσης. Η τεχνολογία παραγωγής παρέμεινε σχετικά απλή και είναι και σήμερα η πλέον κοινή σε ολόκληρο τον κόσμο. Όμως αυτό άρχισε να αλλάζει καθώς οι βασικές ανάγκες διατροφής της κοινωνίας ικανοποιήθηκαν. Από το **1960** έχει υπάρξει μια τάση προς πιο πολύπλοκα και υψηλής τεχνολογίας συστήματα παραγωγής. Αυτό η τάση προέκυψε από την ανάγκη για τρόφιμα καλύτερης ποιότητας και ασφαλέστερα, αξιόπιστα προϊόντα και πιο εξειδικευμένα προϊόντα όπως άνθη και γλαστρικά είδη. Τέτοια παραγωγή απαιτεί πολύπλοκη τεχνολογία με αυξημένες ανάγκες ενέργειας και ενεργειακών πηγών. Επιπλέον απαιτεί έμπειρους ειδικούς, οι οποίοι έχοντας μια ευρύτερη κατανόηση των περιορισμένων πηγών ενέργειας και των συνεπειών της αυξημένης χρήσης ενέργειας και θρεπτικών στοιχείων στο περιβάλλον, θα οδηγήσουν την έρευνα σε περαιτέρω τεχνολογική καινοτομία.

Όλα τα προστατευμένα συστήματα καλλιέργειας, ασχέτως γεωγραφικής τοποθεσίας, διέπονται από βασικά στοιχεία ελέγχου του κλίματος και παρέχουν ανάλογα με τον σχεδιασμό και την πολυπλοκότητα μικρότερο ή μεγαλύτερο έλεγχο περιβάλλοντος και ανάλογη ανάπτυξη φυτών και παραγωγικότητας. Αυτά τα βασικά στοιχεία περιλαμβάνουν ([Giacomelli et al, 2007](#)):

- Ισχυρή δομή ή μεταλλική κατασκευή που παρέχει ένα φυσικό όριο και δομική στήριξη.
- Υλικό κάλυψης που παρέχει προστασία από αντίξοες καιρικές συνθήκες, ενώ εγκλωβίζει την θερμότητα και περιορίζει την μεταφορά μάζας και εντόμων
- Εξοπλισμό για επίτευξη περιβαλλοντικού ελέγχου για να διατηρηθούν οι επιθυμητές συνθήκες ανάπτυξης και παραγωγής.
- Σύστημα θρέψης για απρόσκοπτη παροχή H_2O , O_2 και θρεπτικών στοιχείων στο ριζικό σύστημα των φυτών.

1.2 ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Μετά την πρώτη ενεργειακή κρίση την δεκαετία του '70 και στις αρχές της δεκαετίας του '80 η χρήση ενέργειας στα θερμοκήπια έχει γίνει ξανά κύριο ερευνητικό ζήτημα. Η ανάγκη για μείωση του ενεργειακού κόστους έχει ιδιαίτερη σημασία, επειδή η ενέργεια αποτελεί μεγάλο μέρος του συνολικού κόστους παραγωγής. Στις Μεσογειακές χώρες υπολογίστηκε ότι η χρήση ενέργειας για έλεγχο των συνθηκών περιβάλλοντος, είναι **20% - 30%** του συνολικού κόστους παραγωγής ([De Pascale and Maggio, 2004](#)), και το ποσοστό αυτό αυξάνεται για τις βορειότερες περιοχές. Επίσης και η απόλυτη χρήση ενέργειας διαφέρει μεταξύ συγκεκριμένων περιοχών: στην Φιλανδία, η συνολική κατανάλωση ενέργειας υπολογίστηκε σε **1900 MJ m⁻²** τον χρόνο ([Olofsson et](#)

al, 2006), στην Ολλανδία 1500 MJ m^{-2} (van der Knijff, 2004) και για τις νοτιότερες χώρες της Μεσογειακής λεκάνης κυμαίνεται από $900\text{-}1600 \text{ MJ m}^{-2}$ (Vesine et al, 2007).

Με το πρόσφατο έντονο ενδιαφέρον για το παγκόσμιο φαινόμενο του θερμοκηπίου και τις κλιματικές αλλαγές, η χρήση των συμβατικών καυσίμων είναι πάλι στην πολιτική ατζέντα (*Al Gore: the inconvenient truth*). Το Διεθνές Πρωτόκολλο του Κιότο κατέληξε σε έναν νέο παγκόσμιο στόχο και οι κυβερνήσεις πολλών χωρών έχουν θέσει μέγιστα επίπεδα εκπομπών CO_2 για διάφορες βιομηχανίες, για παράδειγμα για την Ολλανδία τίθεται μείωση 30% των εκπομπών CO_2 μέχρι το 2020 σε σύγκριση με το 1990 . Η βιομηχανία θερμοκηπίων είναι επομένως αντιμέτωπη με οικονομική, πολιτική και κοινωνική πίεση για μείωση της χρήσης ενέργειας και βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των θερμοκηπίων μέσω τεχνολογικών καινοτομιών. Η ενεργειακή αποδοτικότητα των θερμοκηπίων δύναται να αυξηθεί με δύο κυρίως τρόπους (Bakker et al, 2007):

1. *Μείωση της εισερχόμενης ενέργειας εντός του θερμοκηπιακού συστήματος.* Αυτή η στρατηγική μπορεί να χωριστεί σε δύο διαφορετικά μέρη:
 - Βελτίωση της τεχνολογία μετατροπής της ενέργειας έτσι ώστε να αυξηθεί η μετατροπή της ενέργειας της πηγής σε χρησιμοποιούμενη ενέργεια (θέρμανση, ψύξη, τεχνητός φωτισμός)
 - Μείωση των ενεργειακών απωλειών προς το περιβάλλον
2. *Αύξηση της παραγωγής ανά μονάδα επιφάνειας.* Η αύξηση της παραγωγής ανά μονάδα επιφάνειας μπορεί να επιτευχθεί, κυρίως με βελτιστοποίηση των συνθηκών ανάπτυξης των θερμοκηπιακών καλλιεργειών. Πράγματι όλα εκείνα τα καλλιεργητικά μέτρα που αυξάνουν την παραγωγή, όπως βελτιωμένη άρδευση, καλύτερη θρέψη, αποτελεσματικός έλεγχος των εντόμων και ασθενειών, καλύτερη εκμετάλλευση της διαθέσιμης θερμοκηπιακής έκτασης και η επιλογή των κατάλληλων ποικιλιών, βελτιώνουν την ενεργειακή απόδοση των θερμοκηπίων.

Εάν το ενδιαφέρον εστιαστεί μεμονωμένα στην ενεργειακή αποδοτικότητα των θερμοκηπίων χωρίς εστίαση στην απόλυτη χρήση ενέργειας, θα υπάρχουν απροσδόκητα και ανεπιθύμητα αποτελέσματα από περιβαλλοντικής άποψης. Στις Μεσογειακές περιοχές, η θέρμανση χρησιμοποιείται συστηματικά πλέον, για επίτευξη πρώιμης παραγωγής και για σταθερή απόδοση ποιοτικής και ποσοτικής παραγωγής (Baudoin, 1999). Αυτό οδήγησε σε υψηλότερη ενεργειακή απόδοση των θερμοκηπίων, αλλά ταυτόχρονα και σε πολύ υψηλότερη απόλυτη χρήση ενέργειας. Επιπλέον, ένας βελτιωμένος έλεγχος των συνθηκών περιβάλλοντος του θερμοκηπίου, χρησιμοποιώντας την απαιτούμενη θέρμανση και τεχνητό φωτισμό, και εντατικοποιημένα σχήματα παραγωγής, οδηγούν σε ακόμα μεγαλύτερη αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας (De Pascale and Maggio, 2004). Τα ίδια ισχύουν και για τις βορειότερες χώρες, εκεί όμως η υψηλή κατανάλωση ενέργειας σχετίζεται εκτός από την θέρμανση με την χρήση τεχνητού φωτισμού η οποία εφαρμόζεται σε πολύ υψηλότερη κλίμακα σε σχέση με τις Μεσογειακές χώρες. Για παράδειγμα στην Φιλανδία η κατανάλωση ενέργειας για τεχνητό φωτισμό είναι πάνω από 200 W m^{-2} (Olofsson et al, 2006) και πάνω από 150 W m^{-2} στην Ολλανδία. Η εφαρμογή των παραπάνω παρά το πρόβλημα της αυξημένης χρήσης ενέργειας έχει οδηγήσει σε ταχεία εξάπλωση των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων στην Ευρώπη λόγω της συμαπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας που γίνεται (πίνακας 1-2).

Πίνακας 1-2: Εξέλιξη των Θερμοκηπιακών Εγκαταστάσεων στην Ευρώπη

Περιοχή	1984 (ha)	1987 (ha)	1990 (ha)	2004 (ha)
Βόρεια Ευρώπη	56.800	63.900	69.500	110.000
Μεσογειακές Χώρες	33.500	39.300	49.500	105.000

Στις Μεσογειακές χώρες, στις Κάτω Χώρες και στις Ηνωμένες Πολιτείες -εκεί συγκεντρώνεται το μεγαλύτερο μέρος της βιομηχανίας των θερμοκηπίων- η συνολική κατανάλωση ενέργειας και οι αντίστοιχες εκπομπές CO₂, παρουσιάζουν μικρές διακυμάνσεις παρά τις προσπάθειες βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας των θερμοκηπίων. Για παράδειγμα στις Κάτω Χώρες οι εκπομπές CO₂ ήταν 6.44 εκατομμύρια τόνους το 2004 σε σχέση με το 1990 που ήταν 6.76 εκατομμύρια τόνους (van der Knijff, 2004). Η μικρή μείωση της συνολικής παραγωγής εκπομπών CO₂ παρά τον περίπου διπλασιασμό της φυτικής παραγωγής, οφείλεται σε αντίστοιχη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των θερμοκηπίων.

Η υπέρτατη πρόκληση σήμερα είναι η εύρεση τρόπων που θα ικανοποιούν και τις δύο ανάγκες: βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση των θερμοκηπίων σε συνδυασμό με απόλυτη μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και των σχετικών εκπομπών CO₂. Η ανάπτυξη θερμοκηπιακών συστημάτων "ενεργειακά αποδοτικών" (μη ενεργοβόρων), είναι μια διαδικασία βελτιστοποίησης και το συνολικό αποτέλεσμα μιας σταδιακής προόδου και προσαρμογής του συστήματος παραγωγής, ώστε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις δεδομένων περιορισμών και τοπικών συνθηκών. Προς αυτήν την κατεύθυνση, ισχύουν οι στόχοι που έχουν τεθεί από τους de Pascale and Maggio (2004) για τις Μεσογειακές χώρες και ισχύουν και για τις βρειότερες περιοχές:

- Κατά την διάρκεια του φθινοπώρου/χειμώνα ο αντικειμενικός στόχος είναι να ελαχιστοποιηθούν οι ενεργειακές απώλειες και να μεγιστοποιηθεί η ποσότητα ακτινοβολίας που προέρχεται είτε από φυσικό είτε από τεχνητό φωτισμό.
- Κατά την διάρκεια της άνοιξης/καλοκαιριού ο στόχος είναι να μειωθούν οι υψηλές θερμοκρασίες. Βελτιωμένες τεχνικές λύσεις εφαρμόζονται πέραν του φυσικού εξαερισμού και ακόμα και στην Φιλανδία έχει εισαχθεί η ψύξη των θερμοκηπίων (Sarkka et al, 2006).

Τα παραπάνω εναρμονίζονται με τις προσπάθειες να ελεγχθεί η διαδικασία παραγωγής σε ετήσια βάση, να βελτιστοποιηθεί το επίπεδο παραγωγής και κατά συνέπεια η ενεργειακή αποδοτικότητα των θερμοκηπίων.

1.3 ΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Η κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανση του θερμοκηπίου αντιπροσωπεύει ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα για όλους τους παραγωγούς θερμοκηπιακών προϊόντων σε όλο τον κόσμο. Αυτό διότι οι απώλειες του θερμοκηπίου σε θερμότητα λόγω των λεπτών τοιχωμάτων του και της κατασκευής του, είναι πολύ μεγάλες, **6-12** φορές μεγαλύτερες από εκείνες ενός συνήθους κτίσματος ίσου όγκου. Η θερμότητα παρέχεται στο θερμοκήπιο κυρίως μέσω των συμβατικών συστημάτων θέρμανσης (συστήματα σωληνώσεων θερμού νερού, συστήματα θερμού αέρα) και σε περιορισμένη έκταση με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, γεωθερμία, βιομάζα). Για να επιτευχθεί με αυτές τις μεθόδους η απαραίτητη θερμοκρασία στο επίπεδο των φυτών, το εσωτερικό του θερμοκηπίου πρέπει να θερμανθεί στην ίδια ή σε ακόμα υψηλότερη θερμοκρασία από την καθορισμένη θερμοκρασία των φυτών. Το αποτέλεσμα αυτής της πρακτικής σε όλες τις μελέτες που διεξάγονται είναι ότι, τα θερμοκήπια καταναλώνουν απαράδεκτα υψηλά ποσά ενέργειας σε σχέση με την ενέργεια που απορροφάται από τα φυτά προκειμένου να επιτευχθεί και να διατηρηθεί η επιθυμητή για την ανάπτυξη τους θερμοκρασία, για να καλύπτουν τις αυξημένες ενεργειακές απώλειες που λόγω κατασκευής παρουσιάζουν.

Οι κύριες διαδικασίες ενεργειακών απωλειών που συμβαίνουν σε ένα θερμοκήπιο είναι: **(i)** συναγωγή και ακτινοβολία από το υλικό κάλυψης του θερμοκηπίου, **(ii)** μεταφορά θερμότητας και λανθάνουσας θερμότητας λόγω διαφυγών και εξαερισμού και **(iii)** μεταφορά θερμότητας με αγωγή προς το έδαφος. Στοχεύοντας στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και στην δημιουργία ενός ενεργειακά συντηρητικού θερμοκηπίου, πολλές τεχνικές έχουν προταθεί και εφαρμοστεί κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών. Μεταξύ αυτών είναι:

- η βελτίωση της μόνωσης του θερμοκηπίου που επιτυγχάνεται με τεχνικές διπλής κάλυψης ([Abak et al, 1994](#); [Gupta & Chandra, 2002](#)), με χρήση πετασμάτων εξοικονόμησης ενέργειας ([Chandra & Albright, 1980](#); [Kittas et al, 2003](#); [Glosal & Tiwari, 2004](#); [Dieleman & Kempkes, 2006](#)), με χρήση διαφορετικών υλικών κάλυψης όπως τυπικό υαλοπίνακα, LE-υαλοπίνακα, PE, D-PE, PE-UV, PE-IR, PVC κλπ ([Zhang et al, 1996](#); [Papadakis et al, 2000](#); [Cemek et al, 2006](#)) με ανάπτυξη ειδικών υλικών κάλυψης που συνδυάζουν υψηλή περατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας και αυξημένη μόνωση όπως το **Lexan® ZigZag™** ([Swinkels et al, 2001](#)), με εφαρμογή θέρμανσης στο υπέδαφος του θερμοκηπίου ([Kupraska and Slipek, 2000](#)) κλπ.
- η μείωση των διαφυγών/εξαερισμού που επιτυγχάνεται με βελτίωσης της δομικής κατασκευής του θερμοκηπίου και
- η βελτίωση των συστημάτων θέρμανσης

Αν και οι ανωτέρω μέθοδοι οδηγούν σαφώς σε εξοικονόμηση ενέργειας, οι συνολικές ενεργειακές απώλειες του θερμοκηπίου συνεχίζουν να παραμένουν υψηλές (ειδικά αυτές που προέρχονται από την επιφάνεια του καλύμματος), διότι δεν εξετάζεται η βασική προϋπόθεση της θέρμανσης ολόκληρου του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου για να καλυφθούν τα φυτά με την απαιτούμενη ποσότητα θερμότητας.

Δεδομένης της ταχείας εξάπλωσης των θερμοκηπίων υπάρχει οικονομικό και ενεργειακό κίνητρο για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας

Σκοπός της παρούσας Διδακτορικής διατριβής είναι η συμβολή στην ανάπτυξη ενός ενεργειακά αποδοτικού θερμοκηπιακού συστήματος με σημαντική μείωση της εισερχόμενης ενέργειας στο σύστημα μέσω:

- της δημιουργίας ενός "ψυχρού θερμοκηπίου" στο οποίο τα φυτά θα λαμβάνουν απευθείας την ενέργεια που χρειάζονται προκειμένου να φτάσουν και να διατηρήσουν την επιθυμητή για την ανάπτυξή τους θερμοκρασία χωρίς να υπάρχει ανάγκη για αντίστοιχα αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου
- της μείωσης των ενεργειακών απωλειών προς το περιβάλλον έτσι ώστε συγκρινόμενο με ένα συμβατικό θερμοκήπιο να έχει σημαντικά ενεργειακά οφέλη

Για την επίτευξη των παραπάνω πραγματοποιήθηκε συστηματική μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς πειραματικού θερμοκηπίου με χρήση μικρού μήκους κύματος υπέρυθρης ακτινοβολίας (**NIR**) ως εναλλακτικό σύστημα θέρμανσης. Ως γνωστό, στα συστήματα θέρμανσης με ακτινοβολία η θερμότητα μεταδίδεται απευθείας από την πηγή στον δέκτη, στην προκειμένη περίπτωση από το σύστημα στα φυτά και το έδαφος. Ειδικότερα περιλαμβάνεται η μελέτη ενός "ψυχρού" θερμοκηπίου με χρήση μικρού μήκους κύματος υπέρυθρης ακτινοβολίας και ενός "θερμού θερμοκηπίου" με χρήση συμβατικού συστήματος θέρμανσης. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται:

(i) στην ανάπτυξη ενός θερμικού μοντέλου προσομοίωσης του ενεργειακού ισοζυγίου του θερμοκηπίου, το οποίο ενσωματώνει όλα τα ουσιαστικά θερμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα όταν εφαρμόζονται διαφορετικά συστήματα θέρμανσης, με σκοπό την περιγραφή του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου και την πρόβλεψη των ενεργειακών αναγκών του.

(ii) στην ανάπτυξη πειραματικών διατάξεων για την πραγματική εκτίμηση του ενεργειακού οφέλους, την υποστήριξη των αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης και την περαιτέρω βελτίωσή του

(iii) στην ποσοτικοποίηση του ενεργειακού οφέλους από την χρήση της υπέρυθρης ακτινοβολίας,

(iv) στην βελτίωση της ποιότητας του παραγομένου προϊόντος

1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η παρούσα διατριβή αποτελείται από 7 κεφάλαια. Στο **1^ο κεφάλαιο** γίνεται περιληπτική αναφορά στο τεχνολογικό πρόβλημα που πραγματεύεται η διατριβή και παρουσιάζεται ο σκοπός της. Στο **2^ο κεφάλαιο** γίνεται εκτενής ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας. Αυτή περιλαμβάνει: (i) τα συστήματα θέρμανσης των θερμοκηπίων και την θερμική συμπεριφορά των θερμοκηπίων κατά την χρήση αυτών των συστημάτων. (ii) τα μοντέλα προσομοίωσης του μικροκλίματος του θερμοκηπίου, δίνοντας έμφαση στα θερμικά μοντέλα προσομοίωσης που βασίζονται σε ισοζύγια ενέργειας και μάζας και καταλήγουν σε μια βελτιστοποιημένη λύση για ένα σύνολο

λειτουργικών συνθηκών. Στο **3^ο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του θερμοκηπίου, στο οποίο το θερμοκήπιο αναλύεται παρουσία θέρμανσης και καλλιέργειας. Ο σκοπός της ανάπτυξης του θερμικού μοντέλου είναι η προσομοίωση των κύριων διαδικασιών μεταφοράς θερμότητας που συμβαίνουν μέσα στο θερμοκήπιο και η πρόβλεψη των συνιστωσών εκείνων που επηρεάζουν την θερμική συμπεριφορά του θερμοκηπίου με βασικό στόχο την αξιόπιστη εκτίμηση του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου και την εκτίμηση των ενεργειακών αναγκών του ανάλογα με την τεχνική θέρμανσης που εφαρμόζεται. Στο **4^ο κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη έρευνα, οι οποίες αποτελούνται από δύο πειραματικά θερμοκήπια συζευγμένα με αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό, και περιγράφεται εκτενώς η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Η έρευνα περιλαμβάνει την ανάλυση και τον χαρακτηρισμό της θερμικής συμπεριφοράς των θερμοκηπίων με χρήση συμβατικού συστήματος θέρμανσης και συστήματος θέρμανσης με μικρού μήκους κύματος υπέρυθρη ακτινοβολία (NIR) αντίστοιχα. Τα παραπάνω πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την πιστοποίηση των δυνατοτήτων της υπέρυθρης ακτινοβολίας, την ποσοτικοποίηση του ενεργειακού οφέλους και την βελτίωση και πιστοποίηση της ποιότητας του μοντέλου με σκοπό την πλήρη παραμετρική διερεύνηση και βελτίωση του σχεδιασμού. Στο **5^ο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την υπέρυθρη ακτινοβολία σε σχέση με την συμβατική θέρμανση και ποσοτικοποιείται το ενεργειακό όφελος. Δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στην κατανόηση της θερμικής συμπεριφοράς του θερμοκηπίου όταν χρησιμοποιείται σύστημα θέρμανσης με υπέρυθρη ακτινοβολία λόγω της διαφορετικής αρχής λειτουργίας που την χαρακτηρίζει. Δίδονται τα αποτελέσματα της ποιότητας του μοντέλου προσομοίωσης τα οποία προέρχονται από την σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων με την βάση των πειραματικών δεδομένων. Τέλος δίνονται στοιχεία ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος και εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στο **6^ο κεφάλαιο** συνοψίζονται και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής. Στο **7^ο κεφάλαιο** παρουσιάζονται επιγραμματικά τα θέματα προς διερεύνηση που προέκυψαν μετά την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής. Τέλος δίδονται οι βιβλιογραφικές αναφορές καθώς και ο κατάλογος πινάκων και σχημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΤΟ ΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Το πρωταρχικό αντικείμενο ενός θερμοκηπίου είναι η υψηλότερη παραγωγή προϊόντων εκτός καλλιεργητικής περιόδου, η επίτευξη της οποίας προϋποθέτει βέλτιστες θερμοκρασίες σε κάθε στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας. Το μικροκλίμα των φυτών εντός του θερμοκηπίου καθορίζεται με όρους θερμοκρασίας αέρα, έντασης φωτισμού (ηλιακή ακτινοβολία ή τεχνητός φωτισμός), σύνθεσης αέρα (συγκέντρωση CO₂) και σύστασης εδάφους (H₂O, και θρεπτικά στοιχεία). Η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία αέρα και εδάφους είναι οι καθοριστικοί παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στην μελέτη της αλληλεπίδρασης του φυτού και του περιβάλλοντός του. Νεότερες έρευνες δείχνουν όμως, ότι και οι θερμοκρασία του φύλλου καθώς και η θερμοκρασία εδάφους πρέπει να είναι οι κατάλληλες για την ομαλή ανάπτυξη των φυτών. Για να επιτευχθούν βέλτιστες εσωτερικές συνθήκες, είναι απαραίτητη η θέρμανση, ιδιαίτερα κατά την διάρκεια των ψυχρών εποχών. Εφαρμογές θέρμανσης μέσα στα θερμοκήπια και βελτιστοποίηση της θερμοκρασίας του αέρα έχουν σημαντικό αποτέλεσμα πάνω στον χρόνο παραγωγής (πρωίμιση παραγωγής), στην ποιότητα και ποσότητα των παραγομένων προϊόντων (Santamouris, 1994b).

Η λειτουργία των θερμοκηπίων μέσα σε σχετικά μικρή περίοδο, εξελίχθηκε από εμπειρική δραστηριότητα σε επιστημονική. Αυτή η εξέλιξη κατέστη δυνατή εξαιτίας της βελτίωσης των τεχνολογικών εργαλείων και της ανάπτυξης ερευνητικών εργαλείων.

2.1.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ

I. Θερμοκρασία φυτού

Ανάμεσα στο φυτό και το περιβάλλον του συμβαίνει συνεχώς ανταλλαγή ενέργειας κυρίως με συναγωγή, ακτινοβολία και λανθάνουσα θερμότητα. Προφανώς και η ενέργεια που εκπέμπεται από το περιβάλλον του φυτού απορροφάται από αυτό, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία του μέχρι να αποκατασταθεί ισορροπία. Η θερμοκρασία ισορροπίας καθορίζεται από τα κάτωθι:

- Από την αφαίρεση ενέργειας από το φυτό μέσω αγωγής και συναγωγής. Καθώς την ημέρα αυξάνεται η μετακίνηση του αέρα λόγω εξαερισμού και διαφυγών του θερμοκηπίου, περισσότερη θερμότητα απομακρύνεται μέσω αγωγής και συναγωγής από το φυτό και η θερμοκρασία φυτού πλησιάζει την θερμοκρασία του αέρα. Όταν η θερμοκρασία του αέρα είναι υψηλότερη από αυτήν του φυτού (κυρίως την θερμική νύχτα όταν λειτουργεί σύστημα θέρμανσης) τότε η θερμότητα ρέει σε αντίθετη κατεύθυνση τείνοντας να αυξήσει την θερμοκρασία του φυτού.

- Από το γεγονός ότι το φυτό θα επανεκπέμψει θερμική ακτινοβολία προς το περιβάλλον του, ποσό που εξαρτάται από την διαφορά της τέταρτης δύναμης των θερμοκρασιών μεταξύ φυτού και περιβάλλοντος ($T_p^4 - T_a^4$)
- Από το ποσό της ενέργειας που χρησιμοποιείται σε φωτοχημικές διαδικασίες όπως είναι η φωτοσύνθεση και η αναπνοή. Η ποσότητα αυτή είναι αμελητέα και στο ενεργειακό ισοζύγιο παραλείπεται.
- Από το ποσό της λανθάνουσας θερμότητας που μεταφέρεται με την διαπνοή των φυτών
- Από την θερμική ικανότητα του φυτού να αποθηκεύει το ίδιο θερμότητα στους ιστούς και στην μάζα του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παρατηρείται διαφοροποίηση της θερμοκρασίας μεταξύ λεπτότερων και πυκνότερων φύλλων του ίδιου φυτού.

Το τελικό αποτέλεσμα των παραπάνω είναι να ελαχιστοποιείται η δυνατότητα ελέγχου του ενεργειακού ισοζυγίου της φυτικής επιφάνειας κάτω από ραγδαίες αλλαγές συνθηκών όπως της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, του εξαερισμού και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Η επίτευξη ομοιόμορφα κατανεμημένης θερμοκρασίας σε όλο τον χώρο του θερμοκηπίου παρουσιάζει ειδικές δυσκολίες, καθώς η θερμοκρασία ποικίλει από την μία περιοχή του θερμοκηπίου στην άλλη, εξαρτώμενη από τον τύπο και την διάταξη των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης, από την ταχύτητα και την διεύθυνση του ανέμου, από τον προσανατολισμό του θερμοκηπίου, την δομή του θερμοκηπίου και την διάταξη της καλλιέργειας. Ακόμα και αν η θερμοκρασία του αέρα δύναται να ελεγχθεί ομοιόμορφα σε όλο τον χώρο του θερμοκηπίου, η ανταπόκριση των φυτών παραμένει λειτουργία εξαρτώμενη μερικώς από την θέση του φυτού. Έχει παρατηρηθεί ότι η νότια περιοχή του θερμοκηπίου που έχει προσανατολισμό στην διεύθυνση Α-Δ δίνει υψηλότερες αποδόσεις. Ο λόγος για αυτές τις διακυμάνσεις απόδοσης οφείλεται κυρίως στην μεταβολή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στα τοιχώματα του θερμοκηπίου και στο ποσό της εισερχόμενης ακτινοβολίας εντός του θερμοκηπίου.

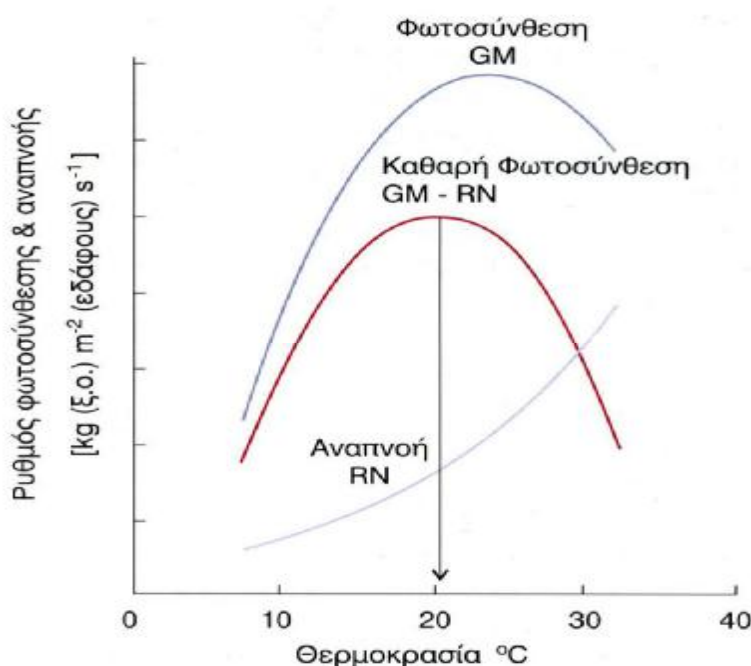
II. Επίδραση της θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία είναι μια σημαντική παράμετρος από την οποία εξαρτώνται βασικές φυσιολογικές λειτουργίες κοινές σε όλα τα φυτά. Αυτές είναι η φωτοσύνθεση, αναπνοή, διαπνοή, πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων, αναπαραγωγή, επιμήκυνση, και πολλές άλλες. Η θερμοκρασία επηρεάζει όλες αυτές τις διαδικασίες με διάφορους τρόπους και σε διαφορετικό βαθμό. Πρώτα ο **Stalfelt (1937)** ανέπτυξε μια σχέση ανάμεσα στην θερμοκρασία και στον ρυθμό της αναπνοής και φωτοσύνθεσης. Μέσα σε ένα περιορισμένο εύρος θερμοκρασιών εντός του οποίου γίνεται η ανάπτυξη του φυτού, οι χημικές αυτές διαδικασίες διπλασιάζονται από κοινού για κάθε **10 °C** αύξηση της θερμοκρασίας. Η αναπνοή δείχνει μια συνεχή αύξηση καθώς η θερμοκρασία αυξάνει, το ίδιο και η φωτοσύνθεση. Αλλά η φωτοσύνθεση από ένα σημείο και μετά περιορίζεται από την πλεονάζουσα διαθέσιμη ενέργεια και συγκέντρωση **CO₂**. Το μέγιστο της διαφοράς (μέγιστο καθαρής φωτοσύνθεσης) καθορίζει την βέλτιστη θερμοκρασία για μεγιστοποίηση της παραγωγής (σχήμα 2-1).

Η αύξηση της θερμοκρασίας επίσης επηρεάζει και φυσιολογικές λειτουργίες του φυτού όπως είναι η διαπνοή. Μια αύξηση της θερμοκρασίας των φύλλων θα οδηγήσει σε αύξηση του ρυθμού διαπνοής. Εξαιτίας αυτού η διαπνοή γίνεται με γρηγορότερο

ρυθμό υπό την προϋπόθεση ότι η πίεση υδρατμών στο περιβάλλον του φύλλου παραμένει σταθερή. Επίσης αν η θερμοκρασία του εδάφους είναι χαμηλή ή πολύ χαμηλή, η πρόσληψη H_2O και θρεπτικών στοιχείων καθώς και η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος μειώνονται, ακόμα και σε τέτοιο σημείο που να σταματήσει και η ανάπτυξη του υπέργειου μέρους του φυτού άσχετα από την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην διαδικασία της επιμήκυνσης διαφέρει ανάλογα με το μέρος του φυτού στο οποίο αναφερόμαστε. Για παράδειγμα μια νυχτερινή θερμοκρασία $20\text{ }^\circ\text{C}$ προκαλεί καθημερινή επιμήκυνση του ριζικού συστήματος κατά 10 mm αλλά δεν έχει την ίδια επίδραση στην επιμήκυνση του βλαστού. Όσον αφορά ολόκληρο το φυτό, η μέγιστη επιμήκυνση συμβαίνει σε κάποιες ενδιάμεσες θερμοκρασίες.



Σχήμα 2-1: Επίδραση της θερμοκρασίας στον ρυθμό της φωτοσύνθεσης και αναπνοής (Μαυρογιαννόπουλος, 2005)

III. Βέλτιστες θερμοκρασίες

Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου θεωρείται πολύ σημαντικός παράγοντας και ασκεί επιρροή στην ταχύτητα της πορείας των φυσιολογικών διεργασιών που συντελούν στην ανάπτυξη του φυτού. Η καλύτερη απόδοση της καλλιέργειας γίνεται σε ένα ορισμένο εύρος τιμών, το οποίο καλείται βέλτιστο και για τις θερμοκηπιακές καλλιέργειες βρίσκεται μεταξύ $10\text{ }^\circ\text{C}$ και $30\text{ }^\circ\text{C}$. Ως βέλτιστη θερμοκρασία αναφέρεται η ευνοϊκή θερμοκρασία στην οποία τα ένζυμα που είναι ευαίσθητα στην θερμότητα και υπεύθυνα για τις βιοχημικές αντιδράσεις του φυτού ενεργοποιούνται και το φυτό αναπτύσσεται απρόσκοπτα κάτω από συγκεκριμένες κλιματολογικές συνθήκες. Στον πίνακα 2-1 δίνεται ένα εύρος βέλτιστων θερμοκρασιών (ημερήσιων και νυχτερινών) για τα κυριότερα είδη και ποικιλίες που καλλιεργούνται στα θερμοκήπια. Από τον πίνακα μερικές γενικές αρχές μπορούν να αναδειχθούν όπως:

- Τα περισσότερα φυτικά είδη απαιτούν ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας. Αυτό διότι καθαρή ανάπτυξη της καλλιέργειας συμβαίνει όταν η φωτοσύνθεση είναι μεγαλύτερη από την αναπνοή. Κατά την διάρκεια της ημέρας η βέλτιστη θερμοκρασία στο θερμοκήπιο είναι αυτή που δίνει την μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ της παραγωγής της φωτοσύνθεσης και της κατανάλωσης της αναπνοής, δηλ. αυτή που δίνει την μέγιστη καθαρή φωτοσύνθεση (σχήμα 2-1). Την νύχτα που δεν υπάρχει φωτοσύνθεση η θερμοκρασία των φυτών διατηρείται σε χαμηλότερα επίπεδα για να μειωθεί ο ρυθμός αναπνοής (Kurata, 1989; Nelson 2003). Μερικά ιθαγενή είδη των τροπικών περιοχών (τα περισσότερα φυλλώδη φυτά) συνήθως αναπτύσσονται καλύτερα εντός μιας σταθερής θερμοκρασίας ημέρας - νύχτας.
- Οι βέλτιστες θερμοκρασίες διαφέρουν με την περιοχή και την τοποθεσία (συνολική διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια)
- Οι βέλτιστες θερμοκρασίες διαφέρουν με την ηλικία και το στάδιο ανάπτυξης του φυτού (ριζοβολία, φύτευμα, ανθοφορία, βολβοποίηση κλπ)
- Οι βέλτιστες θερμοκρασίες διαφέρουν ανάλογα με τους αντικειμενικούς στόχους του καλλιεργητή σε σχέση με την απόδοση παραγωγής

Πίνακας 2-1: Βέλτιστες ημερήσιες και νυχτερινές θερμοκρασίες για διάφορες θερμοκηπιακές καλλιέργειες (Ολύμπιος, 2001)

Θερμοκηπιακή καλλιέργεια	Ημερήσια θερμοκρασία (°C)	Νυχτερινή θερμοκρασία (°C)
Τομάτα	21-27	14-16
Πιπεριά	22-24	16-19
Μελιτζάνα	21-27	16-18
Αγγούρι	19-24	16-19
Κολοκύθι	25-27	16-18
Πεπόνι	20-24	16-18
Καρπούζι	21-27	18-20
Φασολάκι	25-28	15-17
Μαρούλι	17-21	14-16
Τριαντάφυλλο	23	16-18
Χρυσάνθεμο	18-22	16-18
Γαρύφαλλο	22	16-18
Ζέρμπερα	18-22	16-18
Γλαστρικά Φυλλώδη	20-24	18-20

IV. Θερμότητα και θερμοκήπιο

Τα περισσότερα είδη και ποικιλίες που καλλιεργούνται στα θερμοκήπια είναι απαιτητικά σε ένταση φωτός και θερμότητα. Οι θερμικές ροές που συμβαίνουν λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που παρουσιάζει το θερμοκήπιο είναι:

1. Κάθε θερμοκήπιο, επειδή καλύπτεται με διαφανές κάλυμμα, δέχεται στο εσωτερικό του το μεγαλύτερο μέρος της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας.
2. Οι απώλειες του θερμοκηπίου σε θερμότητα, λόγω του λεπτού τοιχώματος του καλύμματος είναι πολύ μεγάλες, **6-12** φορές μεγαλύτερες από εκείνες ενός συνήθους κτίσματος ίσου όγκου.
3. Πιο συγκεκριμένα, η ενέργεια που χάνεται τη νύχτα, όταν $T_o < T_a$ είναι άμεσα ανάλογη με την συνολική επιφάνεια της δομής του θερμοκηπίου και με τη διαφορά θερμοκρασίας. Μια τέτοια είδους σχέση αντιπροσωπεύει υψηλές απαιτήσεις για να διατηρηθεί μια δεδομένη εσωτερική θερμοκρασία (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

Λόγω των ιδιαίτερων αυτών χαρακτηριστικών τις ηλιόλουστες ημέρες, η θερμοκρασία του θερμοκηπίου ανέρχεται σε πολύ υψηλά επίπεδα και τις ψυχρές νύχτες η θερμοκρασία πέφτει σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Συνεπώς η απόδοση της παραγωγής είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις επικρατούσες θερμοκρασίες εντός του θερμοκηπίου.

2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε η θερμοκρασία αποτελεί πρωταρχική παράμετρο στα περισσότερα συστήματα κλιματολογικού ελέγχου. Αυτά περιλαμβάνουν συστήματα θέρμανσης για έλεγχο της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου που περιβάλλει τον φυτικό θόλο, της θερμοκρασίας των φύλλων καθώς και της θερμοκρασίας του εδάφους στα ψυχρότερα κλίματα. Τα συστήματα θέρμανσης που χρησιμοποιούνται σήμερα στα θερμοκήπια ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

- *Συμβατικά Συστήματα Θέρμανσης.* Είναι τα περισσότερο διαδεδομένα συστήματα θέρμανσης. Έχουν υψηλό συντελεστή ενεργειακής απόδοσης αλλά και πολύ υψηλό ενεργειακό προϋπολογισμό λόγω της κατανάλωσης συμβατικών καυσίμων (πετρέλαιο). Με αυτά τα συστήματα η ενέργεια προσφέρεται πρωταρχικά στον αέρα του θερμοκηπίου. Επειδή η διατήρηση ισοθερμοκρασιακού κλίματος σε όλο το θερμοκηπίο είναι απαραίτητη, οι συνολικές ενεργειακές απώλειες είναι πολύ υψηλές. Πολύ σημαντικός παράγοντας σε θερμοκήπια με χρήση συμβατικών συστημάτων, είναι η ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας για να διατηρηθούν εντός του θερμοκηπίου οι επιθυμητοί περιβαλλοντικοί όροι. Η ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας είναι δύσκολη με αυτά τα συστήματα και η χρήση τους μπορεί να μην οδηγήσει και ένα ομοιόμορφο θερμικό περιβάλλον. Τα ανομοιόμορφα θερμικά περιβάλλοντα αναγκάζουν τα φυτά σε διαφορετικούς ρυθμούς αύξησης, με πιθανά προβλήματα ασθενειών, με απρόβλεπτα

αποτελέσματα από εφαρμογές λίπανσης και ορμονών, και γενικά ένα δυσκολότερο σύστημα παραγωγής (Giacomelli, 2002).

- *Συστήματα Θέρμανσης με Χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.* Έχουν χαμηλό ενεργειακό κόστος συμβάλλοντας στην εξοικονόμηση ενέργειας στα θερμοκήπια αλλά και χαμηλό συντελεστή ενεργειακής απόδοσης λόγω της διακύμανσης που παρουσιάζουν στην διαθεσιμότητά τους, του κόστους αρχικής επένδυσης και των δαπανηρών μεθόδων αποθήκευσης που απαιτούν και γι αυτό έχουν μικρό μερίδιο στην ενεργειακή αγορά. Και με αυτά τα συστήματα η ενέργεια προσφέρεται πρωταρχικά στον αέρα του θερμοκηπίου, στο θερμοκήπιο πρέπει να επικρατεί ισοθερμοκρασιακό κλίμα, ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας και οι ενεργειακές απαιτήσεις του θερμοκηπίου όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλή παραμένουν υψηλές.
- *Συστήματα θέρμανσης με χρήση ακτινοβολίας.* Είναι τα λιγότερο γνωστά και χρησιμοποιούμενα συστήματα. Χρησιμοποιήθηκαν στην πρώτη ενεργειακή κρίση την δεκαετία του '70, παρουσιάζοντας μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης έως και 40% (Blom and Ingratta, 1981). Με αυτά τα συστήματα η ενέργεια προσφέρεται απευθείας στα φυτά, και η δημιουργία ισοθερμοκρασιακού κλίματος είναι απαραίτητη μόνο στην περιοχή του φυτικού θόλου. Επειδή ο αέρας του θερμοκηπίου δεν θερμαίνεται άμεσα, οι συνολικές ενεργειακές απώλειες δύναται να είναι χαμηλότερες έως και 50% σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες συστημάτων θέρμανσης.

2.2.1 ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Κατά τον σχεδιασμό ενός συμβατικού συστήματος θέρμανσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι εξής παράγοντες:

- Η θερμοκρασία κατά την διάρκεια της θέρμανσης να είναι ομοιόμορφη σε ολόκληρο το θερμοκήπιο.
- Η θερμοκρασία των φυτών πρέπει να είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία του σημείου δρόσου, για να εμποδίζεται η συμπύκνωση των υδρατμών και έτσι να μειώνεται ο κίνδυνος μυκητολογικών ασθενειών.
- Η ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος θέρμανσης να μην είναι πολύ υψηλή.

Τα συμβατικά θερμοκηπιακά συστήματα θέρμανσης διακρίνονται σε συστήματα που μεταδίδουν τη θερμότητα με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία μέσω μιας θερμαινόμενης επιφάνειας (μεταλλικοί ή πλαστικοί σωλήνες) και σε συστήματα που μεταδίδουν τη θερμότητα με εξαναγκασμένη συναγωγή (δυναμικά) μέσω του θερμού αέρα που παράγεται από αερόθερμα και κυκλοφορεί εντός πλαστικών αγωγών πολυαιθυλενίου (PE). Τα πρώτα έχουν μεγάλο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης και δύσκολη ρύθμιση της λειτουργίας, αλλά ελάχιστα προβλήματα από καυσαέρια, ενώ πετυχαίνουν καλή ομοιογένεια θέρμανσης, ικανοποιητικό επίπεδο σχετικής υγρασίας και θέρμανσης του εδάφους και του αέρα. Επίσης, σε περίπτωση βλάβης του συστήματος, η πτώση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου γίνεται

βαθμιαία. Τα δυναμικά συστήματα έχουν μικρότερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, εύκολη ρύθμιση της λειτουργίας και πετυχαίνουν καλή ομοιομορφία θέρμανσης, γρήγορη θέρμανση των φυτών και μείωση της συμπύκνωσης των υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια του υλικού κάλυψης λόγω των ρευμάτων αέρα. Επίσης η χρήση θερμοδυναμικών συστημάτων διασφαλίζει μεγαλύτερη ευχέρεια κίνησης στο θερμοκήπιο, αφού καταλαμβάνουν μικρό όγκο. Όμως έχουν και σημαντικά μειονεκτήματα, όπως το γεγονός ότι δε θερμαίνεται το έδαφος, μειώνεται η σχετική υγρασία του αέρα του θερμοκηπίου, σε περίπτωση βλάβης του συστήματος μειώνεται απότομα η θερμοκρασία και όταν οι συσκευές είναι τοποθετημένες στο εσωτερικό υπάρχει κίνδυνος να ζημιωθούν τα φυτά από τα καυσαέρια. Ένας δεύτερος διαχωρισμός των συστημάτων θέρμανσης γίνεται στα τοπικά συστήματα, όπως αερόθερμα, θερμάστρες συναγωγής, κλπ και στα κεντρικά συστήματα θέρμανσης στα οποία περιλαμβάνονται οι λέβητες θερμού αέρα, θερμού νερού και ατμού. Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα συμβατικά συστήματα θέρμανσης είναι:

Θερμός αέρας εξαναγκασμένης συναγωγής από αερόθερμα (air heating)

Η θέρμανση με αερόθερμα χρησιμοποιείται πολύ στα θερμοκήπια διότι η αρχική εγκατάσταση στοιχίζει λιγότερο από ότι στην κεντρική θέρμανση με νερό. Αυτό το σύστημα θέρμανσης απαιτεί ένα σχετικά μέσο κεφάλαιο επένδυσης. Έχει υψηλή αποδοτικότητα, αυτοματοποιείται εύκολα, έχει γρήγορη ανταπόκριση στην ενέργεια του ελέγχου δηλ. δεν παρουσιάζει αδράνεια στην μεταβολή της θερμοκρασίας του χώρου. Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει είναι ότι σε περίπτωση βλάβης του συστήματος το θερμοκήπιο ψύχεται γρήγορα (ιδίως σε ψυχρότερα κλίματα), το έδαφος θερμαίνεται λιγότερο συγκριτικά με τα κεντρικά συστήματα θέρμανσης και η επιπλέον κατανάλωση ηλεκτρισμού η οποία μπορεί να είναι 15% περίπου της ενέργειας που απαιτείται για θέρμανση.

Ανάλογα με την πηγή ενέργειας που χρησιμοποιούν διακρίνονται σε: ηλεκτρικά αερόθερμα, αερόθερμα ατμού ή ζεστού νερού, αερόθερμα φυσικού αερίου - πετρελαίου ή στέρεων καυσίμων. Όσον αφορά τα τελευταία διαθέτουν λέβητα με ενσωματωμένο καυστήρα ο οποίος μπορεί να έχει, είτε ανοιχτό θάλαμο καύσης είτε κλειστό. Κατά την λειτουργία των αερόθερμων με ανοιχτό θάλαμο καύσης στην διάρκεια της ημέρας (που λειτουργεί η φωτοσύνθεση) και εφόσον το καύσιμο είναι καθαρό, τα φυτά επωφελούνται από το CO₂ που απελευθερώνεται στον χώρο. Την νύχτα όμως που το θερμοκήπιο είναι κλειστό η μείωση της συγκέντρωσης του O₂ έχει σημαντικά αρνητικές επιπτώσεις στην αποτελεσματικότητα της καύσης και στην καθαρότητα του αέρα στον χώρο του θερμοκηπίου (παραγωγή CO και άλλων αερίων επιβλαβών για τον άνθρωπο και τα φυτά).

Θερμός αέρας εξαναγκασμένης συναγωγής από σύστημα σωληνώσεων (Poly-Tube Systems)

Τα αερόθερμα κάνουν οριζόντια μετακίνηση του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο. Στα μικρής έκτασης θερμοκήπια ο ζεστός αέρας του αερόθερμου κατανέμεται στον χώρο του θερμοκηπίου απευθείας από την έξοδο του. Στα μεγαλύτερης έκτασης, για να αποφεύγεται η χρήση πολλών αερόθερμων, τοποθετούνται κατά μήκος του θερμοκηπίου λεπτοί διαφανείς σωλήνες πολυαιθυλενίου (Poly-Tube Systems) που συνδέονται με την έξοδο του θερμού αέρα του αερόθερμου, είναι κλειστοί στο άλλο άκρο και φέρουν κατά μήκος ζεύγη οπών διαμέτρου 5-7.5 cm. Οι σωλήνες αυτοί που κατανέμουν τον θερμό αέρα μπορεί να βρίσκονται στο επίπεδο του εδάφους ή να κρέμονται στην οροφή, πάνω από το ύψος των φυτών. Ο ζεστός αέρας που προέρχεται

από το αερόθερμο, βγαίνει από τις οπές με ταχύτητα η οποία δεν πρέπει να ξεπέρνα τα $7-9 \text{ ms}^{-1}$ και ανακατεύεται γρήγορα με τον αέρα του θερμοκηπίου. Μεγαλύτερη ταχύτητα είναι δυνατόν να ζημιώσει τα φυτά ειδικά όταν οι διάτρητοι πλαστικοί σωλήνες βρίσκονται στο έδαφος και η αντίσταση των φυτών στην ροή του αέρα δημιουργούν δυσκολία στην ομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας στον χώρο του θερμοκηπίου. Όταν δεν υπάρχει ανάγκη για θέρμανση, είναι δυνατόν να λειτουργεί μόνο ο ανεμιστήρας, κυκλοφορώντας τον αέρα του θερμοκηπίου για πιο ομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας στον χώρο του θερμοκηπίου και την μείωση των ασθενειών από συμπυκνώσεις υγρασίας στην επιφάνεια των φύλλων. Συνιστάται δε, η σχέση της συνολικής επιφάνειας των οπών προς την επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής του σωλήνα να είναι μεταξύ **1.5-2.0**. όταν είναι <1.3 η αποτελεσματικότητα του συστήματος δεν είναι καλή, και όταν είναι > 2.4 ο σωλήνας παρουσιάζει αστάθεια. Η θερμότητα με τα **Poly-Tube Systems** μεταδίδεται (i) με μεταφορά και ακτινοβολία από τα τοιχώματα των σωλήνων και (ii) με εξαγωγή (**infiltration**) του θερμού αέρα από τις οπές των σωλήνων.

Κεντρικά συστήματα θέρμανσης

Είναι το καταλληλότερο σύστημα για υαλόφρακτα θερμοκήπια μεγάλης έκτασης, γιατί η λειτουργία και συντήρησή του, συγκριτικά με τη χρησιμοποίηση πολλών αερόθερμων στα οποία κυκλοφορεί θερμός αέρας που διανέμεται μέσω αγωγών πολυαιθυλενίου **PE (air heating)**, στοιχίζει λιγότερο. Στα θερμοκήπια που χρησιμοποιούν υλικό κάλυψης το **PE** χρησιμοποιείται λιγότερο, γιατί ένα μεγάλο μέρος των σωληνώσεων τοποθετείται περιμετρικά δίπλα στο κάλυμμα και τα καλύμματα **PE** είναι περατά στην μεγάλη μήκος κύματος ακτινοβολία και παρουσιάζονται έτσι πολύ μεγάλες απώλειες θερμότητας. Διακρίνονται σε κεντρικά συστήματα θέρμανσης με ζεστό νερό ή με ατμό.

Κεντρικό σύστημα θέρμανσης με σωληνώσεις θερμού νερού (Hot Water Systems)

Αυτά τα συστήματα θέρμανσης έχουν το πλεονέκτημα όταν σχεδιαστούν σωστά να θερμαίνουν ικανοποιητικά και τον αέρα και το έδαφος του θερμοκηπίου και να δημιουργούνται πιο ομοιόμορφες θερμοκρασίες εντός του θερμοκηπίων. Παρουσιάζουν όμως το μειονέκτημα της μεγάλης θερμικής αδράνειας σε σχέση με το σύστημα θερμού αέρα. Η θέρμανση με θερμό νερό προτιμάται στην Ευρώπη, ακόμα και σε μεγάλα θερμοκήπια που βρίσκονται σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη από τη θέρμανση με ατμό. Σε αυτήν την περίπτωση εφαρμόζεται σύστημα υψηλής πίεσης που επιτρέπει υψηλότερες θερμοκρασίες (**95 °C**) στο νερό και επομένως μεγαλύτερη θερμική απόδοση, σε σχέση με τα συστήματα χαμηλής πίεσης (θερμοκρασία νερού **85 °C**). Τα συστήματα θέρμανσης αυτά απαιτούν λέβητα (**boiler**), βαλβίδες και άλλα απαραίτητα εξαρτήματα.

Η θερμότητα παράγεται σε λέβητα που είναι σε μόνιμη θέση μέσα ή έξω από το θερμοκήπιο, μεταφέρεται με νερό το οποίο οδηγείται στο θερμοκήπιο με σωληνώσεις και αποδίδεται στον χώρο του θερμοκηπίου πάλι με σωληνώσεις. Οι σωληνώσεις απόδοσης της θερμότητας στον χώρο του θερμοκηπίου, είναι συνήθως χαλύβδινοι σωλήνες διαμέτρου **5 cm**. Έχουν μήκος το οποίο προσδιορίζεται από τις απαιτούμενες θερμίδες και την απόδοση των σωλήνων, διατρέχουν το θερμοκήπιο και δημιουργούν μια μεγάλη επιφάνεια απόδοσης της θερμότητας με μεταφορά και ακτινοβολία. Γενικά το απαιτούμενο μήκος των σωλήνων είναι συνήθως μεγαλύτερο από το διπλάσιο του μήκους της περιμέτρου του θερμοκηπίου.

Οι σωλήνες θέρμανσης τοποθετούνται παράλληλα προς τις γραμμές των φυτών για να μην εμποδίζουν την κυκλοφορία στο θερμοκήπιο. Η θερμότητα εντός του θερμοκηπίου χάνεται πιο γρήγορα στην περιφέρεια από ότι στο κέντρο. Γι' αυτό για να υπάρξει ομοιόμορφη θερμοκρασία στο χώρο του, θα πρέπει ένα πολύ μεγάλο μέρος της ενέργειας να αποδίδεται στην περιφέρεια με την εγκατάσταση ικανού μήκους σωληνώσεων. Δεν πρέπει όμως να τοποθετούνται όλοι περιμετρικά για τα ρεύματα του αέρα που δημιουργούνται από τις ψυχρές επιφάνειες της οροφής προκαλούν κατά τόπους ψυχρές θέσεις μέσα στο θερμοκήπιο. Ως γενικός κανόνας ισχύει το 1/3 των σωληνώσεων (όχι πάνω από 6 σειρές σωλήνων και όχι λιγότερο από 2 σειρές) να τοποθετείται περιμετρικά και τα 2/3 των σωληνώσεων να τοποθετούνται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου χαμηλά μεταξύ των φυτών, ή ένα μέρος αυτών μεταξύ των φυτών και το άλλο στην οροφή. Τέλος εκτός από του κοινούς χαλύβδινους σωλήνες για θέρμανση θερμοκηπίων υπάρχουν και οι πτερυγιοφόροι σωλήνες, έτσι ώστε η μεταφορά θερμότητας ανά μονάδα μήκους στον χώρο να είναι πολύ μεγαλύτερη, τετραπλάσια ή και παραπάνω από τους συνηθισμένους. Επίσης υπάρχουν οι πτερυγωτοί σωλήνες από αλουμίνιο που έχουν σχεδιαστεί από Γερμανούς κατασκευαστές, οι οποίοι προσφέρουν τα πλεονεκτήματα του λιγότερο περιεχόμενου σε νερό σε σχέση με τους χαλύβδινους και την γρηγορότερη ανταπόκριση στην ενέργεια του ελέγχου.

Κεντρικό σύστημα θέρμανσης με σωληνώσεις ατμού (Steam Heating System)

Σε σχέση με τα κεντρικά συστήματα θέρμανσης με θερμό είναι πιο πολύπλοκα στην εγκατάσταση τους και απαιτούν περισσότερη συντήρηση. Απαιτούν μία αρχικά υψηλή επένδυση, αλλά έχουν και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Το σύστημα θέρμανσης με ατμό χρησιμοποιείται συχνά στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη (Β.Ευρώπη) καθώς ο ατμός μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις αποδοτικά. Το σύστημα χρειάζεται λέβητα, βαλβίδες, παγίδες και άλλα εξαρτήματα. Οι σωληνώσεις ατμού κατά την λειτουργία του συστήματος θέρμανσης βρίσκονται σε θερμοκρασία 102^o C κάτω από μια σχετικά χαμηλή πίεση των 25 Pa περίπου, σε αντίθεση με τις σωληνώσεις θερμού νερού που βρίσκονται σε θερμοκρασία χαμηλότερης αυτής του βρασμού. Λόγω της μετατροπής της λανθάνουσας θερμοκρασίας σε αισθητή με την συμπύκνωση του νερού μέσα στον σωλήνα, απαιτείται μικρότερη επιφάνεια σωλήνων για να απόδοση την ίδια ποσότητα θερμίδων στο χώρο του θερμοκηπίου, συγκριτικά με τα συστήματα θερμού νερού. επίσης επειδή η κυκλοφορία του ατμού μέσα στις σωληνώσεις συναντά μικρότερες αντιστάσεις απ' όσο το νερό, η συνήθης διάμετρος για σωληνώσεις ατμού είναι 2.5-4 cm. Οι σωλήνες μπορεί να είναι λείοι ή πτερυγωτοί και το όλο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για την παστερίωση του εδάφους.

2.2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Από τη στιγμή που η εφαρμογή των συστημάτων θέρμανσης απαιτείται σχεδόν σε όλα τα θερμοκήπια, η κατανάλωση καυσίμων γίνεται ένας σημαντικός οικονομικός παράγοντας. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί από την χρήση χαμηλού κόστους τεχνικών θέρμανσης αντί της θέρμανσης με συμβατικά καύσιμα. Εξαιτίας του υψηλού κόστους και της αβεβαιότητας της διαθεσιμότητας των συμβατικών καυσίμων, σημαντική προσοχή έχει δοθεί στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως εναλλακτικοί

τρόποι θέρμανσης των θερμοκηπίων. Τα πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους οι οποίοι με το πέρασμα του χρόνου εξαντλούνται.
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο επιπλέον δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων συμβάλλοντας έτσι στην εξοικονόμηση ενέργειας στα θερμοκήπια.
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι αποδεκτή από το κοινό.
- Θεωρούνται «πράσινες» επειδή προκαλούν ελάχιστη εξάντληση των επίγειων αποθεμάτων και μηδενικές αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια ενεργειακής παραγωγής.

Τα μειονεκτήματά τους επίσης είναι:

- Παρουσιάζουν διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά τους που μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών
- Εξαιτίας αυτής της διακύμανσης απαιτούν δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης, δαπανηρά υπερμεγέθη και / ή συστήματα μεγάλης ενεργειακής αποθήκευσης
- η χαμηλή διαθεσιμότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συνήθως οδηγεί σε χαμηλό συντελεστή χρησιμοποίησης των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσής τους. Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές των συμβατικών καυσίμων παραμένει ακόμη υψηλό, γι αυτό και δεν έχουν κατορθώσει να αποκτήσουν βιώσιμο ποσοστό της ενεργειακής αγοράς.

Η απόδοση αυτών των συστημάτων εξαρτάται έντονα από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες της περιοχής και τα πρότυπα καλλιέργειας (Rozakis et al, 1997). Η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια από θερμικά απόβλητα και η βιομάζα μπορούν να αξιοποιηθούν στη θέρμανση του θερμοκηπίου. Στην πράξη, εφαρμογή με σχετικά καλά αποτελέσματα έχουν βρει αρχικά η ηλιακή ενέργεια και δευτερευόντως η γεωθερμική ενέργεια και η βιομάζα. Η αιολική ενέργεια ελάχιστα η καθόλου έχει χρησιμοποιηθεί στην θέρμανση των θερμοκηπίων γιατί δεν είναι προβλέψιμη, ομαλή και συνεχής και το μεγάλο πρόβλημα βρίσκεται στην αποθήκευσή της, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί όταν χρειάζεται. Επίσης έχει υψηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης των μεγάλης ισχύος συστημάτων που χρησιμοποιούνται.

Η γεωθερμική ενέργεια συναντάται συνήθως σε περιοχές με σχετικά πρόσφατη ηφαιστειότητα, γιατί εκεί παρουσιάζεται το φαινόμενο, διάπυρο υλικό από το εσωτερικό της γης να έχει κινηθεί προς την επιφάνεια και το υπέδαφος να έχει θερμανθεί. Πρόκειται για την ενέργεια που παράγεται στο υπέδαφος και μεταφέρεται στην επιφάνεια του εδάφους μέσω διαφόρων ρευστών (κυρίως του νερού), τα οποία βρίσκουν φυσική διέξοδο από τα βάθη της γης προς την επιφάνεια ή ανεβαίνουν με ειδικές γεωτρήσεις. Στην χρήση της γεωθερμίας, οι παράγοντες που προσδιορίζουν το κόστος της εκμετάλλευσης σε συνδυασμό με τα φυσικά, χημικά και περιβαλλοντικά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν κατά την παραγωγή και τη χρήση της, είναι η θερμοκρασία, το βάθος, η διαθεσιμότητα και η υψηλή περιεκτικότητα διαφόρων χημικών ουσιών και αλάτων στον θερμικό φορέα (νερό). Το σημαντικότερο πρόβλημα δημιουργείται από την υψηλή αλατότητα που έχει το διαθέσιμο γεωθερμικό νερό. Ανάλογα με τα πετρώματα που συναντά στην διαδρομή του, εμπλουτίζεται με άλατα, τα οποία στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι διαβρωτικά στα κοινά μέταλλα και

απαιτείται η χρήση εναλλακτών από ακριβότερα μέταλλα (π.χ Τιτάνιο). Ακόμη όμως και αν δεν είναι διαβρωτικά, καθιζάνουν στα τοιχώματα των σωλήνων και πολύ γρήγορα τους κλείνουν.

Η ενέργεια της βιομάζας (βιοενέργεια ή πράσινη ενέργεια) είναι δευτερογενής ηλιακή ενέργεια. Η ηλιακή ενέργεια μετασχηματίζεται από τα φυτά μέσω της φωτοσύνθεσης, χρησιμοποιώντας ως βασικές πρώτες ύλες CO_2 από την ατμόσφαιρα νερό και ανόργανα συστατικά από το έδαφος. Από τη στιγμή που σχηματίζεται η βιομάζα, μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας. Η χρήση της βιομάζας ως πηγής ενέργειας δεν είναι νέα. Η βιομάζα $(\text{CH}_2\text{O})_x$ χρησιμοποιήθηκε από την αρχαιότητα και συνεχίζει και σήμερα να χρησιμοποιείται για κάλυψη καθημερινών αναγκών κυρίως στον Τρίτο Κόσμο (αναπτυσσόμενες χώρες). Τώρα πια όμως υπάρχουν χώρες όπως η Βραζιλία που διαθέτουν ενεργειακές καλλιέργειες, δηλ. καλλιέργειες καταλλήλων ενεργειακών φυτών (ζαχαροκάλαμο, σόργο), από τα οποία με διάφορες μεθόδους παράγονται συνθετικά καύσιμα, που υποκαθιστούν σημαντικές ποσότητες των συμβατικών καυσίμων.

Βασικό πλεονέκτημα της βιομάζας είναι ότι είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και ότι παρέχει ενέργεια αποθηκευμένη με χημική μορφή. Η αξιοποίηση της μπορεί να γίνει με μετατροπή της σε μεγάλη ποικιλία προϊόντων, με διάφορες μεθόδους και τη χρήση σχετικά απλής τεχνολογίας. Σαν πλεονέκτημά της καταγράφεται και το ότι κατά την παραγωγή και την μετατροπή της δεν δημιουργούνται οικολογικά και περιβαλλοντολογικά προβλήματα. Από την άλλη, σαν μορφή ενέργειας η βιομάζα χαρακτηρίζεται από πολυμορφία, χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο, σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα, λόγω χαμηλής πυκνότητας και/ή υψηλής περιεκτικότητας σε νερό, εποχικότητα, μεγάλη διασπορά, κλπ. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνεπάγονται πρόσθετες, σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα, δυσκολίες στη συλλογή, μεταφορά και αποθήκευσή της. Σαν συνέπεια το κόστος μετατροπής της σε πιο εύχρηστες μορφές ενέργειας παραμένει έως και σήμερα πολύ υψηλό.

Γενικά τα συστήματα ανανεώσιμων μορφών ενέργειας έχουν μεγάλο αρχικό κόστος. Αν δεν ληφθεί υπόψη ότι οι απαιτούμενες ποσότητες ενέργειας για την θέρμανση του θερμοκηπίου είναι πολύ μεγάλες, γίνεται σαφές ότι απαιτούνται μεγάλης ισχύος συστήματα και συνεπώς θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας. Αποδοτικότερη εφαρμογή έχουν τα ολοκληρωμένα ενεργειακά συστήματα, ορίζονται ως συνδυασμός ανανεώσιμων και συμβατικών ενεργειακών τεχνολογιών και προσφέρουν με όρους ενεργειακών απαιτήσεων έναν βαθμό ευελιξίας λειτουργίας πολύ υψηλότερο από τις μεμονωμένες ανανεώσιμες, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα, φιλόδοξους περιβαλλοντολογικούς σκοπούς, όπως μείωση εκπομπών θερμοκηπιακών αερίων (Kelly and Weinberg, 1993)

Η ηλιακή ενέργεια όπως προαναφέρθηκε είναι αυτή που κυρίως χρησιμοποιείται και είναι η πλέον ελκυστική λύση για εφαρμογή στα θερμοκήπια, διότι αποτελεί μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας και συχνά εύκολα προσιτή. Το βασικό πρόβλημα και μεγάλο μειονέκτημά της οφείλεται στο γεγονός ότι είναι διαθέσιμη μόνο κατά την διάρκεια της ημέρας και η ποσότητά της μεταβάλλεται με τις διάφορες εποχές του χρόνου (μικρή ποσότητα τον χειμώνα), με αποτέλεσμα να μην συγχρονίζεται η ζήτηση της ενέργειας για θέρμανση που είναι τον χειμώνα και κυρίως την νύχτα. Αυτό επιβάλλει την χρησιμοποίηση εκτός των συστημάτων συλλογής της ηλιακής ενέργειας και αποθηκών ενέργειας για βραχυχρόνια ή μακροχρόνια χρήση. Τα θερμοκήπια που χρησιμοποιούν τη ηλιακή ενέργεια για σκοπούς θέρμανσης

ταξινομούνται σε 2 κατηγορίες, τα ενεργητικά και παθητικά ηλιακά θερμοκήπια (Santamouris et al, 1994b).

- Τα ενεργητικά ηλιακά θερμοκήπια είναι εξοπλισμένα με ηλιακά συστήματα που χρησιμοποιούν ένα σύστημα συλλογής και μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα το οποίο είναι ξεχωριστό από το θερμοκήπιο, και ένα ανεξάρτητο σύστημα αποθήκευσης της θερμότητας. Περιλαμβάνουν διάφορους τύπους ηλιακών συσσωρευτών και συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας
- Τα παθητικά ηλιακά θερμοκήπια έχουν το σύστημα συλλογής θερμότητας ενσωματωμένο στο ίδιο το θερμοκήπιο, ή το ίδιο το θερμοκήπιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συλλέκτης, δεδομένου ότι σχεδιάζεται για τη μεγιστοποίηση των ηλιακών κερδών. Τα παθητικά ηλιακά θερμοκήπια μπορούν να ομαδοποιηθούν σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας. Το μέσο της αποθήκευσης θερμότητας μπορεί να ποικίλλει και χρησιμοποιούνται διαφορετικά υλικά όπως το νερό, η λανθάνουσα θερμότητα, διάφορα πετρώματα, ή το υπέδαφος του θερμοκηπίου (μέσω των θαμμένων σωλήνων).

Σήμερα τα ηλιακά συστήματα στο θερμοκήπιο εφαρμόζονται εμπορικά σε αρκετές περιπτώσεις (περίπου 50.000 ha ηλιακά θερμοκήπια στην Ευρώπη) όχι όμως με ικανοποιητική επιτυχία, γιατί εμφανίζουν μεγάλο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Με τα σημερινά δεδομένα η ηλιακή ενέργεια δεν μπορεί να καλύψει το 100% των θερμικών αναγκών του θερμοκηπίου. Υπολογίζεται ότι το άριστο που μπορεί να τροφοδοτήσει η ηλιακή ενέργεια κυμαίνεται από 50-60% μέχρι 10-12%. Η σημαντική αυτή διαφορά οφείλεται στις υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις του θερμοκηπίου όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλή. Το αποτέλεσμα είναι να αυξάνεται το μέγεθος του συστήματος συλλογής και του συστήματος αποθήκευσης της θερμότητας. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να γίνει πιο αποδοτική όταν συνδυάζεται σε υβριδικά σχήματα με άλλα συστήματα θέρμανσης και μπορούν να εξοικονομήσουν σημαντικά οφέλη ως προς τις θερμικές ανάγκες. Ένα υβριδικό σύστημα ενέργειας, είναι ένα σύστημα όπου δύο ή περισσότερες παροχές από διαφορετικές πηγές ενέργειας ανανεώσιμης ή μη, ενσωματώνονται για να παράσχουν ηλεκτρισμό ή θερμότητα, ή και τα δύο, καλύπτοντας την ίδια ζήτηση (Jensen, 1994). Μια περιληπτική ανάπτυξη των κυριότερων ενεργητικών και παθητικών συστημάτων θέρμανσης που χρησιμοποιούνται σήμερα στα θερμοκήπια δίδεται παρακάτω.

2.2.2.1 ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

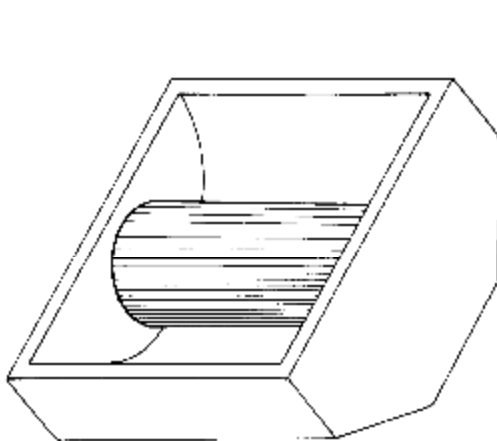
Τα ενεργητικά συστήματα θέρμανσης είναι λιγότερο ελκυστικά σε σχέση με τα παθητικά και η χρήση τους στα θερμοκήπια είναι περιορισμένη (και απαγορευτική για τις μικρής κλίμακας εφαρμογές) λόγω: (i) του υψηλού κόστους των ηλιακών συσσωρευτών, (ii) του πολύτιμου εδάφους που καταλαμβάνουν και που συνήθως δεν είναι διαθέσιμο, (iii) του εφεδρικού συστήματος που πρέπει να διαθέτουν και (iv) της αποθήκευσης και του συστήματος διανομής της θερμότητας στο χώρο του θερμοκηπίου που πρέπει να διασφαλίζουν.

Συστήματα συλλογής και μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα

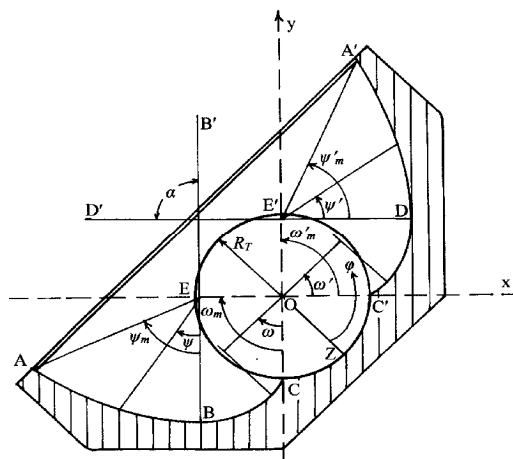
Στην κατηγορία ανήκουν οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες (flat plate collector) που τοποθετούνται έξω από το θερμοκήπιο. Είναι οι πιο διαδεδομένοι όσον αφορά την

θέρμανση νερού ή αέρα και η σπουδαιότερη κατηγορία συσκευών συλλογής της ηλιακής ενέργειας από πλευράς εφαρμογών σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας έως $75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ένας τυπικός επίπεδος συλλέκτης αποτελείται από ένα μεταλλικό πλαίσιο στο πάνω μέρος του οποίου τοποθετείται κάλυμμα από γυαλί ή πλαστικό, στο εσωτερικό του τοποθετείται απορροφητική επιφάνεια μαύρου χρώματος ενώ τα πλαϊνά και η κάτω πλευρά του συλλέκτη είναι μονωμένα για να ελαχιστοποιηθούν οι θερμικές απώλειες. Κατά την λειτουργία του συλλέκτη, το μεγαλύτερο ποσοστό από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από την εσωτερική επιφάνεια που συμπεριφέρεται ως «μέλαν» σώμα στην ηλιακή ακτινοβολία. Το μεγαλύτερο μέρος από την ενέργεια που απορροφάται, μεταφέρεται σε κάποιο ρευστό, ενώ το υπόλοιπο ανακλάται. Η θερμότητα που απάγεται από το ρευστό, είναι το ωφέλιμο ενεργειακό κέρδος του συλλέκτη και ή αποθηκεύεται, ή τροφοδοτεί απευθείας το θερμοκήπιο. Άλλα τέτοια ηλιακά θερμικά συστήματα είναι ο ολοκληρωμένος ηλιακός συλλέκτης ICS, (Tripanagnostopoulos and Yianoulis, 1992), (σχήμα 2-2 α,β), ο σύνθετος παραβολικός συγκεντρωτικός συλλέκτης CPC, (Tripanagnostopoulos et al, 2000a; Tripanagnostopoulos et al, 2002) και ο κυλινδροπαραβολικός συλλέκτης οι οποίοι λειτουργούν σε χαμηλές ($100\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{C}$), μέτριες ($150\text{-}400\text{ }^{\circ}\text{C}$) ή υψηλές θερμοκρασίες ($>400\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Ακόμα πιο περιορισμένη χρήση στα θερμοκήπια έχουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα (PV) με τα οποία επιτυγχάνεται άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια και τα υβριδικά φωτοβολταϊκά/θερμικά συστήματα (PV/T). Το γεγονός ότι τα μέρη στα οποία θα μπορούσαν να τοποθετηθούν φωτοβολταϊκά (κτίρια, θερμοκήπια κλπ) δεν έχουν ανάγκη μόνο σε ηλεκτρισμό αλλά και σε θερμική ενέργεια οδήγησε στην δημιουργία των υβριδικών φωτοβολταϊκών (PV/T) που πετυχαίνουν εκτός από παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και απολαβή θερμότητας από το φωτοβολταϊκό μέσω της φυσικής η εξαναγκασμένης κυκλοφορίας ενός ρευστού (αέρας η νερό) (Huang et al 2001; Tripanagnostopoulos et al, 2002b; Tripanagnostopoulos et al, 2005; Tonui and Tripanagnostopoulos, 2007)



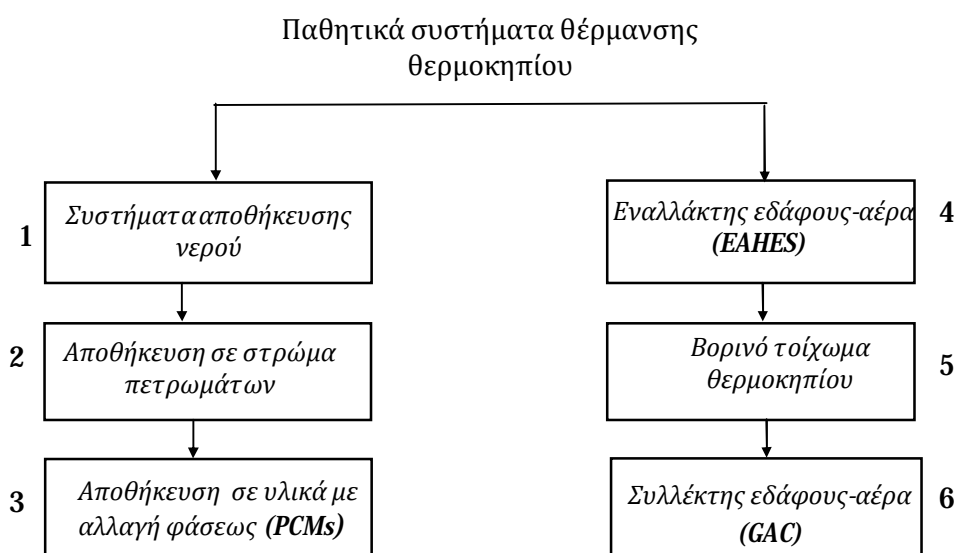
Σχήμα 2-2α: Αξονομετρικό σχήμα ICS



Σχήμα 2-2β: Κατά πλάτος τομή ICS

2.2.2.2 ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Τα παθητικά συστήματα θέρμανσης έχουν ένα μικρότερο αρχικό και λειτουργικό κόστος σε σχέση με τα ενεργητικά συστήματα. Ένα παθητικό σύστημα χρησιμοποιείται για να αυξήσει την αποθήκευση θερμότητας μέσα στο θερμοκήπιο κατά την διάρκεια της ημέρας ή για να αφαιρέσει και να μεταφέρει την περίσσεια θερμότητας μέσα από το θερμοκήπιο σε περιοχή αποθήκευσης θερμότητας. Αυτή η θερμότητα ανακτάται την νύχτα μέσα στο θερμοκήπιο για να ικανοποιήσει τις θερμικές του ανάγκες. Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα συστήματα είναι τα συστήματα αποθήκευσης νερού, η χρήση θερμικών αποθηκευτικών μονάδων από εγκιβωτισμένα στρώματα πετρωμάτων και η αποθήκευση σε υλικά αλλαγής φάσεως (*PCMs*). Εκτός από αυτά, ο εναλλάκτης εδάφους-αέρα (*EAHES*), η κινητή μόνωση (κουρτίνες εξοικονόμησης ενέργειας), η αποθήκευση θερμότητας στο βορεινό τοίχωμα και ο συλλέκτης εδάφους-αέρα (*GAC*) χρησιμοποιούνται για την αύξηση της θερμοκρασίας την νύχτα μέσα στο θερμοκήπιο (σχήμα 2-3).



Σχήμα 2-3: Παθητικά συστήματα θέρμανσης που χρησιμοποιούνται στα θερμοκήπια.

Συστήματα αποθήκευσης νερού

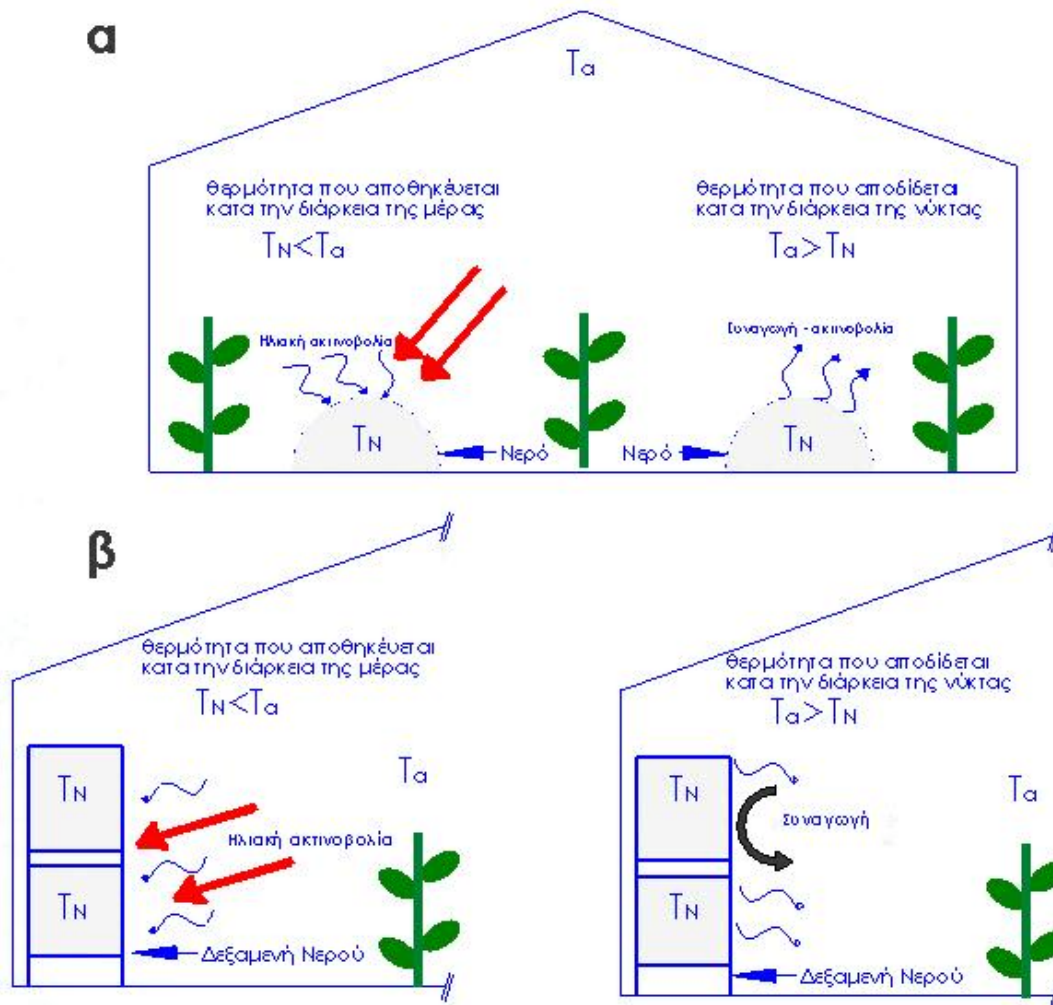
Χρησιμοποιούνται συνήθως διαφανείς σωλήνες πολυαιθυλενίου (**PE**), μεγάλης διαμέτρου (**0.5-0.75m**), λεπτών τοιχωμάτων, που είναι γεμάτοι με νερό και ενεργούν ως παθητικό σύστημα θέρμανσης (σχήμα 2-4α). Κάτω από τους σωλήνες, που τοποθετούνται ανάμεσα στις γραμμές των φυτών υπάρχει μαύρο φύλλο πολυαιθυλενίου για αύξηση της απορροφητικότητας της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι σωλήνες του νερού τη ημέρα θερμαίνονται κυρίως από την ηλιακή και θερμική ακτινοβολία αλλά και με συναγωγή από τον θερμότερο αέρα του θερμοκηπίου. Τις νυχτερινές ώρες το ζεστό νερό ελκύει θερμότητα προς το χώρο του θερμοκηπίου.

Αντί για διαφανείς σωλήνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεξαμενές νερού τοποθετημένες κατά μήκος του βορινού τοιχώματος του θερμοκηπίου που ενεργούν σαν ηλιακοί συλλέκτες και μέσον αποθήκευσης θερμότητας (σχήμα 2-4β). Σε αυτήν την περίπτωση η βορινή πλευρά συνήθως μονώνεται για να μειωθούν οι ενεργειακές απώλειες και οι δεξαμενές βάζονται μαύρες για να αυξηθεί η απορρόφηση θερμότητας.

Η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στις δεξαμενές μπορεί επίσης να αυξηθεί με την τοποθέτηση ανακλαστήρων στο βορινό κάλυμμα του θερμοκηπίου.

Από πειραματικές έρευνες που έχουν γίνει στην περίπτωση των διαφανών σωλήνων (Kyritsis & Mavrogianopoulos, 1987; Mavrogianopoulos & Kyritsis, 1993) βρέθηκε ότι η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα μπορεί να αυξηθεί από 2-6 °C για περιοχές που βρίσκονται σε γεωγραφικό πλάτος από 32 °N έως και 52.5 °N και για έκταση θερμοκηπίων από 72-500 m². Γυαλί και PE μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων. Το νερό ως μέσον αποθήκευσης θερμότητας στοιχίζει ελάχιστα, το μειονέκτημα όμως είναι ότι το 20-25% της πολύτιμης επιφάνειας του εδάφους καθίσταται μη αξιοποιήσιμη για καλλιέργεια εξαιτίας των σωλήνων. Επιπλέον η απόδοση του συστήματος είναι μικρή κατά την διάρκεια του χειμώνα ιδιαίτερα όταν τα φυτά είναι μεγάλου ύψους και δεν υπάρχει πολλή διαθέσιμη ακτινοβολία κάτω από αυτά. Ένας συνδυασμός διαφανών σωλήνων αποθήκευσης θερμότητας που έχουν γεωθερμικό ρευστό και θερμοκουρτίνας δύναται να αυξήσει αρκετά την απόδοση του συστήματος (Barrel et al, 1999)

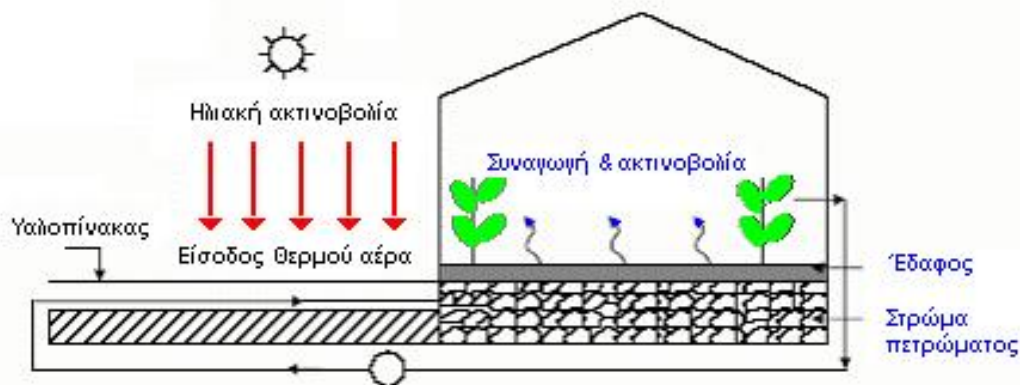
Η χρήση δεξαμενών νερού ως μέσον αποθήκευσης θερμότητας μπορεί να αυξήσει την θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα από 2-11°C για γεωγραφικού πλάτους περιοχές από 28 °N έως και 52.5 °N και για έκταση θερμοκηπίων από 12-1000 m² και χρειάζονται λιγότερο χώρο σε σχέση με τους διαφανείς σωλήνες εδάφους (Santamouris et al, 1994b; Gupta and Tiwari, 2002; Sethi et al, 2003). Όμως η διάβρωση και οι διαφυγές του νερού είναι προβλήματα που εμφανίζονται κατά την χρήση τους.



Σχήμα 2-4: Παθητικό σύστημα θέρμανσης με αποθήκευση νερού (α) σε διαφανείς σωλήνες και (β) σε δεξαμενές νερού (Sethi & Sharma, 2008).

Εγκιβωτισμένο στρώμα πετρωμάτων

Ένα δημοφιλές και οικονομικό υλικό αποθήκευσης θερμότητας είναι το στρώμα πετρωμάτων (χαλίκι, αμμοχάλικο, τούβλα). Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας (με τον αέρα ως μηχανισμό ενεργειακών μεταφορών) που τοποθετείται υπόγεια, έχει το πλεονέκτημα μιας μεγάλης και φτηνής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας. Τα μεγάλα αποθηκευτικά στρώματα πετρωμάτων είναι κατάλληλα τοποθετημένα στο υπεδάφους σε βάθος μεταξύ 40 – 50 cm ή έξω από το θερμοκήπιο εγκιβωτισμένα σε σκυρόδεμα για καλύτερη μόνωση (σχήμα 2-5). Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η θερμότητα μεταφέρεται μέσα από το θερμοκήπιο στο υπόγειο αποθηκευτικό στρώμα με τη βοήθεια ενός ανεμιστήρα. Τη νύχτα, η διαδικασία αντιστρέφεται. Ο ψυχρός αέρας μετακινείται προς το αποθηκευτικό στρώμα, όπου η θερμότητα μεταφέρεται από το πέτρωμα στον κρύο αέρα, ο οποίος εν συνεχεία επιστρέφει στο θερμοκήπιο. Η πτώση πίεσης μεταξύ του ανώτερου και του κατώτερου χώρου (δηλ. το διάστημα που είναι γεμισμένο με το υλικό) πρέπει να είναι επαρκής για να εξασφαλίσει ομοιόμορφη κατανομή της θερμικής ροής μέσα στο στρώμα πετρωμάτων έτσι ώστε ένα μεγάλο μέρος της θερμοχωρητικότητας του πετρώματος να μπορεί να χρησιμοποιηθεί.



Σχήμα 2-5: Αποθήκευση αισθητής θερμότητας σε στρώμα πετρωμάτων μέσα στο θερμοκήπιο (Sethi & Sharma, 2008).

Οι έρευνες (Santamouris et al, 1994b, Ozturk and Bascetincelik 2003a) έχουν δείξει ότι το χαλίκι με διάμετρο 20-100 mm ως αποθηκευτικό στρώμα πετρώματος είναι προτιμότερο για θερμοκήπια με κάλυμμα PE. Η θερμοχωρητικότητα των χαλικιών που χρησιμοποιείται από τους ερευνητές είναι 157.28 kJ K⁻¹ (περίπου 220 kg m⁻² επιφανείας θερμοκηπίου που μπορεί να ικανοποιήσει το 20-76% των ετήσιων θερμικών αναγκών του θερμοκηπίου σε διάφορες περιοχές. Η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα κυμαίνεται από 4-13 °C υψηλότερα από την χαμηλότερη θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος και επιτυγχάνεται σε θερμοκήπια έκτασης από 19-2850 m² και σε περιοχές γεωγραφικού πλάτους από 28 °N έως 52.5 °N. Το σύστημα μπορεί να ικανοποιήσει το 20-76% των ετήσιων θερμικών αναγκών του θερμοκηπίου. Η συσσώρευση πετρωμάτων ως μέσον αποθήκευσης θερμότητας στοιχίζει ελάχιστα, αλλά το κύριο πρόβλημα από την χρήση τέτοιου αποθηκευτικού στρώματος είναι η τεράστια ποσότητα πετρώματος που απαιτείται να συσσωρευτεί για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Αυτό οφείλεται στην χαμηλή θερμοχωρητικότητα του πετρώματος σε σύγκριση με το νερό, και το κιβώτιο τοποθέτησης είναι περίπου 3-4 φορές ο όγκος μιας δεξαμενής νερού που θερμαίνεται για το ίδιο θερμοκρασιακό διάστημα. Παρόλο που αυτό το αποθηκευτικό σύστημα δεν απαιτεί καμία επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας καθώς ο ίδιος ο σωρός πετρώματος ενεργεί ως εναλλάκτης θερμότητας και κατά συνέπεια μειώνει το συνολικό κόστος του συστήματος, το κόστος άντλησης του αέρα μέσα από το συσσωρευμένο πέτρωμα αυξάνει αρκετά εξαιτίας της πτώσης της υψηλής πίεσης που δημιουργείται από την αντίσταση του πετρώματος. Επίσης ταυτόχρονη φόρτιση και αποφόρτιση του πετρώματος δεν είναι δυνατή.

Αποθήκευση θερμότητας σε υλικά με αλλαγή φάσεως (PCMs)

Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας με χρήση των υλικών αλλαγής φάσεως (PCMs) είναι ένας αποδοτικός τρόπος αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας. Αντίθετα από την αποθήκευση αισθητής θερμότητας, η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας παρέχει πολύ υψηλότερη πυκνότητα αποθήκευσης με μια μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της αποθήκευσης και της απελευθέρωσης θερμότητας. Σε έναν κύκλο αποθήκευσης θερμότητας, το PCM μπορεί να αποθηκεύσει μεγάλες ποσότητες θερμότητας στην αλλαγή της φάσης από την στερεά στην υγρή κατάσταση (λανθάνουσα θερμότητα τήξης) σε μια σταθερή θερμοκρασία που αντιστοιχεί στην θερμοκρασία μεταβολής φάσης. Σε ένα κύκλο έκλυσης θερμότητας, ένα ρευστό που

κυκλοφορεί αέρας ή νερό, μπορεί να εξάγει τη θερμότητα από τη μονάδα αποθήκευσης αναγκάζοντας το αλλαγή φάσης υλικό σε στερεοποίηση (Lane, 1980). Υπάρχουν πολλά PCMs που λειώνουν και στερεοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και γίνονται ελκυστικά σε διάφορες εφαρμογές. Οι ιδιότητες των PCMs σε ένα θερμοκρασιακό εύρος από 0-120 °C ερευνήθηκαν ως προς την συμπεριφορά τους κατά την τήξη και πήξη (Lane, 1983; Abbat, 1983). Τα PCMs που λειώνουν μεταξύ 15 και 65 °C είναι μεγαλύτερης σπουδαιότητας στις εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας στα θερμοκήπια. Τα PCMs ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες: (i) ανόργανες ενώσεις (ένυδρα άλατα), (ii) οργανικές ενώσεις (παραφίνες) και (iii) εύτηκτα μίγματα για τα οποία η έρευνα είναι ακόμα σε προκαταρκτικό στάδιο με περιορισμένα δεδομένα πάνω στις θερμοφυσικές τους ιδιότητες. Στις έρευνες, ο τύπος εναλλακτών θερμότητας, η αποθήκευση και τα ποσά PCMs που χρησιμοποιούνται είναι ανόμοια.

Οι ανόργανες ενώσεις έχουν μια υψηλή λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα όγκου, υψηλή θερμική αγωγιμότητα, δεν είναι εύφλεκτες και χαμηλός κόστος σε σύγκριση με τις οργανικές ενώσεις. Όμως είναι διαβρωτικές στα περισσότερα μέταλλα, υποφέρουν από χημική αποσύνθεση και υπό-ψύξη, τα οποία μπορούν να επηρεάζουν τις ιδιότητές τους στην αλλαγή φάσης. Τα περισσότερα οργανικά PCMs είναι μη διαβρωτικά και χημικά σταθερά, παρουσιάζουν ελάχιστη ή καθόλου υπό-ψύξη, έχουν υψηλή λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα βάρους και χαμηλή πίεση ατμών (Ozturk, 2005). Τα μειονεκτήματά τους είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, οι μεγάλες αλλαγές στον όγκο στην αλλαγή φάσης και το ότι είναι πολύ εύφλεκτες.

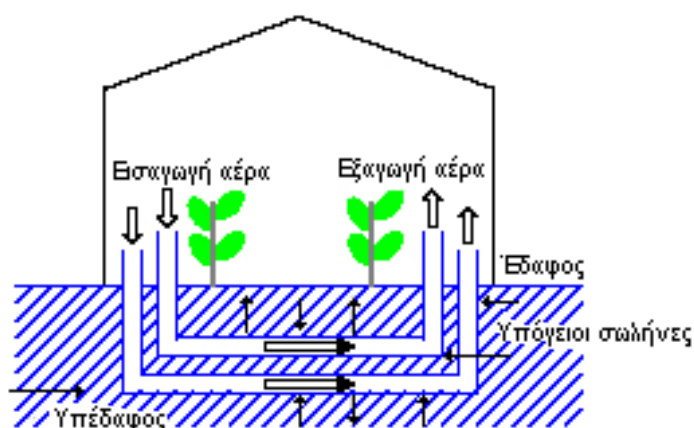
Το δημοφιλέστερο υλικό αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας είναι το $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ γιατί έχει πολλές επιθυμητές ιδιότητες που απαιτούνται από ένα PCM για θερμοκηπιακές εφαρμογές. Έχει βέλτιστη θερμοκρασία αλλαγής φάσης που εξασφαλίζει μια καλή αποδοτικότητα για συλλογή και απόδοση της θερμότητας στο θερμοκήπιο. Σε εκτάσεις θερμοκηπίων από 20-500 m² η χρησιμοποίηση του $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ μπορεί να καταλήξει σε εσωτερική θερμοκρασία αέρα 2-8 °C υψηλότερη από την ελάχιστη θερμοκρασία εξωτερικού αέρα σε περιοχές γεωγραφικού πλάτους από 32 - 52.25 °N. Η αντιπροσωπευτική τιμή της λανθάνουσας θερμοχωρητικότητάς του ανά m² επιφάνειας θερμοκηπίου είναι περίπου 2600 KJ, που είναι ισοδύναμα με 13.70 kg/m². Η χρήση του $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ μπορεί να ικανοποιήσει το 22-75% των ετήσιων αναγκών θέρμανσης του θερμοκηπίου. Επειδή η πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας του $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ είναι πάνω από δέκα φορές μεγαλύτερη από το στρώμα πετρωμάτων, το σύστημα $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ απαιτεί μόνο το ένα δέκατο του όγκου αποθήκευσης που απαιτείται από το σύστημα πετρωμάτων (Huang et al, 1986; Boulard, et al, 1990; Santamouris 1994b).

Εναλλάκτης εδάφους-αέρα (EAHES)

Η θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος μόλις λίγων μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους (3-4 m) παραμένει σχεδόν σταθερή σε όλη την διάρκεια του χρόνου. Αρχικά οι (Mavrogianopoulos and Kyritsis, 1986) και εν συνεχεία πολλοί ερευνητές έχουν επιτυχώς περιγράψει την χρήση των EAHES για αποδοτική θέρμανση των θερμοκηπίων (σχήμα 2-6). Παρόλο που έχουν χρησιμοποιηθεί τσιμεντοσωλήνες, μεταλλικοί σωλήνες (Sharan et al, 2003), και ενίοτε σωλήνες αλουμινίου, οι σωλήνες PVC διαμέτρου 0.1-0.25 m είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται συχνότερα. Οι θαμμένοι πλαστικοί σωλήνες διατρέχουν κατά μήκος του θερμοκηπίου τοποθετημένοι σε μία ή σε 2 γραμμές. Το βάθος των σωλήνων ποικίλλει από 0.3-3m και η μεταξύ τους απόσταση από 0.4-0.8 m. Η θερμοκρασία του χώρου του θερμοκηπίου ρυθμίζεται με κυκλοφορία του αέρα του θερμοκηπίου σε κλειστό κύκλωμα, μέσα από το σύστημα του

εναλλάκτη. Η κυκλοφορία του αέρα γίνεται με τη λειτουργία ανεμιστήρων όταν η θερμοκρασία του χώρου πέσει κάτω από την ελάχιστη επιθυμητή θερμοκρασία ή υπερβεί τη μέγιστη επιθυμητή.

Για διαφορετικές ροές αέρα που κυμαίνονται από $21.6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ – $25.920 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ και διαμέτρους σωλήνων, η ταχύτητα του αέρα μέσα στους σωλήνες είναι μεταξύ 4.27 m s^{-1} και 10.5 m s^{-1} . Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι ένας ρυθμός ροής $0.31 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ και ανά m^2 επιφανείας θερμοκηπίου μπορεί να αυξήσει την εσωτερική θερμοκρασία από $3-13^\circ\text{C}$ και μπορεί να καλύψει το $28-62\%$ των ετήσιων θερμικών αναγκών θερμοκηπίων σε περιοχές γεωγραφικού πλάτους από 23°N ως 50°N και με εμβαδόν επιφάνειας από $30-2500 \text{ m}^2$. Έτσι το υπέδαφος χρησιμοποιείται ως φθηνή αποθήκη ενέργειας που ταυτόχρονα αποθηκεύει και με φυσικό τρόπο ενέργεια από το καλοκαίρι μέχρι και το χειμώνα (Mihalakakou et al, 1994a; Santamouris et al, 1996; Tiwari et al, 2006) Ο σημαντικότερος περιορισμός της χρήσης των *EAHES* είναι το κόστος σκαψίματος του εδάφους και το θάψιμο των σωλήνων μέχρι το βάθος $2-4 \text{ m}$. Το κόστος άντλησης του αέρα από τους σωλήνες, κινητήρες και ανεμιστήρες, προσθέτουν στο αρχικό και τρέχον κόστος. Επειδή η συνήθης απόδοση του συστήματος των *EAHES* είναι αρκετά χαμηλή, για να ενισχυθεί χρησιμοποιούνται σε υβριδικά σχήματα με άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας όπως τη μόνωση του βορινού τοιχώματος (Santamouris et al, 1994b; Gauthier et al, 1997), το συλλέκτη εδάφους- αέρα (Ghosal et al, 2005), τις κουρτίνες εξοικονόμησης ενέργειας και τη γεωθερμική ενέργεια (Shukla et al, 2006).

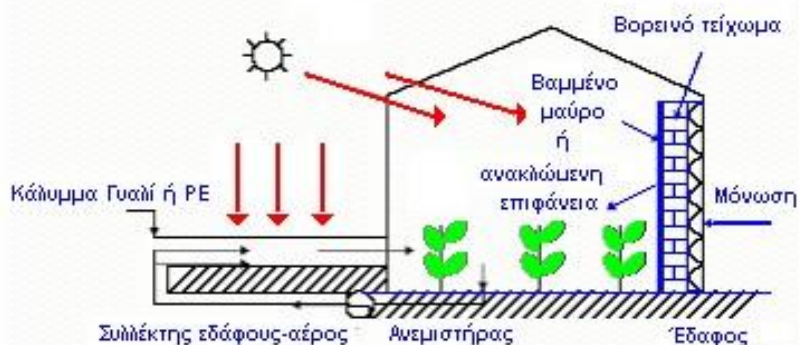


Σχήμα 2-6: Εναλλάκτης εδάφους-αέρα για μετάδοση θερμότητας από ή προς το έδαφος εξαρτώμενη από την διαφορά θερμοκρασίας (Sethi & Sharma, 2008).

Βορινό τοίχωμα θερμοκηπίου συλλέκτης και αποθήκη θερμικής ενέργειας

Το βορινό τοίχωμα του θερμοκηπίου μονώνεται εξωτερικά με **blocks** από τούβλα ή τσιμέντο γεμισμένα με σκυρόδεμα και εσωτερικά βάφεται μαύρο για μεγαλύτερη αποθήκευση θερμικής ενέργειας, συνθέτοντας έτσι μια πυκνή θερμική μάζα. Κατά την διάρκεια της ημέρας, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία προσκρούει στον τοίχο και αυξάνει σημαντικά την θερμική του αποθηκευτικότητα. Η αποθηκευμένη ενέργεια απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της νύχτας καλύπτοντας θερμικές ανάγκες μέσα στο θερμοκήπιο. Η προσέγγιση του αδιαφανούς βορινού τοιχώματος υιοθετείται συνήθως για τα Ανατολής-Δύσης προσανατολισμένα θερμοκήπια που βρίσκονται στις ψυχρότερες κλιματολογικές ζώνες (βόρειο ημισφαίριο), επειδή στο Ανατολής-Δύσης προσανατολισμένο θερμοκήπιο, η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στο νότιο τοίχωμα κατά τη διάρκεια των χειμώνων και αφήνει το βορινό τοίχωμα του θερμοκηπίου λόγω της χαμηλού ύψους γωνίας του ήλιου. Ως εκ τούτου, το βορινό τοίχωμα του θερμοκηπίου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο

στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και συγχρόνως μειώνει τις θερμικές απώλειες του θερμοκηπίου σημαντικά (Santamouris, 1993). Οι συλλεχθείσες πληροφορίες από πειραματικές έρευνες αποκαλύπτουν ότι η χρήση του βορινού τοιχώματος για απορρόφηση ή ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται κυρίως μαζί με συλλέκτη εδάφους-αέρα (Singh and Tiwari, 2000) ή με *EAHES* (Santamouris et al, 1994b) σε υβριδικά σχήματα (σχήμα 2-7). Ένας τέτοιος συνδυασμός μπορεί να αυξήσει τη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου από 1-10 °C και μπορεί να καλύψει το 35-82% των ετήσιων ενεργειακών αναγκών του θερμοκηπίου σε περιοχές γεωγραφικού πλάτους από 28 °N έως 46 °N σε θερμοκήπια με εμβαδόν επιφάνειας που κυμαίνεται από 30-2000 m² ανάλογα πάντα και με τις κλιματολογικές συνθήκες μιας περιοχής. Εντούτοις, η κατασκευή του βορινού τοιχώματος αυξάνει το γενικό κόστος του θερμοκηπίου, αλλά εξοικονομεί το κόστος των σωλήνων, της άντλησης του αέρα, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας κλπ.



Σχήμα 2-7: Ολοκληρωμένο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με βορινό τοίχωμα και συλλέκτη εδάφους-αέρα (Sethi & Sharma, 2008).

Συλλέκτης εδάφους-αέρα (GAC)

Ο συλλέκτης εδάφους-αέρα (GAC) είναι βασισμένος στην αρχή λειτουργίας του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη (**flat plate collector**). Η διαφορά μεταξύ GAC και επίπεδου ηλιακού συλλέκτη είναι ότι ο πρώτος εγκαθίσταται λίγο κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ ο δεύτερος είναι μια φορητή συσκευή. Ο GAC αποτελείται από τέσσερα στοιχεία: (i) υαλοπίνακα για την εξασφάλιση του φαινομένου του θερμοκηπίου (ii) άμμο ή σκυρόδεμα ως απορροφητή για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας (iii) σωλήνα για μεταφορά του ρευστού μετάδοσης θερμότητας από το εσωτερικό στο εξωτερικό και (iv) ανεμιστήρα για την κυκλοφορία αέρα. Η αναλυτική περιγραφή και λειτουργία του GAC εντός του οποίου η ηλιακή ακτινοβολία που μεταδίδεται μέσω του υαλοπίνακα και απορροφάται από το σκουρόχρωμο στρώμα άμμου έχει δοθεί από τους Jain and Tiwari (2003).

Την δυνατότητα της αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας σε ένα στρώμα εδάφους κάτω από το θερμοκήπιο για θέρμανση του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια του χειμώνα, διερευνήθηκε αρχικά από τους Kurata and Takatura, 1991 και βρέθηκε ότι είναι πολύ χρήσιμη. Όμως οι πληροφορίες για τη χρήση του GAC σε θερμοκηπιακές εφαρμογές είναι περιορισμένες στη βιβλιογραφία και λίγες μελέτες έχουν διεξαχθεί και δείχνουν ότι ο GAC σε θέρμανση θερμοκηπίων μπορεί να αυξήσει την θερμοκρασία του

εσωτερικού αέρα από 5-6 °C κατά τη διάρκεια ακραίων χειμερινών συνθηκών. Η απόδοσή του αυξάνεται εάν υπάρχει ταυτόχρονα σε υβριδικό σύστημα με βορινό τοίχωμα του θερμοκηπίου (Singh and Tiwari, 2000, Jain and Tiwari, 2003) (σχήμα 2-7) ή με έναν *EAHES* (Ghosal et al, 2005). Επίσης αναφέρεται, ότι σε σύγκριση με τον εναλλάκτη εδάφους-αέρα (*EAHES*), η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα σε ένα θερμοκήπιο συνδεδεμένο με *GAC* μπορεί να είναι 2-3°C υψηλότερη από το συνδεδεμένο θερμοκήπιο με *EAHES*. Οι πειραματικές έρευνες σχετικές με *GAC* έχουν πραγματοποιηθεί σε γεωγραφικά πλάτη από 28 °N έως 34 °N και σε μικρής έκτασης θερμοκήπια (24 m² μόνο) όπου η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία (σε οριζόντια επιφάνεια) και η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος μια χειμερινή ημέρα υπερβαίνουν τα 600 W m⁻² και 20 °C αντίστοιχα, το οποίο σημαίνει ότι η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου θα είναι περίπου μεταξύ 26 και 28 °C. Η αποδοτικότητα του *GAC* σε μεγάλα θερμοκήπια κάτω από συνθήκες καλλιέργειας σε ψυχρότερες κλιματολογικές ζώνες είναι υπό διερεύνηση. Επιπλέον, δεν υπάρχει καμία πρόβλεψη για αποθήκευση θερμικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας που θα αποδίδεται και θα χρησιμοποιείται τη νύχτα. Επίσης η επιφάνεια του *GAC* είναι συγκριτικά μεγάλη στο πεδίο της παθητικής θέρμανσης, καθώς 0.73 m² *GAC* απαιτούνται ανά τετραγωνικό μέτρο θερμοκηπίου. Τέλος την συνολική δυσκολία του εγχειρήματος περιλαμβάνεται το κόστος σωληνώσεων και άντλησης του αέρα, οι κινητήρες και ανεμιστήρες τα οποία προσθέτουν στο συνολικό κόστος.

2.2.2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Μετακινούμενη μόνωση / θερμοκουρτίνες

Η κινητή μόνωση είναι συνήθως μια θερμοκουρτίνα νύχτας ή ένα θερμικό παραπέτασμα που σύρεται εσωτερικά ή εξωτερικά του καλύμματος θερμοκηπίων κατά τη διάρκεια της νύχτας στους χειμωνιάτικους μήνες για να μειώσει τις απώλειες θερμότητας στο εξωτερικό περιβάλλον καταλήγοντας στην διατήρηση της ενέργειας μέσα στο θερμοκήπιο. Αυτές οι κινητές μονώσεις απομακρύνονται κατά τη διάρκεια της ημέρας προκειμένου η ηλιακή ακτινοβολία για εισέρχεται απρόσκοπτα στο θερμοκήπιο και να ικανοποιεί τις θερμικές και φωτοσυνθετικές ανάγκες των φυτών. Η αρχή λειτουργίας της θερμοκουρτίνας είναι να είναι να παρέχει πρόσθετη θερμική αντίσταση και να μειώνει το συνολικό ποσοστό μεταφοράς θερμότητας στο περιβάλλον. Η θερμοκουρτίνα νύχτας που τοποθετείται μεταξύ των φυτών και του καλύμματος του θερμοκηπίου λέγεται εσωτερική κουρτίνα ενώ η εξωτερική κουρτίνα τοποθετείται μεταξύ του καλύμματος του θερμοκηπίου και του περιβάλλοντος. Η εσωτερική κουρτίνα προτιμάται επειδή μειώνει τη θερμική περατότητα της θερμοκηπιακής δομής. Χαμηλώνει τις ενεργειακές απώλειες με την προσθήκη δύο ή περισσότερων στάσιμων στρωμάτων αέρα μεταξύ του εσωτερικού του θερμοκηπίου και του καλύμματος και την τοποθέτηση υαλοπινάκων.

Οι εσωτερικές θερμοκουρτίνες προτιμώνται σε σχέση με τις εξωτερικές καθώς η χρήση τους είναι απλή, ανέξοδη και αποδοτική στη μείωση των νυχτερινών ενεργειακών απωλειών. Η εξωτερική θερμοκουρτίνα φθείρεται αρκετά γρήγορα κάτι που οφείλεται στις εξωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος. Αν και πολλοί τύποι υλικών για θερμοκουρτίνες είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο, η δημοφιλέστερη επιλογή είναι το φύλλο πολυεστέρα με επικάλυψη αλουμινίου. Όταν και οι δύο πλευρές της

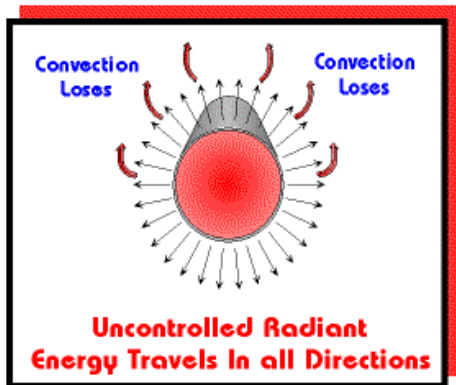
θερμοκουρτίνας είναι από αλουμίνιο τότε επιτυγχάνονται τα μεγαλύτερα ενεργειακά οφέλη. Η χρήση τέτοιων θερμοκουρτινών μπορεί να πετύχει εξοικονόμηση ενέργειας 30-40% ή μπορεί να διατηρήσει την θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα 3-4 °C υψηλότερα σε περιοχές γεωγραφικού πλάτους από 30 °N ως 46 °N (Cui and Wang, 2002, Ozturk and Bascetincelik, 2003b, Kittas et al, 2003). Η χρήση της νυχτερινής θερμοκουρτίνας σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους εξοικονόμησης θερμική ενέργειας όπως διπλό κάλυμμα (Abak et al, 1994), στρώμα πετρωμάτων ή γεωθερμική ενέργεια (Ghosal and Tiwari, 2004), μπορεί να αυξήσει την θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα από 8-12 °C κατά την διάρκεια της νύχτας σε σχέση με τις εξωτερικές συνθήκες και μπορεί να μειώσει το ενεργειακό κόστος θέρμανσης του θερμοκηπίου περίπου 90% ανάλογα και με την γεωγραφική περιοχή που βρίσκεται το θερμοκήπιο. Εντούτοις, τα μειονεκτήματα των θερμοκουρτινών είναι η ανεπαρκής μηχανική αξιοπιστία, η ελλιπής σφράγιση μετά την διαδικασία κλεισίματος και εκτεταμένες βλάβες και προβλήματα από την συμπίκνωση υδρατμών και στις θερμοκουρτινες και στα φυτά.

2.2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

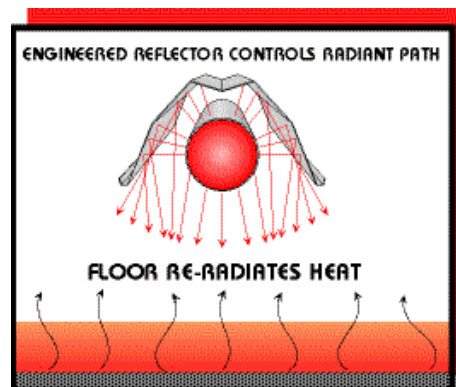
2.2.3.1 ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (IR)

Η υπέρυθρη φυσική ακτινοβολία (IR) είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μήκος κύματος στην κλίμακα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 0.7 μm έως 100 μm . Διακρίνεται στην μικρού μήκους ακτινοβολία NIR (κοντινό υπέρυθρο) με μήκος κύματος 0.7–3 μm και στην μεγάλη μήκους ακτινοβολία (μακρινό υπέρυθρο) με μήκος κύματος 3-100 μm . Η εκπεμπόμενη υπέρυθρη ενέργεια απορροφάται από τις ψυχρές επιφάνειες χωρίς φυσική επαφή με την πηγή θερμότητας ή μέσω θέρμανσης του περιβάλλοντος αέρα, όπως συμβαίνει με τα εξαναγκασμένης συναγωγής συστήματα θέρμανσης. Οι επιφάνειες θερμαίνονται και στην συνέχεια απελευθερώνουν θερμότητα στο περιβάλλον με συναγωγή αυξάνοντας την περιβαλλοντική θερμοκρασία.

Ένα υπέρυθρο σύστημα προσομοιάζει την ηλιακή ακτινοβολία. Όπως ο ήλιος, έτσι και το σύστημα εκπέμπει υπέρυθρη ενέργεια προς όλες τις κατευθύνσεις. Οι απώλειες συναγωγής από το σύστημα αν δεν καλύπτεται από ανακλαστήρα είναι μεγάλες (εικόνα 2-α). Οι ανακλαστήρες τοποθετούνται επάνω από το σύστημα ακτινοβολίας και κατευθύνουν την υπέρυθρη προς τα κάτω (εικόνα 2-β). Η υπέρυθρη ακτινοβολία μετατρέπεται σε θερμότητα όταν απορροφάται από τα αντικείμενα που βρίσκονται στην πορεία της.



Εικόνα 2-α: Σύστημα υπέρυθρης θέρμανσης χωρίς ανακλαστήρα



Εικόνα 2-β: Σύστημα υπέρυθρης θέρμανσης με ανακλαστήρα

2.2.3.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

Όταν εφαρμόζεται θέρμανση με υπέρυθρη ακτινοβολία στα θερμοκήπια σε αντιδιαστολή με τα συστήματα θερμού αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής, η θερμότητα στέλνεται απ' ευθείας από την πηγή με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο δέκτη, δηλαδή στα φυτά και το έδαφος που γίνονται η πρωταρχική πηγή θερμότητας μέσα στο θερμοκήπιο. Ο αέρας δεν θερμαίνεται απ' ευθείας από την ακτινοβολία, αλλά με συναγωγή λόγω της επαφής του με τα φυτά και το έδαφος που θερμαίνονται άμεσα. Επειδή η στρωματοποίηση του εσωτερικού αέρα (διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας εδάφους και θερμοκρασίας οροφής) είναι σημαντικά χαμηλότερη από συστήματα θερμού αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής, οι ενεργειακές απώλειες από την δομή του θερμοκηπίου μειώνονται σημαντικά λόγω μείωσης των απωλειών λόγω συναγωγής από το κάλυμμα και μείωσης των διαφυγών, καταλήγοντας σε μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση (Hanan, 1998; Nelson, 2003). Επίσης επιτυγχάνεται και σημαντική μείωση της υγρασίας της επιφάνειας των φυτών γεγονός που βοηθά στην μείωση της εξάπλωσης ασθενειών που είναι σοβαρότατο πρόβλημα εντός των θερμοκηπίων (Teitel et al, 2000).

Τα συστήματα θέρμανσης με υπέρυθρη ακτινοβολία χρησιμοποιήθηκαν αρκετά στα θερμοκήπια στις μεγάλες πετρελαϊκές κρίσεις (70's) (κυρίως στις ΗΠΑ), εν συνεχεία όμως η χρήση τους εγκαταλήφθηκε. Γι' αυτόν τον λόγο λίγες μελέτες δημοσιεύτηκαν στις αρχές της δεκαετίας του '80, που διερευνούσαν την καταλληλότητα της IR για θέρμανση του θερμοκηπίου. Οι έρευνες είναι κυρίως πειραματικές και δεν υπάρχουν ολοκληρωμένες προσπάθειες μοντελοποίησης του συγκεκριμένου τρόπου θέρμανσης. Σε αυτές τις έρευνες αναφέρονται ενεργειακά οφέλη της τάξεως των 33-40% σε σύγκριση με τον συμβατικό τρόπο θέρμανσης (Itagi and Takahashi, 1978; Blom and Ingratta, 1981; Blom and Hughes, 1982). Το σύστημα *Gas-Fired Infrared Heating* ήταν η πρώτη προσπάθεια εφαρμογής της υπέρυθρης ακτινοβολίας στα θερμοκήπια.

Στην βιομηχανία θερμοκηπίων σήμερα, η θέρμανση με υπέρυθρη ακτινοβολία είναι ευρέως άγνωστη και παρανοημένη και η χρήση της περιορισμένη. Αντιθέτως έχει

βρει ευρύτατη εφαρμογή στην βιομηχανία τροφίμων σε πολλές εφαρμογές. Π.χ. χρησιμοποιείται στην ξήρανση προϊόντων λόγω των πλεονεκτημάτων που διαθέτει με όρους ποιότητας και κόστους σε σχέση με τον θερμό αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής (Sakai & Hanzawa, 1994; Nowak & Lewicki, 2004; Galindo et al., 2005; Hebbar et al., 2005, Tanaka et al., 2006).

Gas-Fired Infrared Heating system

Το σύστημα αποτελείται από σωλήνες υπέρυθρης ακτινοβολίας ισχύος **17.5 kW** (εναλλάκτης θερμότητας) καυστήρα μείγματος αέρα-καυσίμου και αντλία (εικόνα 2-c). Τα καπναέρια οδεύουν μέσα από τους χαλύβδινους σωλήνες διαμέτρου **10-15 cm** που αποτελούν την επιφάνεια ακτινοβολίας με θερμοκρασία επιφανείας **480 – 595 °C** και μήκος κύματος εκπομπής **3.2-3.8 μm** (μακρινό υπέρυθρο) και αποβάλλονται στην ατμόσφαιρα με αντλία αναρρόφησης. Όσπου να φθάνουν τα αέρια στην αντλία, σχεδόν όλη η ενέργεια θερμότητας λόγω της εξάπλωσή της σε μεγάλη περιοχή έχει απελευθερωθεί. Σε ένα τέτοιο σύστημα η καύση και η ροή αερίων πρέπει να γίνεται σε κενό, για αποφυγή διαφυγής αερίων στο θερμοκήπιο. Για τον έλεγχο της κατανομής της θερμικής ροής χρησιμοποιούνται ανακλαστικές διαμέτρου **40 cm**. Οι σωλήνες τοποθετούνται σε απόσταση **2.6 -3 m** από τα φυτά, **1.5 m** από την οροφή και **3 m** από τα πλαϊνά τοιχώματα για να εμποδίζονται καταστροφές. Τα αποτελέσματα από την χρήση του συστήματος είναι η υψηλή θερμοκρασία αέρα, η ανομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας στο επίπεδο των φυτών και του εδάφους, οι υψηλές απώλειες λόγω συναγωγής, οι διαφυγές καπναερίων και η ίδια η πολυπλοκότητα του συστήματος που το καθιστούσαν δύσχρηστο.



Εικόνα 2-c: Gas-Fired Infrared Heating system

Σύγχρονα συστήματα θέρμανσης με ακτινοβολία (Infrared Heaters)

θεωρούνται σύγχρονα συστήματα γιατί έχουν υψηλή απόδοση και ενεργειακή μετατροπή και η θερμοκρασία επιφανείας τους παραμένει σε σχετικά ήπια επίπεδα. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εργοστάσια παραγωγής, βιομηχανικά κτίρια, αθλητικές εγκαταστάσεις, χώρους αναψυχής, βιομηχανία τροφίμων, εκθεσιακούς χώρους, αγροτικές φάρμες, θερμοκήπια, μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων, μονάδες ανακύκλωσης. Συνοπτικά διαθέτουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα
- Συντελεστή ενεργειακής απόδοσης της ακτινοβολίας σε θερμότητα **60% – 96%**
- Οικονομικά - Μειωμένο λειτουργικό κόστος
- Παροχή άμεσης θέρμανσης
- Ομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας
- Υψηλή αντοχή στην σχετική υγρασία περιβάλλοντος
- Μεγάλη διάρκεια ζωής
- Μεγάλη δυναμικότητα
- Διζωνική λειτουργία
- Εύκολα στην εγκατάσταση - απεγκατάσταση συντήρηση και χρήση
- Φιλικά προς το περιβάλλον

Τα σύγχρονα συστήματα θέρμανσης με ακτινοβολία διακρίνονται ανάλογα με το μήκος κύματος που εκπέμπουν σε χαμηλής έντασης, **low-intensity (3.2-3.8 μm)** με μέγιστη θερμοκρασία επιφανείας **480–600 °C** και σε υψηλής έντασης, **high-intensity (1.0-2.9 μm)** με μέγιστες θερμοκρασίες επιφάνειας **700–2000 °C**. Έχουν δυνατότητα λειτουργίας με φυσικό αέριο, προπάνιο/βουτάνιο και ηλεκτρισμό.

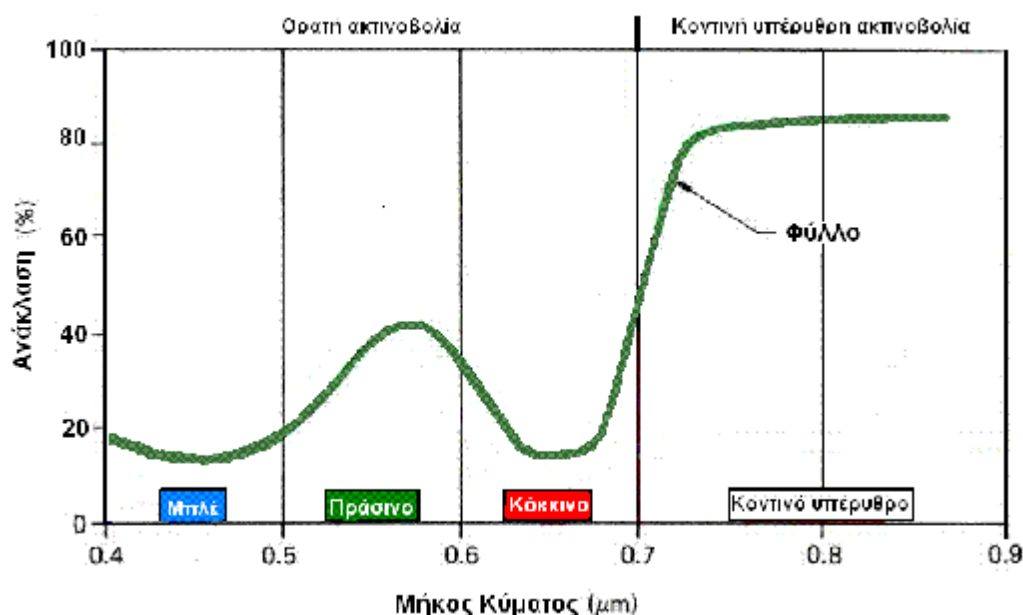
Στην κατηγορία λειτουργίας με φυσικό αέριο, προπάνιο/βουτάνιο ανήκουν τα **blackheats** γραμμικού τύπου, διπλού γραμμικού, σωληνωτού μορφής **U**, πάνελ κλπ. υπέρυθρα συστήματα (εικόνα 2-d) και γενικά όλοι οι **gas radiators**. Η ονομαστική τους ισχύς κυμαίνεται από **2-30 kW**. Έχουν μεγάλη δυναμικότητα παρέχοντας μεγάλη κάλυψη επιφανείας, ομοιόμορφη κατανομή θερμότητας και απαιτούν ύψος εγκατάστασης από **3.3-5m**. Η χρήση αερίου μπορεί να δημιουργήσει διαφυγές και οσμές σε κλειστό χώρο εάν το σύστημα δεν είναι αξιόπιστο και να απαιτείται εξαερισμός.



Εικόνα 2-d: Υπέρυθρα συστήματα τύπου **Blackheats** (πάνελ και διπλού σωληνωτού)

Στην κατηγορία λειτουργίας με ηλεκτρισμό ανήκουν τα **Quartz Tubes, Quartz lamps, Metal Sheath, Ceramic Infrared lamps** κλπ. Είναι συνήθως υψηλής έντασης, με μεγάλη δυναμικότητα και ομοιόμορφη κατανομή θερμότητας. Οι ηλεκτρικές υπέρυθρες διατάξεις είναι καλή εναλλακτική και οικονομική λύση διότι δεν χρειάζονται εξαερισμό και μακροπρόθεσμα επιθυμητή από περιβαλλοντική άποψη. Και οι δύο παραπάνω κατηγορίες συστημάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα θερμοκήπια.

Η μικρού μήκους ακτινοβολία (NIR) που εκπέμπεται από τα υψηλής έντασης συστήματα παρουσιάζει κάποια χαρακτηριστικά τα οποία συμβάλλουν στην καλύτερη αξιοποίησή της στα θερμοκήπια σε σχέση με την μεγάλου μήκους ακτινοβολία. Απορροφάται λιγότερο από την πάνω επιφάνεια των φυτών και έχει υψηλό ποσοστό ανάκλασης (σχήμα 2-8). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται συνθήκες διάχυσης και να θερμαίνονται επαρκώς οι κάτω επιφάνειες των φυτών και το έδαφος.



Σχήμα 2-8. Απορρόφηση και ανάκλαση της υπέρυθρης ακτινοβολίας (NIR) από τα φυτά (Μαυρογιαννόπουλος 2009, Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών).

2.3 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

2.3.1 ΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Το θερμοκήπιο είναι μια κλειστή κατασκευή εντός της οποίας το περιβάλλον μπορεί να ελεγχθεί ή να τροποποιηθεί έτσι ώστε να είναι ευνοϊκό για την σωστή ανάπτυξη των φυτών. Το περιβάλλον του θερμοκηπίου αντιπροσωπεύεται από μια ομάδα μέσων τιμών κλιματικών παραγόντων όπως η ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η υγρασία και η συγκέντρωση του CO₂ οι οποίοι επιδρούν στην ανάπτυξη των φυτών. Η ρύθμιση των περιβαλλοντικών παραγόντων που περιβάλλουν τα φυτά στο θερμοκήπιο ορίζεται ως το μικροκλίμα του θερμοκηπίου. Το μικροκλίμα του θερμοκηπίου ελέγχει άμεσα τις ανταλλαγές ενέργειας και μάζας και επιδρά στις μεταβολικές δραστηριότητες των φυτών. Το μικροκλίμα του θερμοκηπίου επηρεάζεται και από το μακροκλίμα και από την φυσιολογική κατάσταση των φυτικών στοιχείων της μονάδας (γεωμετρικοί παράμετροι, θερμικές συνθήκες) που υπόκεινται σε αυτό.

Η διαφορά μεταξύ του κλίματος του θερμοκηπίου και του εξωτερικού καιρού οφείλεται κυρίως σε δύο μηχανισμούς. Ο πρώτος είναι ο αέρας που περικλείεται μέσα στο θερμοκήπιο και ο οποίος είναι εγλωβισμένος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι εναλλαγές του θερμοκηπιακού αέρα με τον εξωτερικό αέρα να είναι μειωμένες και οι ταχύτητες του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο να είναι μικρές σε σχέση με αυτές του εξωτερικού αέρα. Η μείωση των εναλλαγών του αέρα (ή του εξαερισμού) επιδρά άμεσα στα ισοζύγια ενέργειας και μάζας, ενώ οι μικρότερες ταχύτητες επηρεάζουν την ανταλλαγή ενέργειας, την εξάτμιση νερού και το CO₂ ανάμεσα στον αέρα του θερμοκηπίου και τα υπόλοιπα στοιχεία του θερμοκηπίου (καλλιέργεια, έδαφος, κάλυμμα, σύστημα θέρμανσης). Ο δεύτερος είναι ο μηχανισμός της ακτινοβολίας κατά τον οποίο η μικρού μήκους ηλιακή ακτινοβολία εμποδίζεται από τα διαφανή και αδιαφανή στοιχεία του θερμοκηπίου ενώ η ανταλλαγή της μεγάλου μήκους ακτινοβολίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος είναι αποτέλεσμα των ραδιομετρικών ιδιοτήτων των υλικών κάλυψης.

Το μικροκλίμα του θερμοκηπίου ποσοτικά περιγράφει την διαδικασία μεταφοράς ενέργειας και μάζας εντός του φυτικού θόλου, την ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ του αέρα, των φυτών και λοιπών επιφανειών, και τους τρόπους με τους οποίους τα φυτά ανταποκρίνονται στους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Το μικροκλίμα του θερμοκηπίου επηρεάζεται από τον προσανατολισμό, το γεωγραφικό πλάτος και την περιοχή του θερμοκηπίου, τον φυτικό θόλο μέσα στο θερμοκήπιο, την επιφάνεια του γυμνού εδάφους, τον δομικό σχεδιασμό (σχήμα και μέγεθος), τις ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του θερμοκηπίου, κλπ. Επίσης εξαρτάται από τα συστήματα θέρμανσης και εξαερισμού που υπάρχουν εντός του θερμοκηπίου.

Ο σχεδιασμός και η λειτουργική χρήση ενεργειακά αποδοτικών και πλήρως ελεγχόμενων ως προς το μικροκλίμα τους θερμοκηπιακών συστημάτων είναι η σημερινή τάση για έλεγχο της παραγωγής και της ποιότητας, ανεξάρτητα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Η κλίμακα ελέγχου παρουσιάζει μια σαφή τάση, από τον έλεγχο του μακροκλίματος στον έλεγχο σε επίπεδο μικροκλίματος του θερμοκηπίου. Ο βέλτιστος σχεδιασμός του θερμοκηπίου και ο έλεγχος του περιβάλλοντος, αντιπροσωπεύουν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης και η χρήση των φυσικών και φυσιολογικών πληροφοριών καθώς επίσης και των μοντέλων προσομοίωσης έχει δείξει για να είναι ένα πολύ ισχυρό εργαλείο όσον αφορά αυτό το πρόβλημα. Οι μέθοδοι προσομοίωσης για πρόβλεψη του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου, παρέχουν μια γρήγορη, ευέλικτη και επαναλαμβανόμενη μέθοδο έναντι των πειραματικών προβλέψεων. Σε όλο τον κόσμο ερευνητικές ομάδες αναπτύσσουν και χρησιμοποιούν τα μοντέλα για το σχεδιασμό και το λειτουργικό έλεγχο των θερμοκηπίων.

Τα μοντέλα προσομοίωσης του μικροκλίματος του θερμοκηπίου είναι φυσικά μοντέλα και περιγράφουν την εξέλιξη των παραγόντων του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου υπολογίζοντας τις επιδράσεις της δομής του θερμοκηπίου, τις ιδιότητες των υλικών κάλυψης, τις εξωτερικές κλιματολογικές συνθήκες, και την εφαρμογή των συστημάτων ελέγχου στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου. Επομένως, ένα τέτοιο μοντέλο προάγει τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του θερμοκηπίου, την διαχείριση του κλίματος και της παραγωγής. Η έρευνα πάνω στο ενεργειακό ισοζύγιο, οι διαδικασίες προσομοίωσης και οι εφαρμογές στον έλεγχο του κλίματος του θερμοκηπίου άρχισαν να διεξάγονται στις αρχές της δεκαετίας του **1980 (Bot, 1983; Udink ten Cate, 1983)**. Κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών, η έρευνα προσομοίωσης του θερμοκηπίου έχει συμβάλει στην κατανόηση των φυσικών πτυχών του μικροκλίματος όπως τη μετάδοση της ακτινοβολίας (**Kurata et al., 1991; Boulard & Wang, 2000**).

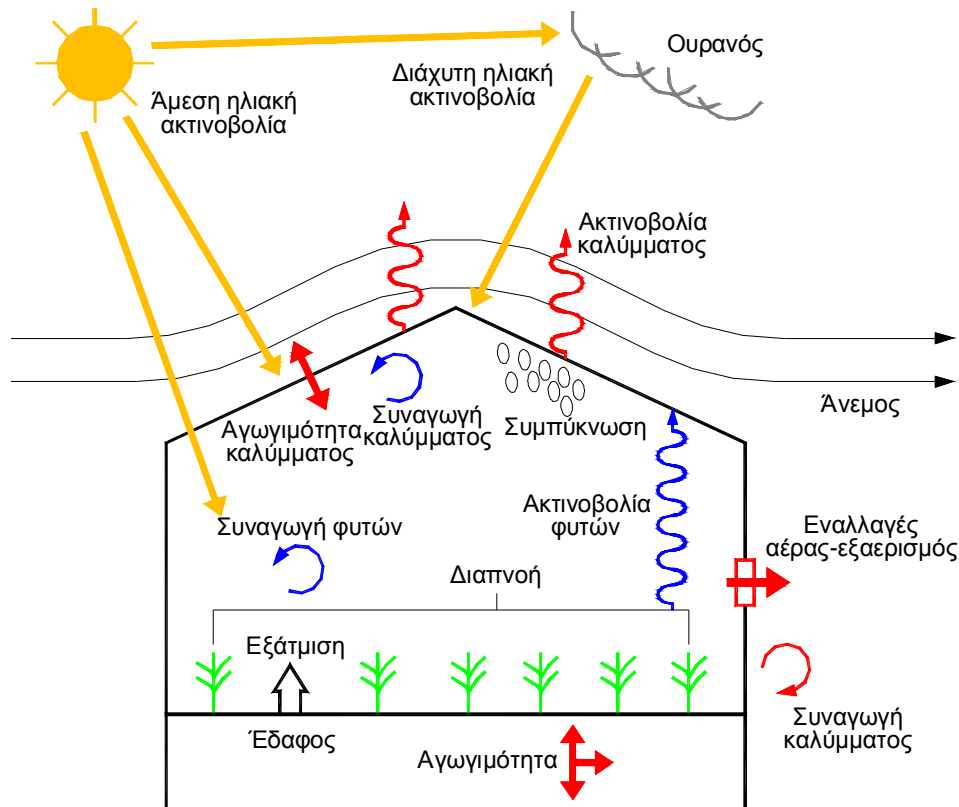
Soriano et al, 2004), τη θέρμανση (Teitel and Tanny, 1998; Kempkes et al, 2000; Kempkes et al, 1998; Kurpaska et al, 2004) τον εξαερισμό (Wang, 1988; Fernandez and Baille, 1995; Boulard & Baille, 1995; Boulard et al., 1997; Boulard et al., 1999; Willits, 2003) και τις φυσιολογικές διαδικασίες εντός του θερμοκηπίου όπως η διαπνοή των φυτών (Stanghellini, 1987; Stanghellini & Meurs, 1992; Boulard & Wang, 2000; Kittas et al, 2001) και η φωτοσύνθεση (Gijzen, 1992; Chalabi & Fernandez, 1994; Nederhoff & Vegter, 1994; Pucheta et al, 2006). Με βάση τα ισοζύγια ενέργειας και μάζας του θερμοκηπίου, διάφοροι ερευνητές έχουν αναπτύξει θερμικά μοντέλα προσομοίωσης με αντιπροσωπευτικότερα στην κατηγορία το **KASPRO** (de Zwart, 1996), το **MICGREEN** (Singh et al, 2006) το **GDGCM** (Pieters & Deltour, 1997), το **SimGreC** (Dimokas et al, 2008) κλπ. Τέλος οι Gary et al (1998) ανέπτυξαν το μοντέλο **SIMULSERRE** που χρησιμεύει ως ένα λογισμικό εκπαίδευσης και προσομοιάζει το σύστημα παραγωγής μέσα στο θερμοκήπιο.

2.3.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ-ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Οι τρεις μέθοδοι μετάδοσης και ανταλλαγής θερμότητας, αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία συμβάλλουν στις θερμικές ιδιότητες του θερμοκηπίου. Η αγωγή λαμβάνει χώρα μέσω των υλικών κάλυψης και του εδάφους του θερμοκηπίου. Η συναγωγή συμβαίνει λόγω διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα και του εδάφους, του καλύμματος, του φυτικού θόλου και των συστημάτων θέρμανσης μέσα στο θερμοκήπιο, και μεταξύ του καλύμματος και του αέρα έξω από το θερμοκήπιο. Οι διαφυγές αέρα συμβαίνουν λόγω κατασκευαστικών ατελειών του θερμοκηπίου και ο εξαερισμός, ο οποίος σκόπιμα μεταφέρει θερμότητα και αέρα μεταξύ του εσωτερικού του θερμοκηπίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος είναι επίσης σχετικός. Η ανταλλαγή ακτινοβολίας εμφανίζεται μεταξύ όλων των υλικών στοιχείων εντός και εκτός του θερμοκηπίου, περιλαμβάνοντας την ανταλλαγή μεταξύ του θερμοκηπίου (και των λοιπών στοιχείων του) με τον ουρανό. Τέλος, επειδή τα φυτά διαπνέουν, απορροφάται λανθάνουσα θερμότητα για παραγωγή υδρατμών, και απελευθερώνεται όταν οι υδρατμοί συμπυκνώνονται στα θερμοκηπιακά στοιχεία (σχήμα 2-9). Η συναγωγή είναι ο δυσκολότερος μηχανισμός για να ποσοτικοποιηθεί ακριβώς και οι ανταλλαγές θερμότητας λόγω συναγωγής είναι συνήθως βασισμένες σε εμπειρικές σχέσεις. Η μελέτη των παραπάνω ανταλλαγών ενέργειας εκτός από την βοήθεια που προσφέρει στην κατανόηση των μεταβολών της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας στον χώρο του θερμοκηπίου, βοηθάει και στην σωστή τοποθέτηση των προβλημάτων θέρμανσης και εξαερισμού καθώς και στην αξιολόγηση των διαφόρων λύσεων εξοικονόμησης ενέργειας στο θερμοκήπιο.

Για να προσδιοριστεί η θερμοκρασία του αέρα, των φυτών και του καλύμματος σε δεδομένες εξωτερικές συνθήκες ή να υπολογιστεί ο ρυθμός εφοδιασμού σε ενέργεια για επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο, θα πρέπει να προσδιοριστεί το ισοζύγιο ενέργειας για τα συστατικά του θερμοκηπίου που αλληλεπιδρούν θερμικά και είναι ο εσωτερικός αέρας, τα φυτά, το έδαφος και το κάλυμμα. Κάθε ισοζύγιο ενέργειας συνίσταται από ποσότητες που περιγράφουν τις εισροές και εκροές ενέργειας και τον ρυθμό αλλαγής της θερμοκρασίας των συστατικών, στην περίπτωση της ανάλυσης συναρτήσεων του χρόνου.

Ένα ενεργειακό ισοζύγιο θερμοκηπίου που περιλαμβάνει τέσσερις μη γραμμικές εξισώσεις απαιτείται για να συνδέσει την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του αέρα του θερμοκηπίου, των φυτών, του εδάφους και του καλύμματος (θερμοκρασίες άγνωστες) με το εξωτερικό περιβάλλον, τον ουρανό και το σύστημα θέρμανσης τα οποία είναι πλήρως καθορισμένα. Οι αριθμητικοί υπολογισμοί απαιτούν τη γνώση των συντελεστών ακτινοβολίας και των συντελεστών όψευς, των συντελεστών συναγωγής κλπ. Οι λύσεις των εξισώσεων αποδίδουν τις μέσες θερμοκρασίες για τα τέσσερα προαναφερθέντα στοιχεία. Η προσέγγιση στο πρόβλημα μπορεί να περιγραφεί μέσα από τα «πεπερασμένα στοιχεία» με την ευρύτερη έννοια, αλλά και της απλούστερης εκδοχής της ελάχιστης διαίρεσης σε στοιχεία.



Σχήμα 2-9: Ανταλλαγές ενέργειας του θερμοκηπίου με το περιβάλλον

2.3.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΑ ΣΕ ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΑΖΑΣ

Οι παλαιότερες προσπάθειες για ανάπτυξη μοντέλων του θερμικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου, ήταν κυρίως για καθορισμό του μεγέθους των θερμαντικών σωμάτων και των ανεμιστήρων (Morris, 1956; Walker, 1965). Αυτά ήταν κατά κανόνα ισοζύγια θερμότητας σε **steady state** συνθήκες, αγνοώντας στοιχεία του θερμικού περιβάλλοντος τα οποία υποθετικά συνεισφέρανε μικρό λάθος. Έκτοτε έχουν προταθεί αρκετά μαθηματικά μοντέλα του θερμοκηπίου που βασίζονται στην ανάλυση του ενεργειακού ισοζυγίου είτε πρόκειται για στατικά είτε για δυναμικά μοντέλα. Τα

στατικά μοντέλα βασίζονται στο στατικό ενεργειακό ισοζύγιο των συνιστωσών του θερμοκηπίου (κάλυμμα, εσωτερικός αέρας, φυτά, έδαφος) υπό **steady state** συνθήκες και χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν τη μέση συμπεριφορά αυτών των συνιστωσών. Σε αυτά τα μοντέλα οι θερμοχωρητικότητες των συνιστωσών παραβλέπονται (Kimpall, 1973; Nijsken et al, 1984; Albright et al, 1985; Jolliet & Munday, 1989; Jolliet et al, 1999). Τα στατικά μοντέλα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν τη χρονική ανταπόκριση των συνιστωσών του θερμοκηπίου όταν η χρονική ανταπόκριση αυτών των συνιστωσών έγινε συγκρίσιμη με το ρυθμό χρονικής αλλαγής του εξωτερικού περιβάλλοντος. Γι αυτό τον λόγο εμφανίστηκε η ανάγκη για χρονοεξαρτώμενες προβλέψεις και συνεπώς για ανάπτυξη δυναμικών μοντέλων στα οποία οι μεταβολές με το χρόνο των **state** παραμέτρων λαμβάνονται υπόψη. Η δυναμική μοντελοποίηση των παραμέτρων οδηγεί σε ένα σύνολο μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξεως που μπορούν να λυθούν αριθμητικά. Οι δυναμικές οριακές συνθήκες (εξωτερικές καιρικές συνθήκες) δίνονται ως σύνολα δεδομένων. Κατά αυτόν τον τρόπο, υπολογίζεται η χρονική εξάρτηση σταθερών και μεταβλητών ροής του συστήματος (Bot, 2001). Όμως και τα περισσότερα δυναμικά μοντέλα αγνοούν την θερμοχωρητικότητα του καλύμματος, των φυτών και του εσωτερικού αέρα και λαμβάνουν υπόψη τους μόνο την θερμοχωρητικότητα μέσα στο έδαφος (Abdel-Ghany & Kozai, 2006). Τα δυναμικά μοντέλα είναι σημαντικά εργαλεία στο σχεδιασμό του θερμοκηπίου, στον έλεγχο του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου και στην προσομοίωση της ανάπτυξης των φυτών (Takamura et al, 1977; Kindelan, 1980; Bot, 1983, Zhang et al, 1996; Tiwari et al, 1998; Navas et al, 1998; Sharma et al, 1999; Sharma & Tiwari, 1999; Tavares et al, 2001; Ghosal et al, 2003; Chou et al, 2004 κλπ).

Διάφοροι ερευνητές υποστηρίζουν την αναγκαιότητα για τεχνικές διατήρησης της ενέργειας μέσα στα θερμοκήπια κάτω από ψυχρές κλιματολογικές συνθήκες. Το σύνολο κατάλληλων επιλογών για τέτοιες περιοχές, έχει μελετηθεί με τη βοήθεια μοντέλων προσομοίωσης που βασίζονται σε ισοζύγια ενέργειας και μάζας και καταλήγουν σε μια βελτιστοποιημένη λύση για ένα δοθέν σύνολο λειτουργικών συνθηκών. Ένα τέτοιο μαθηματικό μοντέλο αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε από τους Gupta and Chandra (2002) για να μελετηθούν οι επιδράσεις των διαφόρων σχημάτων, του προσανατολισμού και των τεχνικών διατήρησης της ενέργειας πάνω στο ενεργειακό ισοζύγιο ενός προσομοιωμένου θερμοκηπίου. Η ανάπτυξη του μοντέλου βασίστηκε σε μία χρονοεξαρτώμενη ανάλυση του θερμικού περιβάλλοντος που είχε αναπτυχθεί από τους Chandra et al (1981) και είχε τροποποιηθεί από τον Gupta (2000). Τα ουσιαστικά στοιχεία του μοντέλου είναι το θερμικό ισοζύγιο και το ισοζύγιο υγρασίας του εσωτερικού αέρα. Η σχετική υγρασία στο μοντέλο θεωρείται ότι είναι 80% και οι θερμοκρασίες ημέρας και νύχτας είναι 15 και 20 °C αντίστοιχα και αντιπροσωπεύουν τις συνθήκες που απαιτούνται για πολλές θερμοκηπιακές καλλιέργειες της εύκρατης ζώνης. Οι εισαγόμενες παράμετροι στο μοντέλο που περιλαμβάνουν ωριαία δεδομένα, είναι η θερμοκρασία και σχετική υγρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια έξω από το θερμοκήπιο. Η μονοδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των θερμοκρασιών των στερεών επιφανειών (φυτά, έδαφος, κάλυμμα) σύμφωνα με τις αρχικές και οριακές συνθήκες που έχουν τεθεί, ενώ η μονοδιάστατη μέθοδος **Simplex** χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει την αγωγή θερμότητας στα στερεά αντικείμενα μέσα στο θερμοκήπιο. Η συμπεριφορά του προσομοιωμένου θερμοκηπίου έχει προβλεφθεί για διάφορα σχήματα θερμοκηπίου (αμφικλινές, τοξωτό, γοθτικό), για προσανατολισμό A-Δ και B-N, για μόνωση βορινού τοιχώματος, για χρήση θερμοκουρτίνας και για διπλό υαλοπίνακα στο νότιο τοίχωμα.

Το μοντέλο καταλήγει σε ένα σύνολο σχεδιαστικών χαρακτηριστικών για ένα ενεργειακά αποδοτικό θερμοκήπιο. Οι προβλέψεις του μοντέλου δείχνουν ότι ένα γοθτικού τύπου θερμοκήπιο απαιτεί **2.6%** και **4.2%** λιγότερη θέρμανση σε σχέση με ένα αμφικλινές και ένα τοξωτού τύπου θερμοκήπιο αντίστοιχα. Ένας Α-Δ προσανατολισμός του θερμοκηπίου απαιτεί **2%** λιγότερη θέρμανση σε σχέση με τον Β-Ν προσανατολισμό του ίδιου θερμοκηπίου. Η μόνωση του βορινού τοιχώματος ενός Α-Δ προσανατολισμένου θερμοκηπίου δίνει έως και **30%** εξοικονόμηση ενέργειας. Η χρήση νυχτερινής θερμοκουρτίνας μειώνει την νυχτερινή απαίτηση θέρμανσης κατά **70,8%** και της ημερησίας απαίτησης κατά **60.6%**. Αντικαθιστώντας το απλό διαφανές κάλυμμα στην νότια πλευρά του θερμοκηπίου με διπλό υαλοπίνακα με ενδιάμεσο στρώμα αέρος η ενεργειακή απαίτηση ήταν μειωμένη κατά **23%**. Το σύνολο των παραπάνω σχεδιαστικών χαρακτηριστικών βρέθηκε ότι εξοικονομεί ενεργειακές ανάγκες του θερμοκηπίου έως και **80%** σε ψυχρές κλιματολογικές συνθήκες. Μια εσωτερική αποθηκευτική μονάδα από εγκιβωτισμένο στρώμα πετρώματος καλύπτει την εναπομείνασα ενεργειακή απαίτηση του θερμοκηπίου. Τέλος, για τις ανάγκες της προσομοίωσης θεωρήθηκε ένα θερμοκήπιο διαστάσεων **12mx200m** τοποθετημένο στο Δελχί, κάτω από ψυχρές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Ένα θερμικό μοντέλο επίσης για τις τεχνικές διατήρησης της ενέργειας έχει αναπτυχθεί από τους **Ghosal et al (2004)** και **Ghosal and Tiwari (2007)** για να διερευνήσει τη δυνατότητα της χρησιμοποίησης της αποθηκευμένης θερμότητας του εδάφους για θέρμανση και ψύξη του θερμοκηπίου με τη βοήθεια ενός εναλλάκτη εδάφους-αέρα (**EAHE**) που είναι ενσωματωμένος στο θερμοκήπιο. Το μοντέλο χρησιμοποιεί και την ύπαρξη του βορινού τοίχου, δεδομένου ότι οι περισσότερες από τις κατασκευές στην περιοχή (Ινδία) καλύπτουν το βορινό τοίχωμα του θερμοκηπίου για τη μείωση των απωλειών θερμότητας. Οι τρεις εξισώσεις ενεργειακού ισοζυγίου έχουν αναπτυχθεί για το βορινό τοίχωμα, τον εσωτερικό αέρα και το έδαφος και βάσει των παραδοχών ότι: **(i)** η ανάλυση είναι βασισμένη σε ψευδομόνιμες συνθήκες, **(ii)** δεν υπάρχει καμία ανταλλαγή ακτινοβολίας θερμότητας μεταξύ των τοίχων και της οροφής του θερμοκηπίου λόγω των αμελητέων διαφορών θερμοκρασίας, **(iii)** η ροή του αέρα είναι ομοιόμορφη κατά μήκος των θαμμένων σωλήνων, **(iv)** η ροή θερμότητας είναι μονοδιάστατη λόγω της πεπερασμένης έκτασης και βάθους του εδάφους. Η επίλυση των εξισώσεων και η πρόβλεψη της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα έγινε με υπολογιστικό πρόγραμμα βασισμένο στο λογισμικό **Matlab**. Διεξήχθησαν επίσης παραμετρικές μελέτες για τον συζευγμένο με το θερμοκήπιο **EAHE** για να διευκρινιστεί η επίδραση του μήκους και της διαμέτρου των σωλήνων, του ρυθμού ροής της μάζας του αέρα, του βάθους και του τύπου του εδάφους πάνω στην θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου.

Η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου, με τις πειραματικές παραμέτρους του **EAHE**, βρέθηκε να είναι κατά μέσον όρο **7- 8 °C** υψηλότερα το χειμώνα και **5-6 °C** χαμηλότερα το καλοκαίρι από την θερμοκρασία του ίδιου θερμοκηπίου χωρίς σύζευξη με τον **EAHE**. Οι θερμοκρασίες του εσωτερικού αέρα αυξάνονται το χειμώνα και μειώνονται το καλοκαίρι όταν αυξάνεται το μήκος των σωλήνων, όταν μειώνεται η διάμετρος των σωλήνων, όταν μειώνεται η μάζα του ρέοντος αέρα εντός των θαμμένων σωλήνων και όταν αυξάνεται το βάθος του εδάφους έως και **4 μέτρα**. Οι προβλεφθείσες και μετρημένες τιμές των θερμοκρασιών του αέρα επιβεβαιώθηκαν μέσω αριθμητικής ανάλυσης και συντελεστών συσχέτισης παρουσιάζοντας επαρκή συμφωνία.

Για αποδοτική ανάπτυξη των τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας, αυτές πρέπει να αξιολογηθούν ως τμήματα ενός ολοκληρωμένου θερμοκηπιακού συστήματος (συμπεριλαμβανομένων των περιβαλλοντικών συνθηκών του θερμοκηπίου και στοχεύοντας σε πρακτικές εφαρμογές). Στο **Wageningen** έχει αναπτυχθεί από τον **De Zwart (1996)** το μοντέλο προσομοίωσης ενός ολοκληρωμένου θερμοκηπιακού συστήματος για θερμοκήπια τύπου **venlo, Greenhouse (KAS) Process (KASPRO)**, βασισμένο σε ισοζύγια ενέργειας και μάζας καθώς και στο προϋπάρχον μοντέλο του **Bot (1983)**. Το μοντέλο προσομοιάζει επακριβώς το κλίμα του θερμοκηπίου, υπολογίζει την ενεργειακή κατανάλωση που προκύπτει και λαμβάνει πλήρως υπόψη τις αμοιβαίες εξαρτήσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών του θερμοκηπίου και του ελέγχου κλίματος.

Το δυναμικό αυτό μοντέλο όσον αφορά το μέρος του κλίματος αποτελείται από τρία υπομοντέλα: ένα θερμικό μοντέλο, ένα μοντέλο υγρασίας και ένα μοντέλο **CO₂**. Περιλαμβάνει επίσης συστήματα ενεργειακής μετατροπής και ένα μεγάλο αριθμό από **modules** που προσομοιώνουν τα συνήθη συστήματα ελέγχου του κλίματος του θερμοκηπίου. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων **10** ετών το μοντέλο έχει επεκταθεί με πειραματικά επιβεβαιωμένα **modules** για τις κουρτίνες εξοικονόμησης ενέργειας, τους εναλλάκτες θερμότητας, την αντλία θερμότητας, την παραγωγή και βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη αποθήκευση θερμότητας. Επιπλέον ένα **module** φωτοσύνθεσης του φυτικού θόλου για προσομοίωση της ανάπτυξης της καλλιέργειας περιλαμβάνεται στο **KASPRO** για να υπολογίζει το ισοζύγιο του **CO₂** στο θερμοκήπιο. Αυτό καθιστά το **KASPRO** κατάλληλο ως εργαλείο για να εκτιμήσει τις προοπτικές των νέων επιτευγμάτων στην κατασκευή θερμοκηπίων και στον έλεγχο του μικροκλίματος σε σχέση με την εξοικονόμηση ενέργειας και την παραγωγή.

Το σχετικά πρόσφατα αναπτυγμένο θερμοκηπιακό υλικό κάλυψης **Lexan® ZigZag™ (Swinkels et al, 2001; Swinkels, 2006)** είναι ένα παράδειγμα που το κάλυμμα ως συνιστώσα του θερμοκηπίου αναπτύχθηκε και αξιολογήθηκε ως ένα μέρος ενός ολοκληρωμένου θερμοκηπιακού συστήματος. Η βέλτιστη **ZigZag** γεωμετρία του υλικού σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας υπολογιστικό πρόγραμμα **ray tracing**. Για τον προσδιορισμό του συντελεστή μόνωσης σε φύλλα διαφορετικής γεωμετρίας οι υπολογισμοί έγιναν με **CFD** μοντέλα σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα. Οι συνολικές περιβαλλοντικές συνθήκες του θερμοκηπίου και η κατανάλωση ενέργειας προσομοιώθηκαν χρησιμοποιώντας το μοντέλο **Kaspro**. Αν και η στιγμιαία εξοικονόμηση ενέργειας φαίνεται να είναι της τάξεως του **45%**, η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας αναμένεται να είναι **20-25%** σε σχέση με το απλό γυαλί (**Sonneveld και Swinkels, 2005**). Μετρήσεις στην πρώτη μεγάλη εμπορική κλίμακα θερμοκηπίου με κάλυψη **ZigZag™** διεξάγονται τώρα για επιβεβαίωση των τιμών.

Ένα ολοκληρωμένο θερμικό μοντέλο θερμοκηπίου το "**Gembloux Dynamic Greenhouse Climate Model'**" (**GD-GCM**) παρουσιάστηκε από **τους Pieters & Deltour (1997)**. Το **GCM** είναι ένα δυναμικό, ημι-μονοδιάστατο μοντέλο κλίματος θερμοκηπίου που περιγράφει τις ανταλλαγές ενέργειας μεταξύ επτά εσωτερικών στρωμάτων (τέσσερα στρώματα εδάφους, ένα στρώμα φυτικού θόλου, ένα στρώμα εσωτερικού αέρα, ένα κάλυμμα), τα οποία διαμορφώνουν το σύστημα, και τρία εξωτερικά στρώματα (υπέδαφος που συμπεριλαμβάνεται ως πηγή αγωγής, εξωτερικός αέρας και ουρανός) που αποτελούν, μαζί με την ηλιακή ακτινοβολία, τις οριακές συνθήκες. Για κάθε ένα από τα στρώματα, οι απώλειες θερμότητας ή τα κέρδη από την ηλιακή ακτινοβολία, η θερμική ακτινοβολία, η αγωγή, η συναγωγή, ο εξαερισμός και η λανθάνουσα θερμότητα περιγράφεται μαθηματικά. Επιπλέον, μια εξίσωση μεταφοράς

μάζας για την υγρασία λαμβάνεται υπόψη. Επειδή η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από κάποια στρώματα εξαρτάται από τη γωνία της πρόσπτωσης και συνεπώς από την θέση του ήλιου στον ουρανό το μοντέλο δεν είναι αυστηρά μονοδιάστατο και θεωρείται ημι-μονοδιάστατο. Το μοντέλο που προκύπτει αποτελείται από οκτώ μη γραμμικές εξισώσεις ισοζυγίου θερμότητας και μάζας.

Η επίδραση της συμπύκνωσης στο κάλυμμα αναπτύσσεται αρκετά, μέσω μιας σύνθετης θερμοχωρητικότητας που χρησιμοποιείται καθώς και όταν νερό συμπυκνώνεται πάνω στο κάλυμμα. Πιο συγκεκριμένα, η συμπύκνωση και η εξάτμιση από την εξωτερική επιφάνεια του καλύμματος παραβλέπονται, δεδομένου ότι σπάνια συναντιούνται στην πράξη. Στο εσωτερικό, η συμπύκνωση θεωρείται ότι αναπτύσσεται στο κάλυμμα όταν η θερμοκρασία του καλύμματος πέφτει κάτω το σημείο δρόσου του εσωτερικού αέρα και παρατηρούνται 4 φάσεις συμπύκνωσης: **(i)** συμπύκνωση χωρίς να πέφτουν σταγόνες I_{cf} , **(ii)** συμπύκνωση με σταγόνες $I_{cf,max}$, **(iii)** εξάτμιση του συμπυκνώματος και **(iv)** στεγνό κάλυμμα και καθόλου εξάτμιση. Δεδομένου ότι τα υλικά κάλυψης του θερμοκηπίου και κυρίως τα πλαστικά είναι πολύ λεπτά, η θερμοχωρητικότητά τους ανά μονάδα επιφάνειας κάλυψης είναι πολύ μικρή. Επειδή η θερμοχωρητικότητα του νερού είναι υψηλή και επειδή το ισοδύναμο πάχος του συμπυκνώματος μπορεί να είναι περισσότερο από **100 μm** , η επίδραση του συμπυκνώματος στην θερμοχωρητικότητα του καλύμματος δεν είναι αμελητέα. Επομένως, η συνολική θερμοχωρητικότητα (που εκφράζεται πάντα ανά μονάδα επιφάνειας κάλυψης) υπολογίζεται ως το άθροισμα της θερμοχωρητικότητας του υλικού κάλυψης και της μεμβράνης του νερού. Με αυτήν την προσέγγιση αποφεύγονται αριθμητικά προβλήματα αστάθειας

Οι ιδιότητες θερμικής ακτινοβολίας (**IR**) του καλύμματος επίσης τροποποιούνται και αντικαθίστανται από τις θερμικές ιδιότητες του νερού όταν συμβαίνει συμπύκνωση πάνω στο υλικό κάλυψης. Στο συγκεκριμένο μοντέλο το υγρό κλάσμα του καλύμματος ορίζεται ως λόγος του πραγματικού (ισοδύναμο) πάχους συμπυκνώματος I_{cf} προς το μέγιστο (ισοδύναμο) πάχος συμπυκνώματος $I_{cf,max}$.

Το έδαφος θεωρείται ότι καλύπτεται ολοσχερώς από ένα άσπρο φύλλο πολυαιθυλενίου, όλο το νερό που συμπυκνώνει επάνω στο έδαφος πρέπει να επανεξατμιστεί και έτσι υπάρχει συμπύκνωση με σταγόνες. Συνεπώς η συμβολή του συμπυκνώματος στην θερμοχωρητικότητα του πρώτου εδαφικού στρώματος πάντα αγνοείται. Εδώ πάλι οι θερμικές ιδιότητες του νερού χρησιμοποιούνται για υγρή επιφάνεια εδάφους. Επειδή το έδαφος είναι αδιαφανές στη θερμική ακτινοβολία, η σταθερότητα του μοντέλου δεν τίθεται σε κίνδυνο.

Η παρουσία συμπύκνωσης στα φυτά πρέπει να αποφεύγεται για λόγους εξάπλωσης ασθενειών. Όταν όμως συμβαίνει και με δεδομένο ότι το πάχος της μεμβράνης του νερού είναι ασήμαντο, οι πυκνότητες συμπύκνωσης στα φύλλα δεν υπολογίζονται. Μόνο ελέγχεται εάν η προσομοιωμένη θερμοκρασία φύλλων είναι κάτω από την υπολογισμένη θερμοκρασία του σημείου δρόσου του αέρα ή όχι.

Με το παρόν μοντέλο συγκρίνονται τέσσερα θερμοκήπια στη διάρκεια ενός ολόκληρου έτους με καλλιέργεια τομάτας: **(i)** ένα τυπικό θερμοκήπιο από γυαλί, **(ii)** ένα από γυαλί χαμηλής ικανότητας εκπομπής, **(iii)** ένα από **PE** και **(iv)** ένα από θερμικό **PE**. Οι προσομοιώσεις διεξήχθησαν συμπεριλαμβάνοντας και αγνοώντας φαινόμενα συμπύκνωσης και εξάτμισης μέσα στο θερμοκήπιο. Διαπιστώθηκε σε σχέση με τις

απαιτήσεις θέρμανσης ότι, όταν η συμπύκνωση αγνοήθηκε, ένα 15% υποτιμήθηκε για το κάλυμμα γυαλιού, και μια υπερεκτίμηση της 20% έγινε για το κάλυμμα PE. Η συμπύκνωση στο κάλυμμα φαίνεται να είναι η σημαντικότερη δεξαμενή εξάτμισης υδρατμών στον εσωτερικό αέρα κατά τη διάρκεια της νύχτας (85-89% ανάλογα με το υλικό κάλυψης). Ενώ η ροή μάζας λόγω εξάτμισης από το κάλυμμα βρέθηκε να είναι πολύ χαμηλή και σχεδόν η ίδια για τα υλικά, η ροή μάζας λόγω συμπύκνωσης ήταν πολύ υψηλότερη, εξαρτώμενη από το υλικό κάλυψης. Ροή συμπύκνωσης στο καλυμμένο με PE έδαφος και στην καλλιέργεια βρέθηκαν για να είναι αμελητέες. Η παράβλεψη της συμπύκνωσης αποδείχθηκε να μην έχει σημαντική επίδραση στην θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου και οδήγησε σε μια υπερεκτίμηση της σχετικής υγρασίας περίπου 10%. Η παράβλεψη της λανθάνουσας θερμότητας οδήγησε σε μικρή υπερεκτίμηση της θερμοκρασίας των φυτών σε θερμοκήπια με υλικά κάλυψης αδιαφανή στην θερμική ακτινοβολία. Το μοντέλο υιοθετήθηκε επιτυχώς από τους Wang et al (1997) για να προβλέψει τις ανταλλαγές θερμότητας και μάζας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος σε ένα πλαστικό θερμοκήπιο τύπου tunnel.

Το μοντέλο προσομοίωσης SimGreC αναπτύχθηκε από τους Dimokas et al (2008) και είναι μια τροποποιημένη έκδοση του προαναφερθέντος μοντέλου GCM. Οι τροποποιήσεις του μοντέλου ήταν απαραίτητες προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το SimGreC για τη βελτιστοποίηση του κλίματος του θερμοκηπίου. Το μοντέλο περιέχει 5 υπομοντέλα που προσομοιώνουν το ισοζύγιο ενέργειας και υγρασίας του αέρα, το ενεργειακό ισοζύγιο της καλλιέργειας, του καλύμματος και του εδάφους. Τα παραπάνω υπομοντέλα περιλαμβάνουν τις διαδικασίες διαπνοής, εξαερισμού, συμπύκνωσης και ύγρυνσης των φυτών που χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν την θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα, των φυτών, του καλύμματος, του εδάφους και την σχετική υγρασία ως συνάρτηση του εξωτερικού περιβάλλοντος και των συστημάτων ελέγχου του θερμοκηπίου (σύστημα θέρμανσης, άνοιγμα παραθύρων). Το SimGreC χρησιμοποιεί έναν μεγάλο αριθμό παραμέτρων προκειμένου να περιγραφούν οι διαφορετικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης.

Οι εισαγόμενες παράμετροι στο μοντέλο περιγράφουν το εξωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου, την ενέργεια που εισέρχεται στο θερμοκήπιο από το σύστημα θέρμανσης και τον εξαερισμό. Τα δύο τελευταία είναι τα κύρια συστήματα ελέγχου του θερμοκηπιακού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα οι εισαγόμενοι εξωτερικοί παράγοντες είναι: (i) η θερμοκρασία του αέρα, (ii) η σχετική υγρασία, (iii) η ηλιακή ακτινοβολία και (iv) η ταχύτητα του ανέμου. Τα συστήματα ελέγχου είναι: (a) το ποσοστό των ανοιγμάτων που βρίσκονται σε λειτουργία και (b) η ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος θέρμανσης για να θερμάνει τον εσωτερικό αέρα του θερμοκηπίου. Η ολοκλήρωση των αλγορίθμων των πέντε υπομοντέλων οδηγεί στις εξαγόμενες παραμέτρους του μοντέλου που είναι η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα, και η θερμοκρασία καλύμματος, φυτών και εδάφους.

Η αξιοπιστία του SimGreC ελέγχθηκε σε δύο περιπτώσεις κλιματολογικών συνθηκών: (i) κλιματολογικές συνθήκες φθινοπώρου, όταν το άνοιγμα των παραθύρων ελεγχόταν ηλεκτρονικά μέσω υπολογιστικού λογισμικού και (ii) κλιματολογικές συνθήκες χειμώνα, όταν δεν λειτουργούσε ο εξαερισμός και ο εσωτερικός αέρας ήταν έντονα περιορισμένος. Και στις δύο περιπτώσεις τα αποτελέσματα του SimGreC φαίνονται να έχουν κάποιες μικρές διαφορές με τα πειραματικά στοιχεία. Δύο λόγοι θα μπορούσαν να εξηγήσουν τις μικρές αποκλίσεις

που παρουσιάζονται. Τα φαινόμενα θερμικής ακτινοβολίας στο κάλυμμα, ιδιαίτερα σημαντικά όταν το θερμοκήπιο είναι κλειστό, υποτιμήθηκαν στο **SimGreC**. Ομοίως υποτιμήθηκαν οι ροές εξαερισμού όταν ελέγχθηκε αυτόματα το άνοιγμα των παραθύρων του θερμοκηπίου.

Το μαθηματικό μοντέλο **MICGREEN** (*MICroclimate of GREENhouse*) αποτελούμενο από ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων έχει αναπτυχθεί από τους **Singh et al (2006)** και περιγράφει το ενεργειακό ισοζύγιο ενός τοξωτού θερμοκηπίου. Οι εξισώσεις διατυπώθηκαν για 4 συνιστώσες του θερμοκηπίου, δηλ. το κάλυμμα, τον εσωτερικό αέρα, την επιφάνεια του φυτικού θόλου και την επιφάνεια του γυμνού εδάφους (στο συγκεκριμένο μοντέλο ένα μέρος του εδάφους είναι καλυμμένο από φυτά). Οι βασικές παραδοχές του είναι ότι: **(i)** ο αέρας του θερμοκηπίου είναι καλά αναμειγμένος και καμιά διαβάθμιση θερμοκρασίας και υγρασίας δεν υπάρχει στον αέρα του θερμοκηπίου, **(ii)** η συμπύκνωση και εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους είναι αμελητέες, **(iii)** ο αέρας είναι πλήρως διαπερατός στην ηλιακή και θερμική ακτινοβολία, και **(iv)** η θερμοκρασία της κάθε συνιστώσας του θερμοκηπίου είναι ίδια σε όλη την έκταση της κάθε συνιστώσας. Τα εισαγόμενα στοιχεία στο μοντέλο είναι η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος, η κάθετη και οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του εδάφους κάτω από τα φυτά και η θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος **6 cm** (πρώτο εδαφικό στρώμα). Οι ιδιότητες των υλικών επελέγησαν από την βιβλιογραφία (απορροφητικότητα ανακλαστικότητα κλπ), κάποιες όπως η περατότητα του καλύμματος (**transmissivity**) μετρήθηκαν και κάποιες άλλες καθορίστηκαν από συσχετισμούς, πχ. συντελεστές συναγωγής

Ένα υπολογιστικό πρόγραμμα φτιάχτηκε στην γλώσσα **C ++**. Οι εξισώσεις λύθηκαν χρησιμοποιώντας την επαναληπτική μέθοδο **Gauss-Seidel**. Τα εξερχόμενα στοιχεία από το μοντέλο είναι η θερμοκρασία καλύμματος, η θερμοκρασία εσωτερικού αέρα, η θερμοκρασία φυτικού θόλου και η θερμοκρασία γυμνού εδάφους. Για την αξιολόγηση της ποιότητας του μοντέλου διεξήχθησαν πειράματα σε **PE** πειραματικό θερμοκήπιο με καλλιέργεια τομάτας, προσανατολισμού Α-Δ και έκτασης **192 m²**, για να ληφθούν δεδομένα κατά την διάρκεια του χειμώνα και κατά την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Τα αποτελέσματα του μοντέλου συγκρινόμενα με τα πειραματικά δεδομένα βρέθηκαν σε αρκετά καλή συμφωνία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του θερμοκηπίου, στο οποίο το θερμοκήπιο αναλύεται παρουσία θέρμανσης και καλλιέργειας. Το μοντέλο αποτελείται από μία ομάδα μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων ισοζυγίου ενέργειας που αναπτύσσονται για δύο όγκους ελέγχου, τον εσωτερικό αέρα και το κάλυμμα του θερμοκηπίου. Τα εισαγόμενα στοιχεία στο μοντέλο είναι οι εξωτερικές κλιματολογικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του θερμοκηπίου. Οι εξισώσεις επιλύονται με τυποποιημένες αριθμητικές μεθόδους και τα εξερχόμενα στοιχεία είναι οι θερμοκρασίες του εσωτερικού αέρα και του καλύμματος του θερμοκηπίου. Οι βασικοί στόχοι είναι: (i) να υπάρξει ένα θερμικό μοντέλο που να προσομοιάζει επαρκώς τις κύριες διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας μέσα στο θερμοκήπιο κάτω από ένα σύνολο λειτουργικών συνθηκών και (ii) να καθορίζονται με σχετική ακρίβεια οι παράγοντες που επηρεάζουν την θερμική συμπεριφορά του θερμοκηπίου δηλ. η θερμοκρασία εσωτερικού αέρα και καλύμματος. Έτσι θα υπάρχει αξιόπιστη πρόβλεψη του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου, σαφής εκτίμηση των ενεργειακών αναγκών του και του εξοικονομούμενου ενεργειακού οφέλους ανάλογα με την τεχνική θέρμανσης που εφαρμόζεται. Η ποιότητα του παρόντος μοντέλου ελέγχεται με σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων με βάση πειραματικών δεδομένων.

3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Η προσομοίωση είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη και συνεχώς πιο δημοφιλής μέθοδος για τη μελέτη πολύπλοκων συστημάτων. Αποτελεί διερευνητική μέθοδο που έχει σαν σκοπό την βελτιστοποίηση ενός συστήματος, την μελέτη λειτουργίας του και την ανάλυση της ευαισθησίας του. Ως διερευνητική μέθοδος όμως εξαρτάται πολύ από την πιστότητα του μοντέλου που χρησιμοποιείται (επιλογή παραμέτρων). Κυρίως όμως παρέχει την δυνατότητα ενσωμάτωσης της δυναμικής συμπεριφοράς ενός συστήματος και την δυνατότητα προσομοίωσης πειραμάτων με ίδιες συνθήκες. Έχει φυσικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της, αλλά και υπάρχουν πολλοί παράγοντες εξ αιτίας των οποίων ορισμένες προσομοιώσεις δεν καταλήγουν στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Ορισμένα *πλεονεκτήματα* της χρήσης της μεθόδου της προσομοίωσης είναι:

- Στα περισσότερα σύνθετα συστήματα του πραγματικού κόσμου οι παράμετροί τους που εξαρτώνται από ένα πλήθος άλλων παραμέτρων, εμφανίζονται να μεταβάλλονται με τυχαίο τρόπο και για αυτό τον λόγο δεν μπορούν να περιγραφούν ικανοποιητικά με κάποιο μαθηματικό μοντέλο που μπορεί να λυθεί αναλυτικά. Έτσι, η προσομοίωση είναι συχνά η μόνη διαθέσιμη μέθοδος μελέτης.
- Η προσομοίωση επιτρέπει την εκτίμηση της απόδοσης ενός υπάρχοντος συστήματος, κάτω από κάποιο προβλεπόμενο σύνολο λειτουργικών συνθηκών.

- Μπορούν να συγκριθούν μέσω της προσομοίωσης, εναλλακτικές προτεινόμενες σχεδιάσεις ή εναλλακτικές πολιτικές λειτουργίας του συστήματος, ώστε να προσδιορισθεί η βέλτιστη λύση που ικανοποιεί τις καθορισμένες προδιαγραφές.
- Σε ένα μοντέλο προσομοίωσης μπορούμε να έχουμε καλύτερο έλεγχο στις συνθήκες, σε σχέση με πιθανό πειραματισμό με το πραγματικό σύστημα και κυρίως δυνατότητα επανάληψης του ίδιου φαινομένου.
- Η προσομοίωση επιτρέπει τη μελέτη ενός συστήματος που έχει μακρόχρονη εξέλιξη (π.χ. ένα οικονομικό σύστημα), σε πολύ μικρότερο χρόνο, ή τη μελέτη της λεπτομέρειάς του σε περισσότερο χρόνο. Ορισμένα *μειονεκτήματα* της προσομοίωσης είναι:
- Τα μοντέλα προσομοίωσης απαιτούν πολύ χρόνο και πόρους για να αναπτυχθούν.
- Ο μεγάλος όγκος αριθμών που παράγονται από μία μελέτη προσομοίωσης ή η εντύπωση που δημιουργούν οι τυχόν γραφικές αναπαραστάσεις των αποτελεσμάτων της, συχνά ενισχύουν μία τάση να δίνεται μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα αυτά από όσο πρέπει. Αν το μοντέλο δεν είναι μία αρκετά έγκυρη αναπαράσταση του συστήματος, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ανεξάρτητα του πόσο εντυπωσιακά είναι, θα προσθέσουν λίγη χρήσιμη πληροφορία για το πραγματικό σύστημα.
- Κάθε εκτέλεση ενός μοντέλου προσομοίωσης παράγει μόνο εκτιμήσεις των πραγματικών χαρακτηριστικών του μοντέλου, για ένα συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων εισόδου. Έτσι, είναι πιθανό να χρειασθούν πολλές διαφορετικές ανεξάρτητες εκτελέσεις του μοντέλου για κάθε σύνολο παραμέτρων εισόδου που θα μελετηθεί. Για το λόγο αυτό, η προσομοίωση δεν είναι γενικά τόσο καλή μέθοδος για βελτιστοποίηση, όσο είναι για τη σύγκριση εναλλακτικών σχεδιαστικών λύσεων ενός συστήματος.

Τα μοντέλα προσομοίωσης ταξινομούνται βάση επιμέρους χαρακτηριστικών:

1. *Δυναμικά και Στατικά*: όταν παρατηρούνται ή όχι αλλαγές στις διαδικασίες του συστήματος με την πάροδο του χρόνου. Ένα *στατικό* μοντέλο προσομοίωσης, αναπαριστά ένα σύστημα σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή, ενώ ένα *δυναμικό* μοντέλο προσομοίωσης αναπαριστά ένα σύστημα, όπως αυτό εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου.
2. *Συνεχή και Διακριτά*: όταν τα παρατηρούμενα συστήματα μελετώνται σε συνεχή ή διακριτά χρονικά διαστήματα.
3. *Προσδιοριστικά και Στοχαστικά*: ανάλογα με τον τύπο των μεταβλητών που υπεισέρχονται στο πρόβλημα και των αναμεταξύ τους σχέσεων (αν περιλαμβάνουν ή όχι πιθανοτικά τμήματα). Για παράδειγμα, ένα πολύπλοκο σύστημα διαφορικών εξισώσεων που περιγράφει μία χημική αντίδραση, μπορεί να είναι προσδιοριστικό μοντέλο, ενώ τα περισσότερα υπολογιστικά συστήματα, που βασίζονται στα συστήματα αναμονής (**queueing systems**), χρησιμοποιούν στοχαστικά μοντέλα προσομοίωσης.
4. *Περιγραφικά και Εννοιολογικά*: όταν προσεγγίζουν ένα σύστημα με εμπειρικό τρόπο ή απλά μεταφράζουν τα φαινόμενα φυσικών διαδικασιών.
5. *Συγκεντρωτικά και Κατανεμημένα*: ανάλογα με την χωρική μεταβολή των παραμέτρων τους.

3.2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

3.2.1 ΑΓΩΓΗ

Ως αγωγή θερμότητας ορίζεται η μεταφορά της θερμικής ενέργειας από τα σωματίδια ενός μέσου που έχουν υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο προς τα γειτονικά με μικρότερο ενεργειακό περιεχόμενο ως αποτέλεσμα των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων. Η αγωγή μπορεί να λάβει χώρα στα στερεά, στα υγρά και στα αέρια αρκεί να μην υπάρχει κίνηση της μάζας στο υγρό ή στο αέριο. Ο ρυθμός αγωγής θερμότητας μέσα από ένα μέσο εξαρτάται από την γεωμετρία του μέσου, το πάχος και το υλικό του μέσου και από την διαφορά θερμοκρασίας στις δύο πλευρές του μέσου και δίδεται από την εξίσωση του **Fourier** (για μια διάσταση):

$$Q_{cond}=k/L\Delta T \quad (W)$$

k = θερμική αγωγιμότητα του υλικού (**thermal conductivity**) η οποία αποτελεί το μέτρο της ικανότητας ενός υλικού να άγει θερμότητα, $W m^{-1} K^{-1}$

A = η επιφάνεια μέσω της οποίας άγεται η θερμότητα, m^2

L = το πάχος του υλικού, m

ΔT = η διαφορά θερμοκρασίας στις πλευρές του υλικού, K

Ένα πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας είναι μονοδιάστατο αν η θερμοκρασία στο μέσο μεταβάλλεται μόνο προς μία διεύθυνση και επομένως η θερμότητα μεταφέρεται προς μία διεύθυνση, ενώ η μεταβολή της θερμοκρασίας και η μεταφορά θερμότητας στις άλλες διευθύνσεις είναι αμελητέες ή μηδενικές. Τα προβλήματα μεταφοράς θερμότητας χαρακτηρίζονται επίσης ως δισδιάστατα ή τρισδιάστατα ανάλογα με τα σχετικά μεγέθη των ρυθμών μεταφοράς θερμότητας σε διαφορετικές διευθύνσεις και με το βαθμό της επιθυμητής ακρίβειας. Η παραπάνω εξίσωση αναφέρεται σε μονοδιάστατη μεταφορά θερμότητα και δείχνει ότι η θερμότητα που άγεται αυξάνεται με την αύξηση της διαφοράς θερμοκρασίας και την θερμική αγωγιμότητα του υλικού, αλλά μειώνεται όσο το πάχος του υλικού αυξάνει. Αυτή η εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει την αγωγή θερμότητας μέσω των παραθύρων ενός κτηρίου ή μέσω του υλικού κάλυψης του θερμοκηπίου, γιατί η θερμοκρασιακή κατανομή είναι ουσιαστικά μίας διάστασης. Επίσης χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ροής θερμότητας στο έδαφος σε μεγάλα θερμοκήπια.

3.2.2 ΣΥΝΑΓΩΓΗ

Η συναγωγή αποτελεί τον μηχανισμό μετάδοσης θερμότητας μεταξύ μιας επιφάνειας και του ρευστού που την περιβάλλει. Η συναγωγή χαρακτηρίζεται είτε ως φυσική (ή ελεύθερη), είτε ως εξαναγκασμένη, ανάλογα με το πως προκλήθηκε η κίνηση του ρευστού. Στην εξαναγκασμένη συναγωγή, το ρευστό αναγκάζεται να κινηθεί σε μια επιφάνεια ή σε έναν σωλήνα με εξωτερικά μέσα, όπως μια αντλία ή έναν ανεμιστήρα.

Στην φυσική συναγωγή, η όποια κίνηση του ρευστού οφείλεται στο φαινόμενο της άνωσης που εκδηλώνεται ως άνοδος του θερμότερου ρευστού και κάθοδος του ψυχρότερου ρευστού.

Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή είναι πολύπλοκη επειδή περιλαμβάνει κίνηση ρευστού και αγωγή θερμότητας. Η κίνηση του ρευστού ενισχύει την μεταφορά θερμότητας εφόσον φέρνει σε επαφή το θερμότερο με το ψυχρότερο ρευστό, δημιουργώντας υψηλότερους ρυθμούς αγωγής σε μεγαλύτερο πλήθος σημείων σε ένα ρευστό. Επομένως ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας διαμέσου ενός ρευστού είναι πολύ υψηλότερος με την συναγωγή απ' ότι είναι με την αγωγή. Πράγματι όσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα του ρευστού, τόσο πιο υψηλός είναι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας που είναι ανάλογος με την διαφορά θερμοκρασίας και εκφράζεται με τον νόμο του Newton:

$$Q_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (W)$$

h = συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής, $W m^{-2} K^{-1}$

A = επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, m^2

T_s = θερμοκρασία της επιφάνειας, K

T_∞ = θερμοκρασία του ρευστού αρκετά μακριά από την επιφάνεια, K

Κρίνοντας από τις μονάδες ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής ή συντελεστής συναγωγής είναι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ μιας στερεάς επιφάνειας και ενός ρευστού ανά μονάδα εμβαδού και ανά μονάδα διαφοράς θερμοκρασίας. Ενώ η παραπάνω εξίσωση φαίνεται να είναι απλή ο συντελεστής συναγωγής είναι δύσκολο να προσδιοριστεί αναλυτικά γιατί εξαρτάται από την ταχύτητα ροής V , τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ρευστού (όπως το δυναμικό ιξώδες μ , την θερμική αγωγιμότητα k , την πυκνότητα ρ , και την ειδική θερμότητα C_p), την γεωμετρική διάταξη του συστήματος και το είδος της ροής (στρωτή ή τυρβώδης). Ο συντελεστής συναγωγής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα. Όσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα, τόσο υψηλότερος είναι ο συντελεστής συναγωγής. Οι ταχύτητες του ρευστού που σχετίζονται με την φυσική συναγωγή είναι χαμηλές, συνήθως κάτω από 1 ms^{-1} . Επομένως οι συντελεστές συναγωγής που συναντά κανείς στην φυσική συναγωγή είναι συνήθως πολύ χαμηλότεροι από εκείνους που συναντά κανείς στην εξαναγκασμένη.

3.2.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ

Τα διαφανή υλικά που χρησιμοποιούνται ως υλικό κάλυψης θερμοκηπίων, έχουν μικρό πάχος και συνεπώς μικρή μόνωση, με αποτέλεσμα, όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλή, η ροή θερμότητας προς τα έξω να είναι μεγάλη. Οι απώλειες αυτές θερμότητας γίνονται διαμέσου μίας σύνθετης αντίστασης συναγωγής-αγωγής-συναγωγής, και περιγράφονται συνοπτικά από τον τύπο:

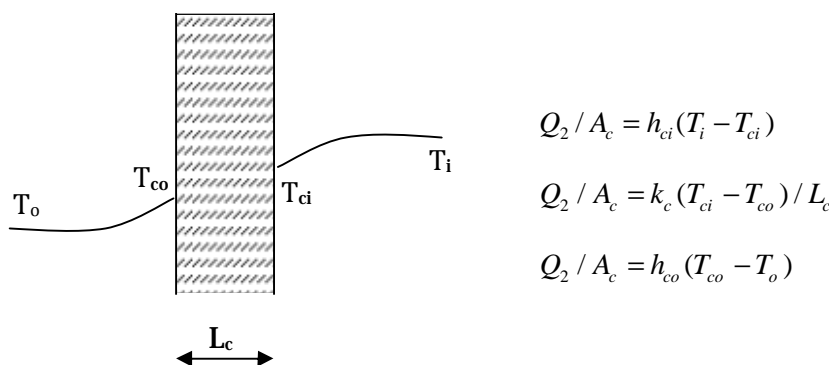
$$Q_c = UA_c(T_i - T_o) \quad (W)$$

A_c = επιφάνεια καλύμματος, m^2

$T_i - T_o$ = η διαφορά θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος, **K**

U = ολικός συντελεστή μετάδοσης θερμότητας του καλύμματος, **$W m^{-2} K^{-1}$**

Ανάλυση σε επιμέρους αντιστάσεις μπορεί να γίνει σύμφωνα με το σχήμα 3-1, όπου με T_{ci} , T_{co} συμβολίζονται αντίστοιχα οι θερμοκρασίες της εσωτερικής και της εξωτερικής επιφάνειας του καλύμματος, h_{ci} , h_{co} οι συντελεστές συναγωγής μεταξύ του εσωτερικού αέρα και του καλύμματος και μεταξύ του καλύμματος με τον εξωτερικό αέρα αντίστοιχα και k_c ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας που χαρακτηρίζει το υλικό του καλύμματος. Σε μόνιμες συνθήκες (και απουσία σημαντικής συνεισφοράς ακτινοβολίας) η ροή θερμότητας με συναγωγή από τον εσωτερικό αέρα προς την εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος ισούται με την ροή με αγωγή διαμέσου του καλύμματος και με την ροή με συναγωγή από την εξωτερική επιφάνεια του καλύμματος προς τον εξωτερικό αέρα. Συνεπώς, ισχύουν οι σχέσεις:



Σχήμα 3-1: Ανάλυση του καλύμματος του θερμοκηπίου σε επιμέρους αντιστάσεις

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις ώστε να απολειφτούν οι άγνωστες θερμοκρασίες των επιφανειών, λαμβάνουμε τη γνωστή σχέση για τον ολικό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας U συναρτήσει των επιμέρους θερμικών αντιστάσεων:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{ci}} + \frac{L_c}{k_c} + \frac{1}{h_{co}}$$

Για παράδειγμα, γυάλινο κάλυμμα με $k_c=0.78 W m^{-1} K^{-1}$ και πάχους **3 mm**, που ενδιαφέρει την παρούσα εργασία δίνει $U=5.83 W m^{-2} K^{-1}$, όπου χρησιμοποιούνται οι αντιπροσωπευτικές τιμές συντελεστών συναγωγής για εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους $h_{ci}=8.5 W m^{-2} K^{-1}$ και $h_{co}=20 W m^{-2} K^{-1}$ αντίστοιχα. Μεταξύ των άλλων, ο παραπάνω υπολογισμός δείχνει ότι στην περίπτωση απλού γυάλινου τοιχώματος η αντίσταση αγωγής είναι αμελητέα σε σύγκριση με τις αντιστάσεις συναγωγής. Συνεπώς, οι θερμοκρασίες εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας καλύμματος πρακτικά ταυτίζονται.

3.2.4 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

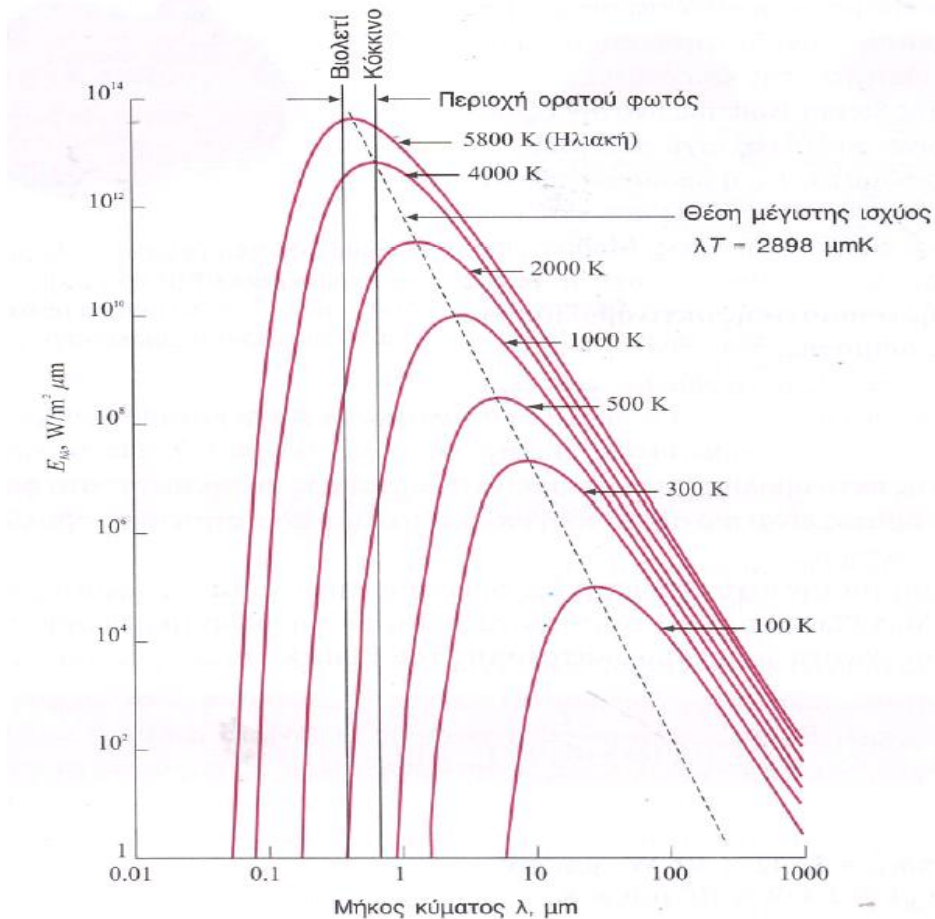
Η ακτινοβολία (**radiation**) είναι ο τρόπος διάδοσης με εκπομπή και απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος (θερμική ακτινοβολία). Με τον τρόπο αυτό μεταδίδεται θερμική ενέργεια χωρίς να απαιτείται η παρουσία κάποιου υλικού μέσου, δηλαδή στο κενό. Στην πράξη η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία είναι γρηγορότερη (στην ταχύτητα του φωτός) και δεν υφίσταται εξασθένηση στο κενό. Η θερμική ακτινοβολία εκπέμπεται συνεχώς από κάθε σώμα που βρίσκεται σε θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν προς όλες τις διευθύνσεις σε ένα μεγάλο εύρος τιμών μήκους κύματος. Η ποσότητα της ενέργειας που εκπέμπει με ακτινοβολία μια επιφάνεια σε συγκεκριμένο μήκος κύματος, εξαρτάται από το υλικό του σώματος την κατάσταση της επιφάνειας του και από την θερμοκρασία της επιφάνειας. Επομένως διάφορες επιφάνειες είναι δυνατόν να εκπέμπουν διαφορετικές ποσότητες ακτινοβολίας ανά μονάδα εμβαδού, ακόμα και όταν έχουν την ίδια θερμοκρασία.

Βασική είναι η έννοια του μέλανος σώματος. Ορίζεται ως ένα σώμα τέλει εκπομπής και απορρόφησης της ακτινοβολίας. Σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και μήκος κύματος, καμία επιφάνεια δεν μπορεί να εκπέμψει περισσότερη ενέργεια από ένα μέλαν σώμα. Ένα μέλαν σώμα απορροφά όλη την προσπίπτουσα ενέργεια, ανεξάρτητα από το μήκος κύματος και την διεύθυνση και εκπέμπει ενέργεια με ακτινοβολία προς όλες τις διευθύνσεις. Η ενέργεια ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα εμβαδού δίνεται από την σχέση των **Stefan-Boltzmann**

$$E_b = \sigma T^4 \quad (W m^{-2})$$

όπου **E_b** είναι η ισχύς εκπομπής του μέλανος σώματος, η οποία αποτελεί το άθροισμα της ακτινοβολίας που εκπέμπεται σε όλα τα μήκη κύματος, σ η σταθερά **Stefan-Boltzmann** και T η απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας σε Κ. Αρκετές φορές ενδιαφέρει η ισχύς εκπομπής φασματικής ακτινοβολίας του μέλανος σώματος, που είναι η ποσότητα της ενέργειας της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα σε απόλυτη θερμοκρασία T ανά μονάδα χρόνου, ανά μονάδα εμβαδού και ανά μονάδα μήκους κύματος στο μήκος κύματος λ . Η ισχύς εκπομπής **E_{bλ}** του φασματικού μέλανος σώματος εκφράζεται από τον παρακάτω νόμο κατανομής του **Plank** και παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα 3-2 για επιλεγμένες θερμοκρασίες:

$$E_{b\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]} \quad (W m^{-2} mm^{-1})$$



Σχήμα 3-2: Μεταβολή της ισχύος εκπεμπόμενης ακτινοβολίας του μέλανος σώματος, σε σχέση με το μήκος κύματος για συγκεκριμένες θερμοκρασίες (Cengel, 2005)

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από μια πραγματική επιφάνεια είναι πάντοτε μικρότερη από εκείνη που εκπέμπει το μέλαν σώμα. Κατά συνέπεια, η εκπομπή του μέλανος σώματος θεωρείται ως περίπτωση αναφοράς και χρησιμεύει ως πρότυπο για την σύγκριση των ιδιοτήτων της ακτινοβολίας των πραγματικών επιφανειών. Η ικανότητα εκπομπής μιας επιφάνειας ή συντελεστής εκπομπής, ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που εκπέμπει η επιφάνεια αυτή προς την ενέργεια που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία. Ο συντελεστής εκπομπής συμβολίζεται με ϵ , και κυμαίνεται μεταξύ μηδενός και μονάδας, $0 \leq \epsilon \leq 1$. Ο συντελεστής εκπομπής, αποτελεί μέτρο του κατά πόσο μια επιφάνεια προσεγγίζει την συμπεριφορά ενός μέλανος σώματος, για το οποίο $\epsilon = 1$. Στον πίνακα 3-1 παρουσιάζονται τυπικές τιμές ικανότητας εκπομπής για διάφορα υλικά

Πίνακας 3-1: Τυπικές τιμές ικανότητας εκπομπής για διάφορα υλικά (Cengel, 2005)

Υλικό	Ικανότητα εκπομπής (ε)	Θερμοκρασία (Κ)
Χαρτί, λευκό	0.90	300
Γύψος, λευκός	0.93	300
Άμμος	0.90	300
Ανθρώπινο δέρμα	0.95	300
Χιόνι	0.80-0.90	273
Χώμα, έδαφος,	0.93-0.96	300
Νερό	0.95-0.96	273-373
Γυαλί	0.90-0.95	300
Κεραμικό υλικό	0.85-0.57	300-1500
Τοιχοποιία	0.80	300
Ξύλο	0.82-0.90	300
Στεγνή επιφάνεια	0.85	300
Υγρή επιφάνεια	0.91	300
Αλουμίνιο στιλβωμένο	0.04-0.06	300-900
Αλουμίνιο οξειδωμένο	0.2-0.3	400-800

3.3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

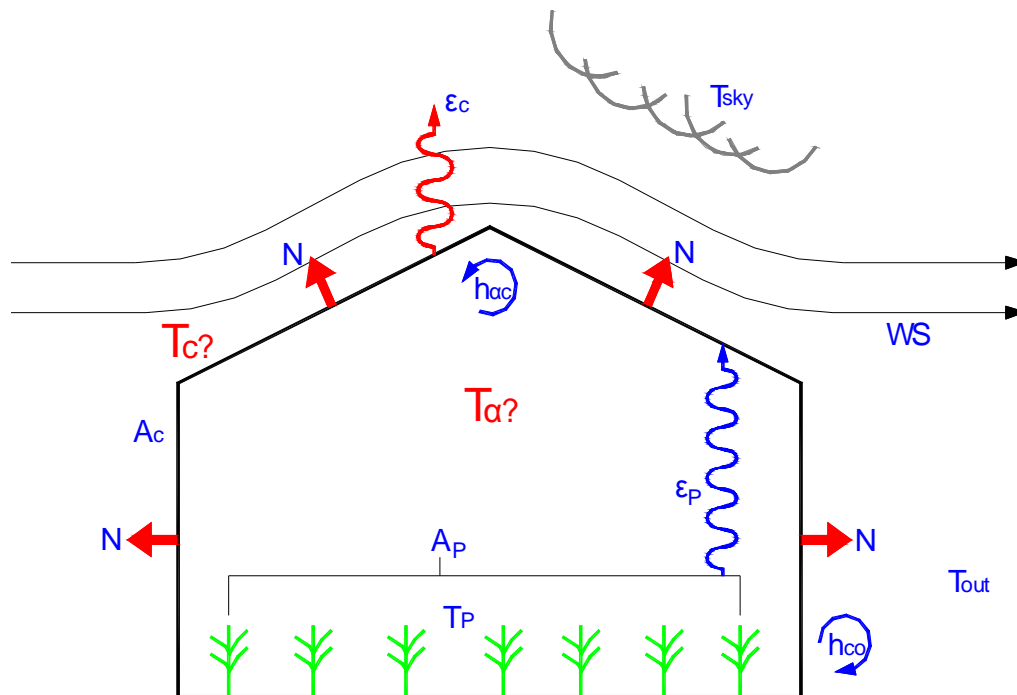
Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα γενικευμένο θερμικό μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου του θερμοκηπίου, το οποίο ενσωματώνει επαρκώς όλα τα ουσιαστικά θερμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια της θέρμανσης και παρουσία καλλιέργειας. Το μοντέλο αποτελείται από ένα σετ μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων που αναπτύσσονται για δύο όγκους ελέγχου, τον εσωτερικό αέρα και το κάλυμμα του θερμοκηπίου. Οι εξισώσεις περιγράφουν τις ανταλλαγές ενέργειας που συμβαίνουν στους δύο όγκους ελέγχου και υπολογίζουν την θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα και του καλύμματος του θερμοκηπίου ως συνάρτηση των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν στη περιοχή και των χαρακτηριστικών (γεωμετρικά και λειτουργικά) του θερμοκηπίου.

Αν και οι εξισώσεις του μοντέλου περιγράφουν αυστηρά τα θερμικά φαινόμενα υπό μόνιμες συνθήκες, το θερμικό μοντέλο χαρακτηρίζεται δυναμικό καθώς η χρονική

μεταβολή εισάγεται στις αλλαγές των εξωτερικών κλιματολογικών παραμέτρων (εξωτερική θερμοκρασία, ταχύτητα πνέοντος ανέμου θερμοκρασία ουρανού). Το είδος αυτό μοντέλου με εξισώσεις μόνιμων συνθηκών και μεταβλητές συνοριακές συνθήκες χαρακτηρίζεται ως ψευδομόνιμο (**pseudosteady**). Η παραδοχή ψευδομόνιμων συνθηκών είναι επιτρεπτή διότι ο ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλονται οι εξωτερικές συνθήκες είναι πολύ πιο αργός από την απόκριση των συνιστωσών άμεσου ενδιαφέροντος του θερμοκηπίου (εσωτερικός αέρας και κάλυμμα θερμοκηπίου). Το μοντέλο είναι επίσης μονοδιάστατο για να αποφεύγονται εκτεταμένοι υπολογισμοί. Σημαντικές παραδοχές που έγιναν για την κατάστρωση του μοντέλου είναι: **(i)** το κάλυμμα είναι ισοθερμοκρασιακό λόγω υψηλής αγωγιμότητας και πολύ μικρού πάχους (**3mm**) και θεωρείται μία ενιαία θερμοκρασία καλύμματος T_c παρά την χωρική μεταβολή των θερμοκρασιών πάνω στο κάλυμμα και **(ii)** παρά την στρωματοποίηση της θερμοκρασίας ιδίως στην περίπτωση της συμβατικής θέρμανσης χωρίς ανακυκλοφορία, η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα αποδίδεται με μια τιμή αναφοράς T_a που μετριέται στο κέντρο του θερμοκηπίου και σε ύψος **1.20 m** από το έδαφος και **0.30 m** από την οροφή του θερμοκηπίου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω τα εισαγόμενα στο μοντέλο είναι (σχήμα 3-3):

- Οι εξωτερικές κλιματολογικές συνθήκες: η θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος T_o , η ταχύτητα ανέμου WS και η θερμοκρασία ουρανού T_{sky} , καθώς και η επιθυμητή θερμοκρασία φυτών T_p μέσα στο θερμοκήπιο.
- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θερμοκηπίου: η επιφάνεια εδάφους A_p που θεωρείται ότι είναι πλήρως καλυμμένη με φυτά, η επιφάνεια καλύμματος A_c , και ο όγκος του θερμοκηπίου, V .
- Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του θερμοκηπίου: ο αριθμός των εναλλαγών του αέρα ανά ώρα N , ο μέσος βαθμός εκπομπής του καλύμματος ϵ_c και των φυτών ϵ_p και οι συντελεστές συναγωγής μεταξύ του εσωτερικού αέρα και του καλύμματος h_{ac} , μεταξύ του εσωτερικού αέρα και των φυτών h_{ap} και μεταξύ του εξωτερικού αέρα και του καλύμματος h_{co} . Οι παραπάνω συντελεστές διατίθενται από τυπικές τιμές της βιβλιογραφίας, από εμπειρικές σχέσεις και συσχετισμούς. Τα εξερχόμενα από το μοντέλο είναι οι άγνωστες θερμοκρασίες του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου T_a και η θερμοκρασία του καλύμματος T_c .



Σχήμα 3-3: Μεταβλητές που υπεισέρχονται στο μοντέλο προσομοίωσης. Τα μπλε σύμβολα αντιστοιχούν στις εισερχόμενες γνωστές μεταβλητές και τα κόκκινα (με το ερωτηματικό) στις εξερχόμενες άγνωστες μεταβλητές του μοντέλου.

Ο βασικός στόχος της ανάπτυξης του μοντέλου, είναι να καθορίζονται με ικανοποιητική ακρίβεια οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την θερμική συμπεριφορά του θερμοκηπίου δηλ. η θερμοκρασία εσωτερικού αέρα και καλύμματος κάτω από ένα σύνολο λειτουργικών συνθηκών. Έτσι θα υπάρχει αξιόπιστη πρόβλεψη του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου και σαφής εκτίμηση των ενεργειακών αναγκών του και του εξοικονομούμενου ενεργειακού οφέλους ανάλογα με την τεχνική θέρμανσης που εφαρμόζεται. Ειδικότερα, οι ενεργειακές ανάγκες επιμερίζονται για διάφορες κατηγορίες θερμικών απωλειών και εκτιμώνται ανά τεχνική θέρμανσης και καλλιέργειας. Το μοντέλο εκτιμά επίσης την απόδοση των συστημάτων θέρμανσης που εφαρμόζονται στο θερμοκήπιο.

Επειδή η ροϊκή και η θερμική ομοιότητα θερμοκηπίων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, πέρα από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, η ποιότητα του μοντέλου προσομοίωσης είναι σημαντική για την μεταφορά των πειραματικών αποτελεσμάτων σε πραγματικό θερμοκήπιο παραγωγής. Η ποιότητα του μοντέλου πιστοποιείται από την σύγκριση της βάσης πειραματικών δεδομένων, η οποία αποτελεί τον πυρήνα όλης της έρευνας με τα θεωρητικά αποτελέσματα του μοντέλου στο κεφάλαιο 5. Επίσης το μοντέλο χρησιμοποιείται σε παραμετρικές μελέτες της επίδρασης των κλιματολογικών παραγόντων και άλλων σεναρίων (ενότητα 3.6) πάνω στις ενεργειακές απώλειες που σχετίζονται με κάθε μέθοδο θέρμανσης.

3.3.1 ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Στην περίπτωση θέρμανσης του θερμοκηπίου με συμβατικό σύστημα θέρμανσης, (σύστημα θερμού αέρα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας με ή χωρίς παρουσία ανεμιστήρα) η ενέργεια προσφέρεται πρωταρχικά στον αέρα του θερμοκηπίου. Στο εσωτερικό του θερμοκηπίου επικρατεί ισοθερμοκρασιακό κλίμα, η διατήρηση του οποίου είναι απαραίτητη σε όλο το θερμοκήπιο για δύο λόγους: **(i)** για να καλύπτονται όλες οι ενεργειακές απώλειες που λαμβάνουν χώρα στο θερμοκήπιο και **(ii)** για να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες των φυτών τα οποία λαμβάνουν μέσω συναγωγής ένα ποσοστό από την θερμική ενέργεια που προσφέρεται στον αέρα του θερμοκηπίου. Σε θερμοκήπια που δεν υπάρχει ανακυκλοφορία του θερμού αέρα αναπτύσσεται σημαντική στρωμάτωση της θερμοκρασίας και η μέση θερμοκρασία του αέρα είναι αρκετά υψηλότερη από αυτήν των φυτών ($T_a > T_p$). Αντιθέτως με την παρουσία ανεμιστήρα επιτυγχάνεται πλήρης ανάμιξη του θερμού αέρα και σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Επειδή για το μοντέλο θεωρείται η δεύτερη περίπτωση, υιοθετείται η παραδοχή ότι η θερμοκρασία του αέρα είναι ίδια με αυτήν των φυτών ($T_a = T_p$). Με αυτό τον τύπο θέρμανσης αναμένονται τα εξής:

- Δημιουργία ισοθερμοκρασιακού κλίματος σε ολόκληρο το θερμοκήπιο (όλον κλίμα)
- Η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα και των φυτών είναι σχεδόν ίδια ($T_a \approx T_p$) κατά την αποκατάσταση σταθερών συνθηκών. Στην πράξη ο εσωτερικός αέρας του θερμοκηπίου είναι ελαφρά πιο θερμός σε σχέση με τα φυτά
- Η θερμοκρασία καλύμματος του θερμοκηπίου T_c είναι άγνωστη
- Οι συνολικές ενεργειακές απώλειες είναι συνήθως αρκετά υψηλές

Η άγνωστη θερμοκρασία του καλύμματος T_c υπολογίζεται δημιουργώντας ένα ενεργειακό ισοζύγιο με όγκο ελέγχου το κάλυμμα (σχήμα 3-4), που κερδίζει θερμότητα με συναγωγή από τον εσωτερικό αέρα του θερμοκηπίου και με ακτινοβολία από τον φυτικό θόλο και χάνει θερμότητα με συναγωγή προς τον εξωτερικό αέρα του θερμοκηπίου και με ακτινοβολία προς τον ουρανό. Το ισοζύγιο αυτών των όρων κάτω από σταθερές συνθήκες οδηγεί στην παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{S(T_p^4 - T_c^4)}{\frac{1 - e_p}{A_p e_p} + \frac{1}{A_p F_{p \rightarrow c}} + \frac{1 - e_c}{A_c e_c}} + A_c h_{ac} (T_a - T_c) - e_c A_c S(T_c^4 - T_{sky}^4) - h_{co} A_c (T_c - T_o) = 0 \quad (1a)$$

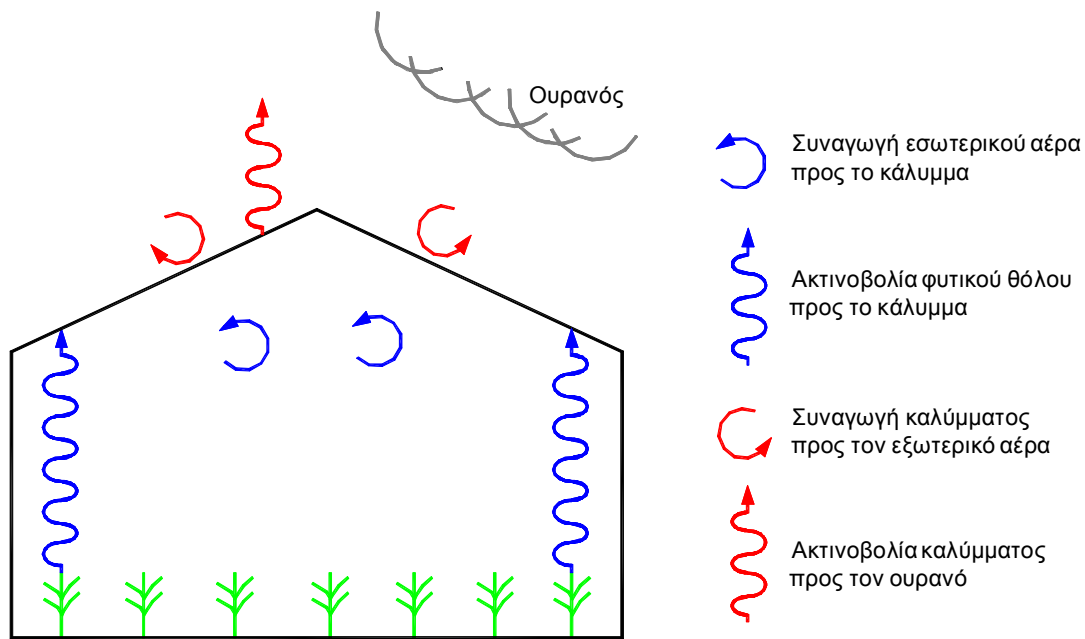
Το ισοζύγιο ακτινοβολίας στην εξίσωση (1a) βασίζεται στο γενικό αποτέλεσμα για την ανταλλαγή ακτινοβολίας μεταξύ δύο γκρίζων επιφανειών οι οποίες σχηματίζουν ένα κλειστό κέλυφος και στην γενική αναδρομική ιδιότητα $A_1 F_{1-2} = A_2 F_{2-1}$. Η μοναδική προϋπόθεση είναι ότι μία από τις επιφάνειες, στην συγκεκριμένη περίπτωση η επιφάνεια του φυτικού θόλου, είναι επίπεδη. Μια φυτική επιφάνεια καλλιέργειας μαρουλιού προσεγγίζεται ικανοποιητικά από μια επίπεδη επιφάνεια, ωστόσο για μια επιφάνεια φυτικού θόλου που προεξέχει αρκετά από το έδαφος αυτή η προσέγγιση είναι πολύ απλουστευμένη. Επομένως παρουσιάζεται πρώτα το γενικό αποτέλεσμα και στην συνέχεια διατυπώνεται σαφώς η παραδοχή πάνω στην οποία βασίζεται η τελική εξίσωση καθώς και η απαραίτητη τροποποίηση για μια περισσότερο μη ομοιόμορφη

επιφάνεια φυτικού θόλου. Επίσης παραλείπεται ο όρος «έδαφος» και αναφέρεται πάντα η επιφάνεια φυτικού θόλου.

Έτσι στην παραπάνω εξίσωση ο πρώτος όρος αντιστοιχεί στην ανταλλαγή ακτινοβολίας μεταξύ του φυτικού θόλου και του καλύμματος, τα οποία αντιμετωπίζονται ως δύο γκρίζες επιφάνειες που σχηματίζουν ένα κλειστό κέλυφος (το κάλυμμα περιβάλλει τον φυτικό θόλο). Στην παρούσα εργασία και για την πειραματική καλλιέργεια που καταλαμβάνει όλη την έκταση του θερμοκηπίου, η εξίσωση (1α) απλοποιείται υιοθετώντας την παραδοχή ότι η επιφάνεια του φυτικού θόλου είναι επίπεδη και συνεπώς ο συντελεστής όψεως $F_{p \rightarrow c}$ είναι ίσος με την μονάδα. Με αυτήν την απλοποίηση η εξίσωση (1α), γίνεται

$$\frac{se_p A_p (T_p^4 - T_c^4)}{1 + (1 - e_c) (A_p e_p / A_c e_c)} + A_c h_{ac} (T_a - T_c) - e_c A_c S (T_c^4 - T_{sky}^4) - h_{to} A_c (T_c - T_o) = 0 \quad (1b)$$

Όλα τα αποτελέσματα στην παρούσα εργασία είναι βασισμένα πάνω στην εξίσωση (1b), αλλά το μοντέλο μπορεί να ανταποκριθεί και σε περιπτώσεις φυτικού θόλου με διαφορετική γεωμετρία χρησιμοποιώντας στην εξίσωση (1α) τον κατάλληλο συντελεστή όψεως.



Σχήμα 3-4: Ενεργειακό ισοζύγιο καλύμματος θερμοκηπίου. Τα μπλε σύμβολα αντιστοιχούν στην προστιθέμενη ενέργεια και τα κόκκινα στην ενέργεια που χάνεται.

3.3.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (NIR)

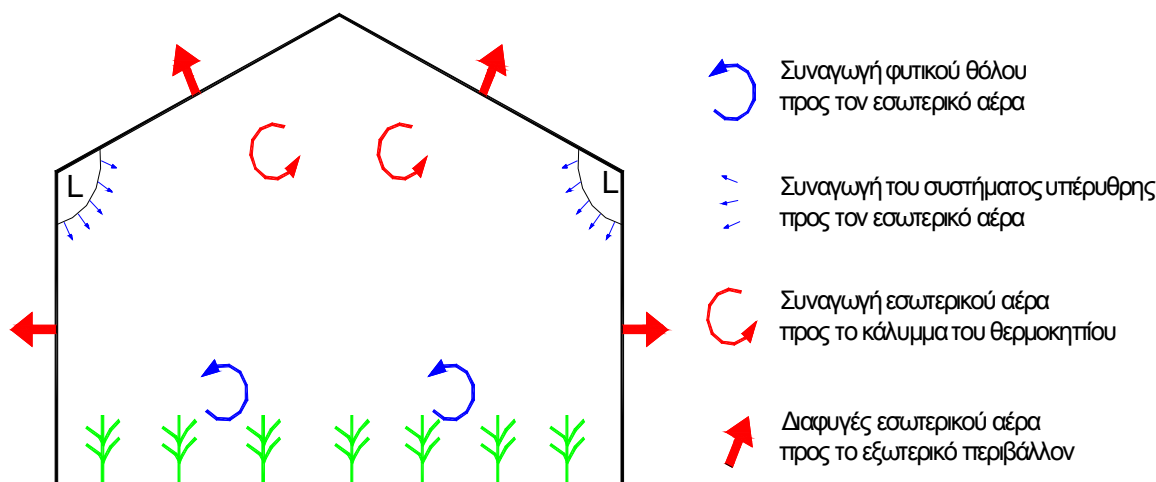
Στην περίπτωση θέρμανσης του θερμοκηπίου με υπέρυθρη ακτινοβολία η ενέργεια προσφέρεται απευθείας στα φυτά, τα οποία και διατηρούνται σε υψηλότερη θερμοκρασία από τον περιβάλλοντα χώρο τους. Μέρος της προσφερόμενης στα φυτά ενέργειας χάνεται μέσω συναγωγής στον εσωτερικό αέρα του θερμοκηπίου και μέσω ακτινοβολίας προς το κάλυμμα. Η πηγή **IR** θα πρέπει να αναπληρώνει αυτές τις απώλειες των φυτών με συναγωγή προς τον αέρα και με ακτινοβολία προς το κάλυμμα. Με αυτόν τον τύπο θέρμανσης δεν υπάρχει ομοιόμορφη θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου ($T_a \neq T_p$) και αναμένονται τα εξής:

- Δημιουργία ισοθερμοκρασιακού κλίματος στην περιοχή του φυτικού θόλου (τοπικό κλίμα)
- Σαφής διαφοροποίηση μεταξύ της θερμοκρασίας των φυτών, T_p και των θερμοκρασιών αέρα T_a και καλύμματος, T_c
- Η θερμοκρασίες αέρα και καλύμματος είναι άγνωστες, και αναμένεται να είναι χαμηλότερες από τη θερμοκρασία των φυτών
- Οι συνολικές ενεργειακές απώλειες αναμένεται να μειωθούν σημαντικά σε σχέση με το συμβατικό σύστημα θέρμανσης.

Η άγνωστη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα T_a υπολογίζεται δημιουργώντας ένα δεύτερο ενεργειακό ισοζύγιο με όγκο ελέγχου τον αέρα του θερμοκηπίου (σχήμα 3-5). Σε αυτό το ενεργειακό ισοζύγιο ο αέρας ανταλλάσει ενέργεια με συναγωγή με τον φυτικό θόλο και με την εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος και επίσης ανταλλάσσει ενέργεια με το εξωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου από ανταλλαγές του αέρα λόγω διαφυγών. Ένας προστιθέμενος ενεργειακός όρος που είναι ιδιαίτερης σημασίας στο συγκεκριμένο ισοζύγιο, είναι οι ενεργειακές απώλειες λόγω συναγωγής από το σύστημα υπέρυθρης ακτινοβολίας στον αέρα του θερμοκηπίου, οι οποίες υπολογίζονται με όρους των συνολικών απωλειών του θερμοκηπίου Q_{total} και του συντελεστή απόδοσης υπέρυθρης ακτινοβολίας η και εκφράζονται από την εξίσωση $Q_{lamps,conv.} = (1-\eta)Q_{total}$. Στο επόμενο κεφάλαιο 4, καθορίζεται ο συντελεστής απόδοσης του συστήματος υπέρυθρης ακτινοβολίας με βάση την θερμοκρασιακή κατανομή στο επίπεδο του φυτικού θόλου. Επίσης κάποιες θερμικές απώλειες ακτινοβολίας από τους ανακλαστήρες του συστήματος υπέρυθρης ακτινοβολίας προς το κάλυμμα του θερμοκηπίου εκτιμάται ότι είναι πολύ μικρές και στο παρόν μοντέλο αγνοούνται. Το ισοζύγιο των παραπάνω συνεισφορών εκφράζεται υπό σταθερές συνθήκες από την παρακάτω εξίσωση :

$$A_p h_{ap} (T_p - T_a) - A_c h_{ac} (T_a - T_c) - 0.36 NV (T_a - T_o) + Q_{lamps,conv} = 0 \quad (2)$$

Η άγνωστη θερμοκρασία του καλύμματος T_c υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1b) που αναπτύχθηκε στην περίπτωση της συμβατικής θέρμανσης με το κάλυμμα ως όγκο ελέγχου.



Σχήμα 3-5: Ενεργειακό ισοζύγιο εσωτερικού αέρα θερμοκηπίου. Τα μπλε σύμβολα αντιστοιχούν στην προστιθέμενη ενέργεια και τα κόκκινα στην ενέργεια που χάνεται.

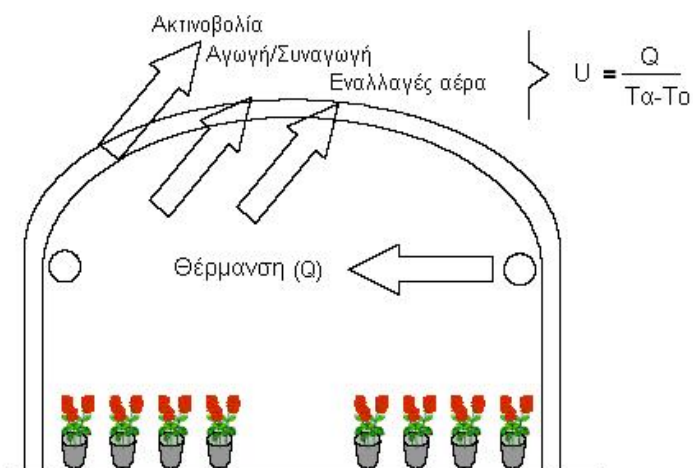
Συνοψίζοντας τα παραπάνω, στην περίπτωση της συμβατικής θέρμανσης ισχύει η παραδοχή ότι η θερμοκρασία των φυτών είναι ίδια με αυτήν του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου $T_a = T_p$ και η άγνωστη θερμοκρασία του καλύμματος T_c υπολογίζεται λύνοντας την εξίσωση (1b). Στην περίπτωση της υπέρυθρης θέρμανσης που ισχύει $T_a \neq T_p$ οι άγνωστες θερμοκρασίες αέρα T_a και καλύμματος T_c υπολογίζονται λύνοντας το σύστημα εξισώσεων (1b) και (2). Οι εξισώσεις αυτές είναι μη γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις που αντιμετωπίζονται με τυπικές αριθμητικές μεθόδους και για την συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν NAG ρουτίνες που περιλαμβάνονται στο λογισμικό Matlab.

3.3.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ

Στο θερμοκήπιο, όπως προαναφέρθηκε, η ροή θερμότητας μέσω του καλύμματος με όρους απωλειών θερμότητας συμβαίνει όταν η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου υπερβαίνει την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το ποσοστό των θερμικών απωλειών εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα και τις ιδιότητες ακτινοβολίας του υλικού κάλυψης, τις θερμοκρασίες στο εσωτερικό και εξωτερικό του καλύμματος και την ταχύτητα του αέρα μέσα και έξω από το θερμοκήπιο. Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή από το κάλυμμα του θερμοκηπίου είναι ο σημαντικότερος μηχανισμός ενεργειακών απωλειών του θερμοκηπίου και οι απώλειες με συναγωγή κυριαρχούν σε σχέση με τις απώλειες λόγω αγωγής και ακτινοβολίας. Για τα ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων, η ενεργειακή κατανάλωση του θερμοκηπίου στην βιβλιογραφία, χαρακτηρίζεται συνήθως από έναν ολικό συντελεστή ενεργειακών απωλειών ή ολικό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας U ($W m^{-2}K^{-1}$, σε σχέση με την επιφάνεια καλύμματος) ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο της μέσης εισερχόμενης θερμότητας και της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου αντίστοιχα (Bakker 1995), (σχήμα 3-6).

Σε αυτόν τον ολικό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας U , εκφράζονται μαζί οι ενεργειακές απώλειες λόγω αγωγής/συναγωγής (εσωτερικά και εξωτερικά του

καλύμματος) και ακτινοβολίας του καλύμματος και οι απώλειες λόγω διαφυγών εξαιτίας των κατασκευαστικών ατελειών του θερμοκηπίου ή εξαερισμού (Perdigones et al, 2006; Abdel-Ghany& Kozai, 2006). Ο ολικός συντελεστής απωλειών δίνεται συνήθως ως συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου που μετράται σε συγκεκριμένο ύψος αναφοράς έξω από το θερμοκήπιο και έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για να καθορισθεί. Στην βιβλιογραφία δίδονται διάφορες τιμές για τον ολικό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας των θερμοκηπιακών υλικών κάλυψης (Kittas, 1994, Zhang et al, 1996; Feuilleley & Issanchou, 1996; Papadakis et al, 2000; Spanomitsios, 2001; Swinkels et al, 2001; Abdel-Ghany&Kozai, 2006). Αυτές οι τιμές έχουν προκύψει από προσομοιώσεις με θεωρητικά μοντέλα και /ή από πειράματα που διεξάγονται σε θερμοκήπια. Εντούτοις επειδή η τιμή του U εξαρτάται από τις εξωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος και από τις ιδιότητες θερμικής ακτινοβολίας των υλικών κάλυψης παρουσιάζεται μεγάλη απόκλιση των τιμών του στην βιβλιογραφία. Για απλό γυάλινο κάλυμμα πάχους 3 ή 4mm οι τιμές του U ($Wm^{-2}K^{-1}$) που δίνονται είναι: 5.2 (Spanomitsios, 2001), 5.8 (Swinkels et al, 2001), 6.1-6.7 όταν πρόκειται για στεγνό υαλοπίνακα και 6.7-7.6 όταν πρόκειται για υγρό υαλοπίνακα (Feuilleley & Issanchou, 1996). Για απλό κάλυμμα πολυαιθυλενίου (PE) πάχους 0.2 mm οι τιμές του U που δίνονται είναι: 6.8-7.14 (NGMA, 1998), 10-12.1 όταν πρόκειται για στεγνό film και 8.5-9.0 όταν πρόκειται για υγρό film (Feuilleley & Issanchou, 1996).



Σχήμα 3-6: Συνολικές ενεργειακές απώλειες θερμότητας που εκφράζονται με τον ολικό συντελεστή απωλειών U , ανάλογες με την διαφορά θερμοκρασίας $T_a - T_o$ (Perdigones et al, 2006).

Αντιθέτως πολύ λίγες προσπάθειες έχουν γίνει για να καθοριστούν οι καθαροί συντελεστές συναγωγής στο εσωτερικό και εξωτερικό κάλυμμα του θερμοκηπίου. Αυτές οι έρευνες έχουν δώσει διάφορες εμπειρικές εξισώσεις για υπολογισμό των συντελεστών συναγωγής ως συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου και/ή της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του καλύμματος θερμοκηπίου και της θερμοκρασίας αέρα. Ενδεικτικά αναφέρονται οι κάτωθι εμπειρικές σχέσεις:

Οι Garzoli & Blackwell (1981) από πειράματα σε θερμοκήπιο τύπου tunnel με κάλυμμα πολυαιθυλενίου (PE) πρότειναν για τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής h_{co} μεταξύ του εξωτερικού καλύμματος του θερμοκηπίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος την σχέση $h_{co} = 7.2 + 3.84u$, όπου u είναι η ταχύτητα του ανέμου σε $m s^{-1}$ και ο h_{co} αποδίδεται σε $W m^{-2}K^{-1}$. Για τον συντελεστή συναγωγής μεταξύ

εσωτερικού αέρα και εσωτερικού καλύμματος πρότειναν μια μέση τιμή $h_{ac} = 7.2 W m^{-2}K^{-1} (T_a > T_c)$.

Ο **Bot (1983)** από πειράματα σε θερμοκήπιο τύπου **Venlo** για τον συντελεστή συναγωγής εξωτερικά του καλύμματος, h_{co} πρότεινε την σχέση $h_{co} = 2.8 + 1.2u$ ($u \leq 4 m s^{-1}$). Για τις μονάδες ισχύουν τα ίδια όπως στην προηγούμενη παράγραφο.

Ο **Kittas (1986 & 1994)** από πειράματα σε θερμοκήπιο **tunnel** με κάλυμμα **PVC** για τον συντελεστή συναγωγής h_{co} εξωτερικά του καλύμματος πρότεινε την σχέση $h_{co} = 1.22(T_c - T_o) + 3.12u^{0.8}$ και για τον συντελεστή συναγωγής μεταξύ εσωτερικού καλύμματος και εσωτερικού αέρα την σχέση $h_{ac} = 4.3(T_a - T_c)^{0.25}$. Η ταχύτητα του ανέμου είναι σε $m s^{-1}$, η θερμοκρασία σε $^{\circ}C$ και ο h_{co} σε $W m^{-2}K^{-1}$. Οι σχέσεις αυτές ισχύουν για τις συνθήκες:

$$0.5 \leq T_c - T_o \leq 9.45 \quad 2.1 \leq T_i - T_c \leq 8.4 \quad -14.1 \leq T_{sky} \leq 4.9 \quad \text{και} \quad 0 \leq u \leq 6.7$$

Ο υπολογισμός των συντελεστών συναγωγής με τις παραπάνω εμπειρικές σχέσεις μπορεί να διαφέρει έως και **100%** για τις ίδιες ταχύτητες ανέμου και θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ καλύμματος και περιβάλλοντος. Αυτό οφείλεται αφενός στην διαφορετική γεωμετρία των θερμοκηπίων που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα αλλά κυρίως στο γεγονός ότι καμία από τις παραπάνω σχέσεις δεν λαμβάνει υπόψη της την διαφορετική φύση της συναγωγής που συμβαίνει στην επιφάνεια του καλύμματος.

Οι **Papadakis et al (1992)** από πειράματα σε ένα δίρρικτο και αμφικλινές πειραματικό θερμοκήπιο με κάλυμμα **PE**, ανέπτυξαν εμπειρικές σχέσεις για τους συντελεστές συναγωγής h_{ac} και h_{co} εσωτερικά και εξωτερικά του καλύμματος του θερμοκηπίου αντίστοιχα, ως συναρτήσεις της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ της θερμοκρασίας του καλύμματος και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος (εσωτερικό και εξωτερικό) καθώς και της ταχύτητας του αέρα εκτός και εντός του θερμοκηπίου. Το σημαντικότερο όμως είναι ότι διερευνήθηκε η φύση της συναγωγής που συμβαίνει εντός και εκτός του καλύμματος του θερμοκηπίου και δόθηκαν κριτήρια για το πότε λαμβάνει χώρα φυσική, εξαναγκασμένη ή μικτή συναγωγή. Χρησιμοποιώντας τα κριτήρια $Gr/Re^{5/3} = 200$ και $Re^{2.4}/Gr = 200$ οι περιοχές της καθαρά φυσικής, μικτής και εξαναγκασμένης συναγωγής διαχωρίστηκαν ως συναρτήσεις της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ καλύμματος και περιβάλλοντος και της ταχύτητας του ανέμου. Από το πρώτο κριτήριο, δόθηκε η εξίσωση $\Delta T = 40u^{5/3}$ που αντιπροσωπεύει την γραμμή A (σχήμα 3-7), η οποία διαχωρίζει την καθαρά φυσική από την μικτή συναγωγή. Από το δεύτερο κριτήριο, δόθηκε η επόμενη εξίσωση $40u^{5/3} = 4.9\Delta T$ που αντιπροσωπεύει την γραμμή B (σχήμα 3-7), η οποία διαχωρίζει την καθαρά εξαναγκασμένη από την μικτή συναγωγή.

Οι μετρούμενες από τα πειράματα διαφορές θερμοκρασίας και ταχύτητες ανέμου δείχνονται επίσης στο ίδιο σχήμα. Πιο συγκεκριμένα, εξωτερικά του καλύμματος του θερμοκηπίου η φύση της συναγωγής εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα του ανέμου και κατά δεύτερον από την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ καλύμματος και εξωτερικού περιβάλλοντος. Παρατηρείται, ότι όσο μεγαλύτερες διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ καλύμματος και εξωτερικού περιβάλλοντος καταγράφονται τόσο υψηλότερες ταχύτητες ανέμου απαιτούνται και για να συμβαίνει καθαρά εξαναγκασμένη συναγωγή. Καθαρά φυσική συναγωγή λαμβάνει χώρα όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι χαμηλή ανεξάρτητα από την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ καλύμματος και εξωτερικού περιβάλλοντος. Στις περισσότερες όμως των περιπτώσεων -όπως φαίνεται καθαρά στο ίδιο σχήμα - η μικτή συναγωγή είναι ο μηχανισμός που

επικρατεί εξωτερικά του καλύμματος και έτσι είναι πολύ δύσκολο να δοθεί μια απλή σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής στο εξωτερικό του καλύμματος του θερμοκηπίου. Αυτό το γεγονός, σε συνδυασμό με τις διαφορετικές γεωμετρίες των διαφόρων τύπων θερμοκηπίων, εξηγεί τις διαφορετικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συγκεκριμένου συντελεστή συναγωγής. Συνεπώς, επειδή καμία γενική εξίσωση δεν μπορεί να εξαχθεί που να εφαρμόζεται σε κάθε γεωμετρία θερμοκηπίου, ο συντελεστής συναγωγής στο εξωτερικό του καλύμματος πρέπει να καθορίζεται από επιτόπου πειράματα πάνω σε συγκεκριμένο τύπο θερμοκηπίου. Παρά ταύτα οι ερευνητές καθόρισαν και την δική τους εμπειρική σχέση που προσεγγίζει με επαρκή ακρίβεια τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής στο εξωτερικό του καλύμματος λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω και είναι η ακόλουθη:

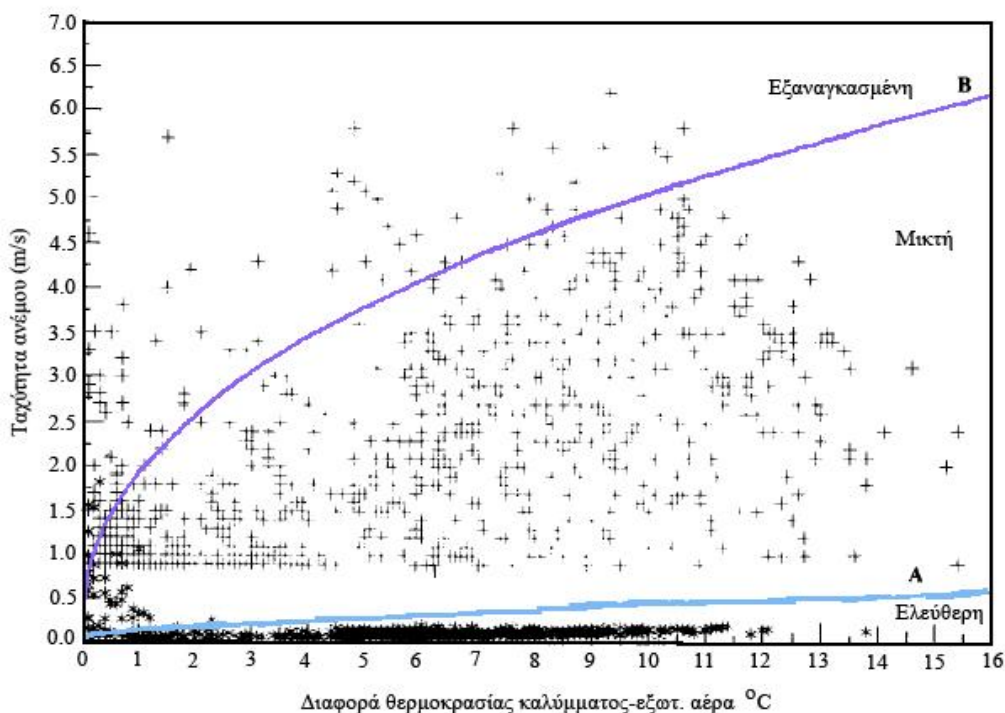
$$h_{co}=0.95+6.76u^{0.49} \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1} \quad (3) \text{ για } T_c - T_o > 0.3 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ και } u \leq 6.3 \text{ m s}^{-1}$$

Όσον αφορά την φύση της συναγωγής εσωτερικά του καλύμματος του θερμοκηπίου, χαρακτηρίζεται πάντοτε ως καθαρά φυσική όταν η ταχύτητα του ανέμου στο εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου είναι μικρότερη από **0.3 m/sec**. Αυτό συμβαίνει όταν δεν υπάρχει λειτουργία ανεμιστήρα για ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στον χώρο ή/και τα παράθυρα του θερμοκηπίου είναι κλειστά. Σε αυτήν την περίπτωση έχουν καταγραφεί σημαντικές διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού περιβάλλοντος θερμοκηπίου και καλύμματος. Για τον καθορισμό του συντελεστή συναγωγής εσωτερικά του καλύμματος του θερμοκηπίου h_{ac} μπορούν να χρησιμοποιηθούν τυπικές εξισώσεις από την βιβλιογραφία με επαρκή ακρίβεια, όμως οι ερευνητές καθόρισαν και την δική τους εμπειρική σχέση που είναι η παρακάτω:

$$h_{ac}=2.21 (T_a - T_c)^{0.33} \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1} \quad (4) \text{ για } 0.3 < T_a - T_c \leq 13.8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Οι σχέσεις **3** και **4** ισχύουν για τις συγκεκριμένες συνθήκες που αναφέρονται. Ειδικότερα, για τις νυχτερινές ώρες όταν τα παράθυρα του θερμοκηπίου είναι κλειστά και υπάρχει θέρμανση, η θερμοκρασία καλύμματος είναι μεταξύ της θερμοκρασίας εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος και η καθαρή ακτινοβολία του καλύμματος είναι αρνητική $Rn < 0$.

Τέλος στο ίδιο σχήμα **3-7**, μπορεί κανείς να παρατηρήσει, όταν μικρές διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού περιβάλλοντος θερμοκηπίου και καλύμματος επικρατούν στο εσωτερικό του καλύμματος τότε η φύση της συναγωγής μπορεί να είναι φυσική, μικτή ή και εξαναγκασμένη όταν και η ταχύτητα του εσωτερικού ανέμου είναι αρκετά υψηλή. Αυτό συμβαίνει όταν υπάρχει λειτουργία ανεμιστήρα για πλήρη ανάμιξη του θερμού αέρα στον χώρο ή/και τα παράθυρα του θερμοκηπίου είναι ανοιχτά.



Σχήμα 3-7: Περιοχές φυσικής, μικτής και εξαναγκασμένης συναγωγής. Το σύμβολο (+) αναφέρεται στην εξωτερική περιοχή του καλύμματος του θερμοκηπίου ενώ το σύμβολο (*) στην εσωτερική περιοχή (Papadakis et al, (1992).

Στο παρόν μοντέλο προσομοίωσης οι παραπάνω εμπειρικές σχέσεις που αναπτύχθηκαν από τους Papadakis et al (1992) χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν τους συντελεστές συναγωγής ως εξής: Στην περίπτωση του πειραματικού θερμοκηπίου που χρησιμοποιείται η υπέρυθη θέρμανση, οι συνθήκες στο εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου διαμορφώνονται έτσι ώστε, ο συντελεστής συναγωγής h_{ac} μεταξύ του εσωτερικού αέρα και του καλύμματος του θερμοκηπίου καθώς και ο συντελεστής συναγωγής h_{pa} μεταξύ των φυτών και του εσωτερικού αέρα οι οποίοι χρησιμοποιούνται στα δύο ενεργειακά ισοζύγια που αναπτύσσονται με όγκους ελέγχου το κάλυμμα και τον εσωτερικό αέρα του θερμοκηπίου αντίστοιχα να δύνανται να εκφραστούν από την εξίσωση 4 (απουσία ανέμου ή ταχύτητα ανέμου $<0.3 \text{ ms}^{-1}$). Στο πειραματικό θερμοκήπιο που χρησιμοποιείται συμβατικό σύστημα θέρμανσης (θερμός αέρας εξαναγκασμένης συναγωγής), ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ του εσωτερικού αέρα και του καλύμματος του θερμοκηπίου που χρησιμοποιείται στο ενεργειακό ισοζύγιο που αναπτύσσεται με όγκο ελέγχου το κάλυμμα του θερμοκηπίου, εκφράζεται με μια μέση τιμή $h_{ac} = 8.5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ που προκύπτει από συσχετισμούς. Αυτό διότι οι συνθήκες του μικροκλίματος αλλάζουν παρουσία της λειτουργίας του αερόθερμου που εξαγει θερμό αέρα και του ανεμιστήρα που αναμιγνύει τον θερμό αέρα. Η ταχύτητα του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου είναι $u \geq 2.00 \text{ ms}^{-1}$ και ο μηχανισμός της συναγωγής γίνεται από φυσικός (στην περίπτωση της υπέρυθρης θέρμανσης) εξαναγκασμένος. Όσον αφορά τις συνθήκες του μακροκλίματος διαμορφώνονται ακριβώς το ίδιο και για τα δύο πειραματικά θερμοκήπια και ο συντελεστής συναγωγής h_{co} μεταξύ του καλύμματος του θερμοκηπίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος εκφράζεται και για τις δύο περιπτώσεις από την εξίσωση 3.

3.3.4 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ

Οι συντελεστές εκπομπής που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις του μοντέλου προσομοίωσης είναι ο συντελεστής εκπομπής του φυτικού θόλου ϵ_p και του καλύμματος του θερμοκηπίου ϵ_c . Για τα περισσότερα τυπικά υλικά κάλυψης ο συντελεστής εκπομπής είναι $\epsilon_c=0.9$ σε θερμοκρασία 300 K (27 °C). Στην παρούσα εργασία το κάλυμμα του θερμοκηπίου θεωρείται γυαλί χαμηλής εκπομπής (Low-E) με συντελεστή εκπομπή εξωτερικής επιφάνειας $\epsilon_c=0.2$. Ο συντελεστής εκπομπής των φυτών είναι $\epsilon_p=0.9$ αντίστοιχα.

3.3.5 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΟΥΡΑΝΟΥ

Στην εξίσωση 2 του ενεργειακού ισοζυγίου που αναπτύσσεται με όγκο ελέγχου το κάλυμμα του θερμοκηπίου και για τις δύο περιπτώσεις συστημάτων θέρμανσης – συμβατικό και υπέρυθρο αντίστοιχα- εμφανίζεται η ανταλλαγή μεγάλου μήκους ακτινοβολίας (θερμικής ακτινοβολίας) ανάμεσα στο κάλυμμα του θερμοκηπίου και τον ουρανό.

Ο υπολογισμός της θερμικής ακτινοβολίας που ανταλλάσσεται με τον ουρανό, θέτει ένα πρόβλημα το οποίο είναι κοινό στις περισσότερες ενεργειακές εφαρμογές όπως στους ηλιακούς συλλέκτες, στην θερμική συμπεριφορά εξωτερικών τοίχων, στην θερμική συμπεριφορά του θερμοκηπίου κλπ. Οι [Bot και van de Braak \(1995\)](#) ανέφεραν τη δυσκολία καθορισμού της ανταλλαγής ακτινοβολίας ανάμεσα στο κάλυμμα θερμοκηπίου και στο ημισφαίριο πάνω από το θερμοκήπιο. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, καθορίζεται μία θερμοκρασία ουρανού (T_{sky}) ως θερμοκρασία ενός μέλανος ημισφαιρίου που εκπέμπει σύμφωνα με το νόμο του *Stefan – Boltzmann*. Παρόλο που αυτή η εκπομπή δεν μοιάζει πολύ με την κατανομή της ακτινοβολίας από ένα μέλαν σώμα, είναι πολύ βολικό στους υπολογισμούς της ακτινοβολίας να θεωρείται η ατμόσφαιρα ως μέλαν σώμα σε ορισμένες χαμηλότερες υποθετικές θερμοκρασίες το οποίο εκπέμπει ίση ποσότητα ενέργειας ακτινοβολίας. Αυτή η υποθετική θερμοκρασία ονομάζεται αποτελεσματική (ή ενεργός) θερμοκρασία ουρανού T_{sky} . Η θερμοκρασία ουρανού ωστόσο μπορεί να μετρηθεί άμεσα με τη χρήση ενός ειδικού πυρανόμετρου που ονομάζεται πυργεόμετρο.

Η θερμοκρασία του ουρανού είναι μια πλασματική θερμοκρασία και εισάγεται στα μοντέλα της θερμικής ακτινοβολίας που ανταλλάσσεται μεταξύ μιας επιφάνειας και του ουρανού. Συχνά λαμβάνεται ίση με την θερμοκρασία του ξηρού αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος, όμως ένα τέτοιο μοντέλο δεν είναι ικανοποιητικό ιδιαίτερα στα εύκρατα κλίματα κατά την διάρκεια καθαρών νυχτών. Η θερμοκρασία ουρανού σε εύκρατα κλίματα μια καθαρή νύχτα έχει αναφερθεί ότι είναι έως και 25 °C χαμηλότερη από το εξωτερικό περιβάλλον και περίπου 6 °C χαμηλότερη όταν επικρατεί συννεφιά ([Jolliet et al, 1991](#)). Διάφοροι ερευνητές έχουν προτείνει πολλές σχέσεις για την θερμοκρασία του ουρανού, λαμβάνοντας υπόψη την θερμοκρασία του εξωτερικού ξηρού αέρα, την θερμοκρασία δρόσου, το ποσοστό νεφοκάλυψης. Όμως η διαδικασία παραμένει προβληματική, οι συσχετισμοί γίνονται αποδεκτοί για συγκεκριμένες κλιματολογικές συνθήκες ή για συγκεκριμένη τοποθεσία.

Οι συσχετισμοί μέσω των οποίων καθορίζεται η θερμοκρασία ουρανού, γίνονται συνήθως σύμφωνα με μετεωρολογικές παραμέτρους που μετρούνται στην επιφάνεια του εδάφους όπως θερμοκρασία περιβάλλοντος, πίεση υδρατμών, νεφοκάλυψη. Οι πιο απλές διατυπώσεις της θερμοκρασίας του ουρανού εξαρτώμενες από την θερμοκρασία του ξηρού αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος είναι:

$$T_{sky} = T_{\alpha} \quad K \quad (\text{Dreyfus, 1960})$$

$$T_{sky} = T_{\alpha} - 6 \text{ ή } T_{sky} = T_{\alpha} - 12 \quad K \quad (\text{Whillier, 1967})$$

$$T_{sky} = 0.0552 T_{\alpha}^{1.5} \quad K \quad (\text{Swinbank, 1963})$$

$$T_{sky}^4 = 0.0552 T_{\alpha}^4 (1 - 0.261 \exp(-7.77 \cdot 10^{-4} (T_{\alpha} - 273)^2)) \quad K \quad (\text{Daguenet, 1985})$$

Άλλες διατυπώσεις που λαμβάνουν υπόψη την πίεση των υδρατμών (P_v) του αέρα με τον οποίο η θερμοκρασία του ουρανού είναι πιο σχετική είναι:

$$T_{sky} = T_{\alpha} (0.56 + 0.08 P_v^{0.5})^{0.25} \quad (\text{Melchor, 1982})$$

$$T_{sky} = T_{\alpha} (0.55 + 3.85 \cdot 10^{-2} P_v^{0.5})^{0.25} \quad (\text{Daguenet, 1985}), \text{ με πιο ακριβέστερη την}$$

$$T_{sky} = T_{\alpha} (0.8 + T_{dp} - 273/250)^{1/4} \quad (\text{Berger et al, 1984})$$

όπου dp είναι το σημείο δρόσου (**dew point**), δηλ. η θερμοκρασία στην οποία πρέπει να ψυχθεί ο αέρας για να αυξηθεί η σχετική του υγρασία στο **100%**.

Η παρουσία σύννεφων αυξάνει την σημασία της ατμοσφαιρικής εκπομπής. Κάποιοι προβλέψιμοι και πιο πλήρεις συσχετισμοί έχουν γίνει λαμβάνοντας υπόψη τρεις παραμέτρους: την θερμοκρασία περιβάλλοντος, την πίεση των υδρατμών του αέρα και την νεφοκάλυψη. Ο **Daguenet (1985)** έδωσε μια σχέση για νυχτερινά δεδομένα, απουσία ηλιακής ακτινοβολίας:

$$T_{sky} = (T_{\alpha} (\alpha + b P_v^{0.5}) (1 - \nu Ne/8) + \nu Ne/8)^{0.25}$$

με $Ne=8$ για καθαρό ουρανό και $Ne=0$ για νεφοσκεπή ουρανό. Τα α και b ορίζονται σύμφωνα με το υψόμετρο και την τοποθεσία. Το $\nu=0.9$ για χαμηλή και πυκνή νέφωση και $\nu=0$ για αραιή και λευκή νέφωση σε μεγάλο υψόμετρο. Το $\nu=0.8$ υποδεικνύεται ως μια μέση τιμή.

Ο **Aubinet (1994)** έδωσε μια σχέση χρησιμοποιώντας ένα δείκτη καθαρότητας K_i που είναι ο λόγος μεταξύ της εξωγήινης ακτινοβολίας και της παγκόσμιας ηλιακής ακτινοβολίας:

$$T_{sky} = 94 + 12.6 \ln(P_v) - 13 K_i + 0.341 T_{\alpha}$$

Τέλος οι **Adelard et al (1998)** χρησιμοποίησαν μη γραμμικές μεθόδους με τεχνικές νευρωνικών δικτύων με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αυτές οι τεχνικές οδήγησαν σε ένα μοντέλο μαύρου κουτιού το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δεδομένα με θόρυβο. Η ικανότητα του μοντέλου να λαμβάνει υπόψη τα διάφορα εισαγόμενα στοιχεία και να ερμηνεύσει τις πολύ πολύπλοκες σχέσεις του επιτρέπουν να χρησιμοποιηθεί όλο και περισσότερο στις μετεωρολογικές μελέτες,

Στο παρόν μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιούνται για την θερμοκρασία ουρανού οι μετρήσεις που δίδονται από την χρήση πυργεόμετρου, τύπου **CGR3**. Όμως σε πολλά παρόμοια μοντέλα χρησιμοποιείται μια συνηθισμένη απλοποίηση, ότι η ισοδύναμη θερμοκρασία ουρανού T_{sky} ισούται με την θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος T_o μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποεκτίμηση των ενεργειακών

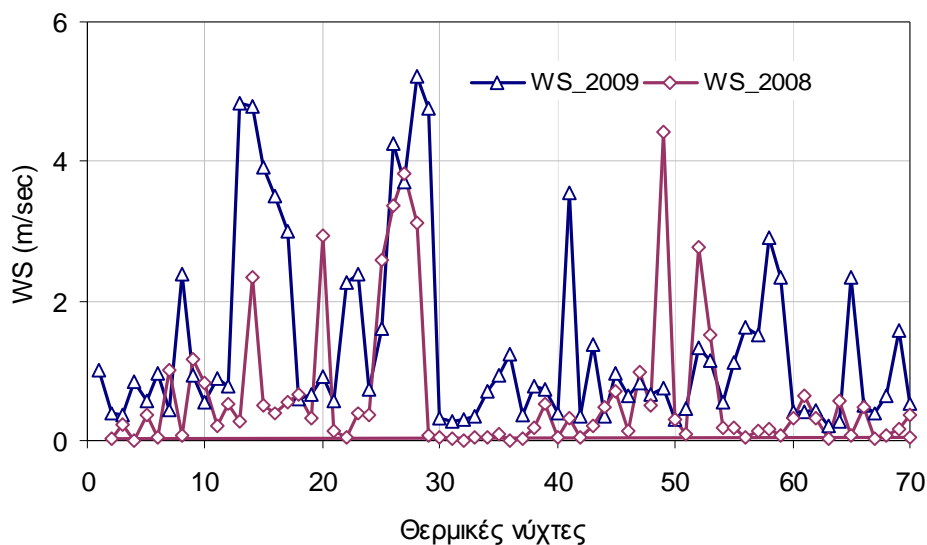
απωλειών λόγω ακτινοβολίας. Γι αυτό τον λόγο, η παραδοχή αυτή εξετάζεται σε σχέση με τις αβεβαιότητες που εισάγει στους ενεργειακούς υπολογισμούς.

3.3.6 ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΝΑΛΛΑΓΩΝ ΤΟΥ ΑΕΡΑ (N)

Ο αριθμός των εναλλαγών του αέρα N εξαρτάται από τον τύπο του θερμοκηπίου (πίνακας 3-2) και τις συνθήκες ταχύτητας του ανέμου που επικρατούν σε μια περιοχή, κυμαίνεται δε από 0-10 (Tiwari, 2003). Η τοπικές συνθήκες και το ανάγλυφο του εδάφους επηρεάζουν τις συνθήκες ανέμου, ενώ η δομή του θερμοκηπίου με τις αναπόφευκτες κατασκευαστικές ατέλειες και τα ανοίγματα φυσικού εξαερισμού επηρεάζουν τον αριθμό των εναλλαγών του αέρα. Στο παρόν μοντέλο προσομοίωσης ως αριθμός εναλλαγών χρησιμοποιείται $N = 1$, διότι αναφέρεται σε νέα σταθερή κατασκευή υαλόφρακτου πειραματικού θερμοκηπίου, σε υπήνεμες περιοχές (σχήμα 3-8) που η ταχύτητα του ανέμου είναι $WS < 1.5 \text{ ms}^{-1}$ στο 90% των νυχτών της θερμικής περιόδου και σε νυχτερινές συνθήκες που τα ανοίγματα εξαερισμού παραμένουν κλειστά. Το υπόλοιπο 10% των νυχτών που η ταχύτητα του ανέμου κυμαίνεται από $2-5 \text{ ms}^{-1}$ ως αριθμός εναλλαγών χρησιμοποιείται $N = 2$. Να σημειωθεί, ότι την θερμική περίοδο 2008 οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου έγιναν με ανεμόμετρο NRG #40 που είχε κατώφλι μετρήσεων 0.75 ms^{-1} και την θερμική περίοδο 2009 οι μετρήσεις έγιναν με ανεμόμετρο A100K με κατώφλι μετρήσεων 0.15 ms^{-1} . Αυτή η αισθητή διαφοροποίηση των τύπων ανεμομέτρων ως προς το κατώφλι λειτουργίας αποτυπώνεται καθαρά στο σχήμα 3-9 στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου.

Πίνακας 3-2. Εναλλαγές του αέρα του θερμοκηπίου σε σχέση με τον τύπο του θερμοκηπίου (American Society of Agriculture Engineers (1995))

Τύπος θερμοκηπίου	Εναλλαγές/h (N)
Υαλόφρακτο (3mm), νέα κατασκευή ή FRP (fiberglass reinforced plastic)	0.75-1.5
Υαλόφρακτα, παλαιά κατασκευή, καλή συντήρηση	1-2
Υαλόφρακτα, παλαιά κατασκευή, κακή συντήρηση	2-4
πολυαιθυλενίου (PE), απλό φύλλο (0.10 – 0.15 mm)	0,8-2,5
πολυαιθυλενίου (PE), διπλό φύλλο (0.10 – 0.15 mm)	0.5 -1.2
Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)	1.5



Σχήμα 3-8: Διακύμανση ταχύτητας ανέμου (WS) στην περιοχή των πιλοτικών θερμοκηπίων για δύο συνεχείς θερμικές περιόδους

3.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Οι συνολικές ενεργειακές απώλειες Q_{total} που λαμβάνουν χώρα στο θερμοκήπιο επιμερίζονται σε τρεις κατηγορίες απωλειών και υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Q_1 : ενεργειακές απώλειες λόγω διαφυγών που οφείλονται στις κατασκευαστικές ατέλειες της δομής του θερμοκηπίου

Q_2 : συνδυασμένες ενεργειακές απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας μέσω του καλύμματος του θερμοκηπίου

Q_3 : ενεργειακές απώλειες λόγω αγωγής από το έδαφος του θερμοκηπίου

3.4.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΦΥΓΩΝ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΑΠΟ ΚΑΙ ΠΡΟΣ ΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

Αυτές οι ενεργειακές απώλειες λόγω διαφυγών, οφείλονται στις αναπόφευκτες κατασκευαστικές ατέλειες του θερμοκηπίου και υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$Q_1 = \frac{C_{pa} r_a NV}{3600} (T_a - T_o) = 0.36NV(T_a - T_o) \quad (\text{W})$$

C_{pa} = ειδική θερμότητα αέρα, $J Kg^{-1}K^{-1}$

ρ_a = πυκνότητα αέρα, $Kg m^{-3}$

N = αριθμός εναλλαγών του αέρα από διαφυγές ανά ώρα, h^{-1}

V = όγκος θερμοκηπίου, m^3

$T_a - T_o$ = διαφορά θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου και του εισερχόμενου αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον, K
(ως εσωτερική θερμοκρασία λαμβάνεται η επιθυμητή νυχτερινή θερμοκρασία για την καλλιέργεια και ως εξωτερική η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος).

3.4.2 ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΛΟΓΩ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Στην ενότητα 3.2.2 συνδυασμός αγωγής και συναγωγής, έχει αναφερθεί ότι στην περίπτωση απλού γυάλινου τοιχώματος η αντίσταση αγωγής είναι αμελητέα σε σύγκριση με τις αντιστάσεις συναγωγής και οι θερμοκρασίες εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας καλύμματος πρακτικά ταυτίζονται. Για τον λόγο αυτό, η εξίσωση που περιγράφει τις απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής αναφέρεται σε μία μοναδική θερμοκρασία που χαρακτηρίζει το κάλυμμα και σε έναν μοναδικό συντελεστή συναγωγής μεταξύ του καλύμματος και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Στο κάλυμμα του θερμοκηπίου συμβαίνουν επιμέρους απώλειες θερμότητας συναγωγής και ακτινοβολίας. Το κάλυμμα χάνει θερμότητα με συναγωγή προς το εξωτερικό περιβάλλον και με ακτινοβολία προς τον ουρανό.

– Απώλειες θερμότητας από το κάλυμμα λόγω συναγωγής

Αυτές οι απώλειες θερμότητας συμβαίνουν από το όλο κάλυμμα προς το εξωτερικό περιβάλλον, υπολογίζονται δε από τον παρακάτω τύπο:

$$Q_{2_conv} = h_{co} A_c (T_c - T_o)$$

h_{co} = συντελεστής συναγωγής μεταξύ καλύμματος και εξωτερικού περιβάλλοντος, $W m^{-2}K^{-1}$

A_c = επιφάνεια του καλύμματος του θερμοκηπίου, m^2

$T_c - T_o$ = διαφορά θερμοκρασίας του καλύμματος του θερμοκηπίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος, K

– Απώλειες θερμότητας από το κάλυμμα λόγω ακτινοβολίας

Αυτές οι απώλειες θερμότητας συμβαίνουν από το όλο κάλυμμα προς τον ουρανό, είναι δε σημαντική πηγή ενεργειακών κάτω από συνθήκες καθαρού ουρανού και υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$Q_{2_rad} = \sigma A_c e_c (T_a^4 - T_{sky}^4) \quad (W)$$

σ = σταθερά Stefan- Boltzmann, $W m^{-2}K^{-4}$

A_c = επιφάνεια του καλύμματος του θερμοκηπίου, m^2

e_c = συντελεστής εκπομπής του καλύμματος

T_a = η απόλυτη θερμοκρασία του χώρου του θερμοκηπίου, K

T_{sky} = η θερμοκρασία του ουρανού, K

Οι παραπάνω επιμέρους απώλειες θερμότητας συναγωγής και ακτινοβολίας του καλύμματος, δίνονται από μια αθροιστική σχέση που χρησιμοποιείται στους διάφορους υπολογισμούς του ενεργειακού ισοζυγίου και είναι η παρακάτω:

$$Q_2 = Q_{2_conv} + Q_{2_rad} = h_{co} A_c (T_c - T_o) + e_c A_c \sigma (T_c^4 - T_{sky}^4) \quad (W)$$

3.4.3 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Στον χώρο του θερμοκηπίου παρατηρείται ροή ενέργειας προς το έδαφος. Οι απώλειες θερμότητας προς το έδαφος του θερμοκηπίου αναπαριστούν μια σύνθετη (τρισιδιάστατη) διαδικασία αγωγής. Αυτές οι απώλειες θερμότητας είναι ανάλογες με το εμβαδόν του εδάφους του θερμοκηπίου και την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εδάφους και του υπεδάφους. Η θερμοκρασία του υπεδάφους και η ροή της θερμότητας προς αυτό είναι πολύπλοκο να προσδιοριστούν. Έτσι στην πράξη η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εδάφους και υπεδάφους προσεγγίζεται αρκετά καλά από την θερμοκρασία των φυτών και του εξωτερικού περιβάλλοντος αντίστοιχα. Έτσι διαμορφώνεται η σχέση:

$$Q_3 = K_p A_p (T_p - T_o) \quad (W)$$

όπου ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από το έδαφος του θερμοκηπίου, K_p εξαρτάται άμεσα από την θερμική αγωγιμότητα του εδάφους k_{soil} και λαμβάνεται ίσος με $1.85 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, τιμή που αντιστοιχεί σε ένα μέσο γεωργικό έδαφος. Ένας έλεγχος του μέτρου του K_p παρέχεται από το θεωρητικό αποτέλεσμα (ισχύει αυστηρά για ένα ισόθερμο κυκλικό έδαφος διαμέτρου D) της εξίσωσης:

$$Q_3 = K_{soil} (2D)(\Delta T) \quad (\text{Carslaw \& Jaeger, 1959})$$

Συνδυάζοντας τις 2 παραπάνω εξισώσεις και χρησιμοποιώντας $A_p=4.26 \text{ m}^2$ (εμβαδόν εδάφους πειραματικού θερμοκηπίου) και $k_{soil}=1-2 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ (τιμές που αντιστοιχούν σε ξηρό και υγρό έδαφος αντίστοιχα) τα αποτελέσματα λαμβάνονται σε εύρος $K_p=1.1-2.2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Η παραπάνω εξίσωση που υπολογίζει τις απώλειες θερμότητας προς το έδαφος ευθυγραμμίζεται με την απλουστευμένη μονοδιάστατη προσέγγιση του υπόλοιπου μοντέλου. Η εκτίμηση του συντελεστή K_p που χρησιμοποιείται στην εξίσωση των θερμικών απωλειών του θερμοκηπίου προς το έδαφος, υποστηρίζεται από την αναλυτική προσέγγιση των [Carslaw & Jaeger](#).

3.5 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΚΑΙ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

3.5.1 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το παρόν μοντέλο περιέχει αρκετές παραδοχές που χρησιμοποιούνται στα γενικά μοντέλα για την εκτίμηση των θερμικών απωλειών του θερμοκηπίου. Οι σημαντικότερες παραδοχές αναφέρονται παρακάτω:

- Η παραδοχή ότι η ισοδύναμη θερμοκρασία ουρανού T_{sky} ισούται με την θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος T_o , παρόλο που είναι μια συνηθισμένη απλοποίηση που χρησιμοποιείται σε πολλά παρόμοια μοντέλα, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποεκτίμηση των ενεργειακών απωλειών λόγω ακτινοβολίας κατά την διάρκεια μιας καθαρής νύχτας διότι τότε η ενεργός θερμοκρασία του ουρανού μπορεί να είναι 5-20 °C χαμηλότερη (Alelard et al., 1998). Για να αποτιμηθεί η σημασία αυτής της παραδοχής, οι υπολογισμοί γίνονται για $T_{sky} = T_o$, για ένα εύρος θερμοκρασιών εξωτερικού περιβάλλοντος από -6 – 10 °C, μια αντιπροσωπευτική ταχύτητα ανέμου 1 m/sec και για τυπικό υλικό κάλυψης με $\epsilon_c = 0.9$. Η επιθυμητή θερμοκρασία των φυτών είναι $T_p = 15$ °C. Εν συνεχεία οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται χρησιμοποιώντας $T_{sky} = T_o - 6$ (Whillier, 1967). Σε αυτήν την περίπτωση ενώ οι ενεργειακές απώλειες που υπολογίζονται αυξάνονται κατά 12%, το ποσοστό του ενεργειακού οφέλους που προκύπτει για την υπέρυθρη θέρμανση σε σχέση με τον θερμό αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής δεν μεταβάλλεται σχεδόν καθόλου (ενότητα 3.6.3). Επομένως όταν χρησιμοποιείται η παρούσα απλοποιημένη αντιμετώπιση της θερμοκρασίας ουρανού δεν αποδυναμώνει τα αποτελέσματα της εργασίας σχετικά με την βελτιωμένη αποτελεσματικότητα της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Ένα επιπλέον επιχείρημα υπέρ της αντικατάστασης της θερμοκρασίας ουρανού με την θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος προκύπτει από την παρατήρηση ότι ένα σημαντικό μέρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από το θερμοκήπιο (κυρίως από τα τοιχώματα) δεν βλέπει τον ουρανό αλλά το έδαφος και τα γειτονικά φυτά ή κτίρια. Αυτές οι επιφάνειες βρίσκονται πιθανώς σε θερμοκρασία πολύ κοντινότερη σε αυτήν του εξωτερικού περιβάλλοντος παρά στην θερμοκρασία ουρανού. Ωστόσο το σημείο- κλειδί είναι ότι η πραγματική θερμοκρασία ουρανού στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι διαθέσιμη και κατά συνέπεια τα γενικά μοντέλα που εκτιμούν τις θερμικές απώλειες θερμοκηπίων βασιζόμενα σε μια μέση θερμοκρασία ουρανού υπόκεινται σε αυξημένη αβεβαιότητα.
- Μια δεύτερη παραδοχή που υπεισέρχεται στο μοντέλο είναι η παράβλεψη στον υπολογισμό των συνολικών ενεργειακών απωλειών, των απωλειών ακτινοβολίας του φυτικού θόλου προς τον ουρανό. Οι ενεργειακές απώλειες ακτινοβολίας, είναι το σύνολο της θερμότητας λόγω ακτινοβολίας που διέρχεται μέσω του καλύμματος εκφρασμένη ως ποσοστό της συνολικής θερμότητας από ακτινοβολία που ακτινοβολείται προς το κάλυμμα (Duncam and Walker, 1973). Αυτές οι απώλειες μπορεί να είναι σημαντικές όταν χρησιμοποιούνται στα θερμοκήπια πλαστικά υλικά κάλυψης (πίνακας 3-3), αλλά στην προκειμένη περίπτωση επειδή τα πειραματικά δεδομένα λαμβάνονται σε υαλόφρακτο θερμοκήπιο αυτός ο όρος εκτιμάται ότι είναι αμελητέος.

Πίνακας 3-3: Απώλειες ακτινοβολίας διαφόρων υλικών κάλυψης (Nelson, 2003).

Υλικό κάλυψης	Ενεργειακές απώλειες ακτινοβολίας (%)
Γυαλί (μονό κάλυμμα)	4.4% - 0%
Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)	12%
FRP (με αυλακώσεις)	1.0%
Πολυεστερικό film (μονό κάλυμμα)	16.2%
Πολυαιθυλένιο, PE (μονό κάλυμμα)	88.8%

- Το ενεργειακό ισοζύγιο του θερμοκηπίου δεν υπολογίζει δύο επιδράσεις που σχετίζονται με φαινόμενα μεταφοράς μάζας και είναι η διαπνοή των φυτών και η συμπύκνωση υδρατμών πάνω στο κάλυμμα. Το ένα και/ή το άλλο φαινόμενο μπορούν να γίνουν σημαντικά κάτω από διαφορετικές συνθήκες, αλλά οι πειραματικές μας παρατηρήσεις δείχνουν ότι κανένα δεν έχει ιδιαίτερη σημασία για την παρούσα εργασία. Ειδικότερα η διαπνοή έχει ελάχιστη επίδραση στο ενεργειακό ισοζύγιο την νύχτα επειδή τα στόματα των φυτών πρακτικά είναι κλειστά, παρουσιάζοντας έτσι μια σημαντική αντίσταση στην μεταφορά μάζας. Επιπλέον ο ρυθμός διαπνοής είναι ασθενής διότι η σχετική υγρασία του εσωτερικού αέρα είναι συνήθως υψηλότερη κατά την διάρκεια της νύχτας παρόλο που είναι πάντοτε χαμηλότερη από αυτήν του εξωτερικού περιβάλλοντος (σχήμα 3-10).
- Συμπύκνωση παρατηρείται πραγματικά σε κάποιες χρονικές περιόδους που είναι κατά την διάρκεια της απότομης πτώσης της θερμοκρασίας που ακολουθεί την δύση του ήλιου καθώς και το διάστημα πριν την ανατολή του ήλιου. Τότε τα υδροσταγονίδια που συγκεντρώνονται στα τοιχώματα του καλύμματος έρχονται σε ισορροπία χωρίς να πέφτουν στα φυτά και στο έδαφος και σταδιακά επανεξατμίζονται. Συνεπώς η συμπύκνωση στην παρούσα εργασία αντιμετωπίζεται ως ένα παροδικό φαινόμενο στην αρχή και στο τέλος του νυχτερινού κύκλου το οποίο μπορεί για μικρό χρονικό διάστημα να επηρεάσει την θερμοχωρητικότητα των τοιχωμάτων του καλύμματος αλλά εκτιμάται ότι δεν επηρεάζει τις μέσες ενεργειακές απώλειες.

Τα χαρακτηριστικά του παρόντος μοντέλου είναι κοινά με αυτά των περισσότερων μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση ενεργειακών απωλειών σε θερμοκήπια και κτήρια. Τα μοντέλα αυτά τυπικά βασίζονται μόνο σε μέσες τιμές της θερμοκρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου και ενσωματώνουν λογικές παραδοχές για τις υπόλοιπες μεταβλητές. Στους ενεργειακούς υπολογισμούς οι αβεβαιότητες που έχουν εισαχθεί εξισορροπούνται με επιλογή κατάλληλων συντελεστών που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό ενός συστήματος θέρμανσης, ενώ τα συστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται διασφαλίζουν την ενεργητικά και οικονομικά αποτελεσματική λειτουργία των εγκαταστάσεων θέρμανσης. Όσον αφορά τον σκοπό της παρούσας εργασίας, το αντίκτυπο των παραπάνω παραδοχών στην σύγκριση της υπέρυθρης θέρμανσης και της θέρμανσης με θερμό αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής, αναμένεται να είναι σημαντικά χαμηλότερο από τις αβεβαιότητες που εισάγουν διότι θα επηρεάζουν τις εκτιμώμενες απώλειες και για τις δύο περιπτώσεις θέρμανσης κατά παρόμοιο τρόπο.

3.5.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Οι αβεβαιότητες στους ενεργειακούς υπολογισμούς προκύπτουν από δύο πηγές:

- Οι ολικοί συντελεστές μετάδοσης θερμότητας, παρόλο που λαμβάνουν υπόψη τους τα ειδικά χαρακτηριστικά των πειραματικών θερμοκηπίων (ανεμόπτωση, προσανατολισμό, υλικά κλπ), εξάγονται από συσχετισμούς που μπορεί να είναι αξιόπιστοι με ακρίβεια $P = \pm 15\%$. Οι παράγοντες που συνεισφέρουν σε αυτές τις αβεβαιότητες είναι μέσες ιδιότητες και συνθήκες, γεωμετρικά χαρακτηριστικά, υποβάθμιση υλικών και μη υπολογίσιμες επιδράσεις (Campbell, 1977; Chapman, 1984).
- Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας όταν βασίζονται στην παραδοχή ότι η θερμοκρασία ουρανού T_{sky} ισούται με την θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος T_o , είναι μια προσέγγιση αντιπροσωπευτικής συννεφιασμένης νύχτας. Οι απώλειες αυτές κατά την διάρκεια μιας νύχτας με καθαρό ουρανό θα είναι σημαντικά υψηλότερες. Από αυτήν την πηγή σφάλματος μια απόκλιση της τάξεως του $B = 25\%$ είναι προβλεπόμενη (Duffie and Beckman, 1991). Συνεπώς η συνολική αβεβαιότητα εκτιμάται ως $U = \sqrt{P^2 + B^2} = 30\%$. Πρέπει όμως να αναφερθεί, ότι οι παραπάνω πηγές αβεβαιότητας εισέρχονται παρόμοια στους υπολογισμούς για το σύστημα θέρμανσης με θερμό αέρα και για την υπέρυθρη θέρμανση. Έτσι ένα πιθανό λάθος και στους δύο υπολογισμούς θα είναι προς την ίδια κατεύθυνση και η προβλεπόμενη βελτίωση από την αντικατάσταση του συμβατικού συστήματος θέρμανσης από υπέρυθρη ακτινοβολία θα επηρεάζεται ελάχιστα.

3.6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

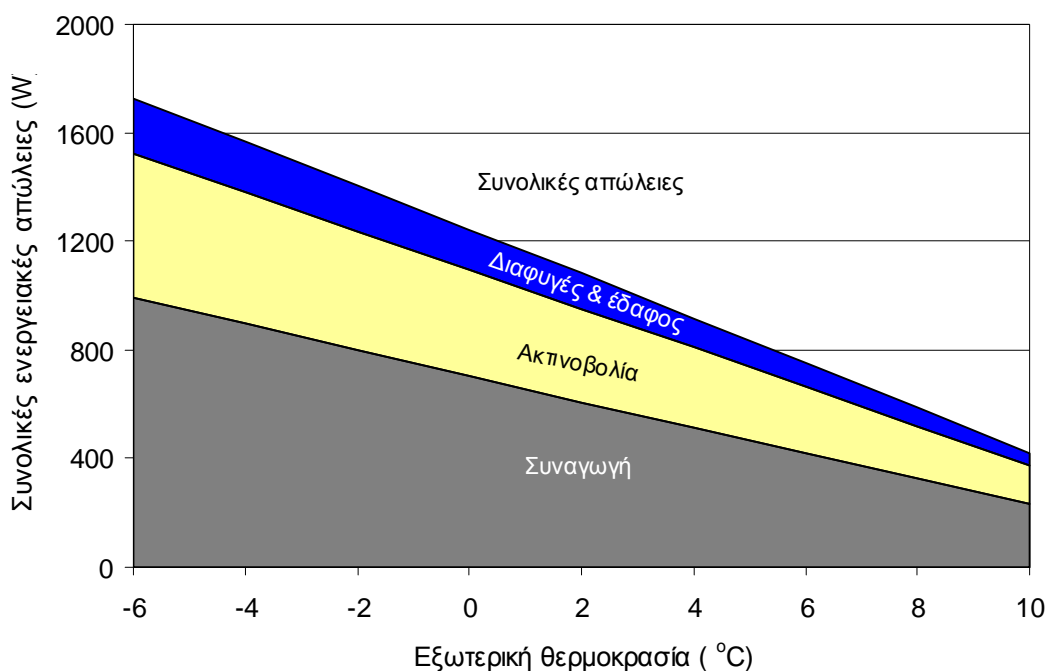
Σε αυτήν την ενότητα το θεωρητικό μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιείται σε παραμετρικές μελέτες για να εξεταστεί η επίδραση των κλιματολογικών συνθηκών (εξωτερική θερμοκρασία, ταχύτητα ανέμου κλπ) καθώς και άλλων σεναρίων (απόδοση συστημάτων υπέρυθρης θέρμανσης) στην αποδοτικότητα της θέρμανσης με υπέρυθρη ακτινοβολία σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα θέρμανσης.

Οι παραμετρικές μελέτες που γίνονται με το μοντέλο προσομοίωσης βασισμένες σε γεωμετρικά χαρακτηριστικά πειραματικού θερμοκηπίου υποδεικνύουν ότι, με τα συστήματα υπέρυθρης θέρμανσης που διατίθενται σήμερα στο εμπόριο αναμένεται ενεργειακό όφελος της τάξεως του 45-50% σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης. Αυτά το ενεργειακό όφελος όπως φαίνεται στην συνέχεια, αυξάνει γραμμικά για χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες κάνοντας την υπέρυθρη θέρμανση ελκυστική για ψυχρότερα κλίματα. Επίσης είναι μεγαλύτερο για υψηλότερες ταχύτητες ανέμου όταν οι συνολικές ενεργειακές απώλειες αυξάνονται λόγω της αύξησης του συντελεστή συναγωγής μεταξύ καλύμματος και εξωτερικού περιβάλλοντος καθώς και του εντονότερου ρυθμού εναλλαγών του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Περαιτέρω προβλέπεται ότι όσο βελτιώνεται ο συντελεστής απόδοσης των πηγών υπέρυθρης ακτινοβολίας τόσο μεγαλύτερο είναι και το ενεργειακό όφελος που προκύπτει

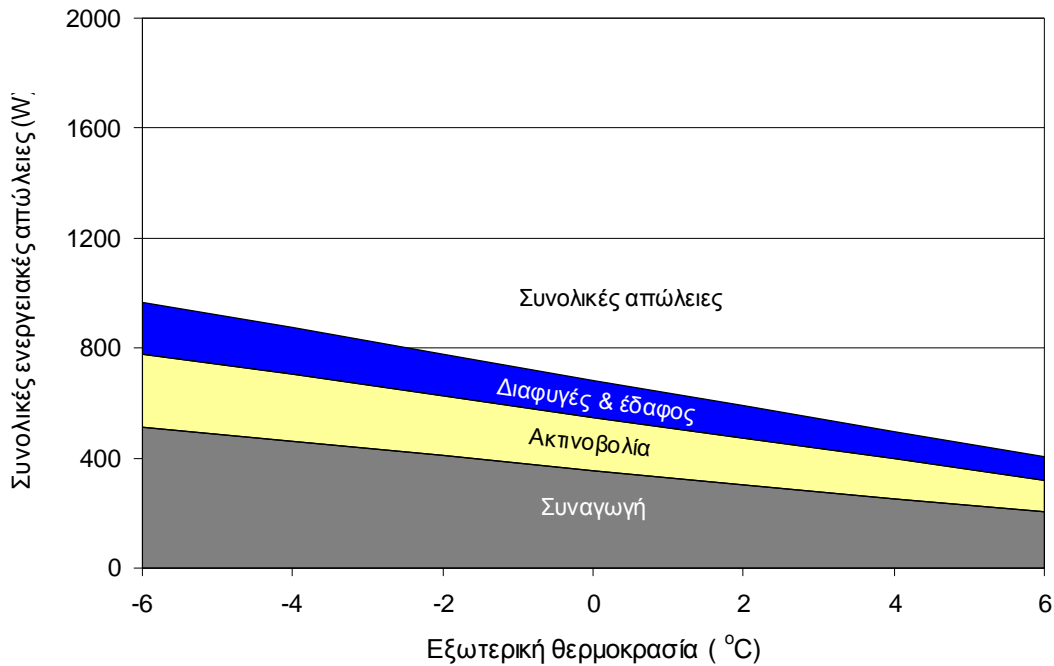
καθιστώντας την υπέρυθρη θέρμανση ελκυστική εναλλακτική λύση για την θέρμανση των θερμοκηπίων.

3.6.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (T_0)

Το θεωρητικό μοντέλο χρησιμοποιείται για γενική πρόβλεψη των ενεργειακών απωλειών σε κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις συστημάτων θέρμανσης που χρησιμοποιούνται. Οι υπολογισμοί γίνονται για ένα εύρος θερμοκρασιών εξωτερικού περιβάλλοντος από $-6 - 10\text{ }^\circ\text{C}$, μια αντιπροσωπευτική ταχύτητα ανέμου 1 m s^{-1} και για τυπικό υλικό κάλυψης με $\epsilon_c=0.9$. Η επιθυμητή θερμοκρασία των φυτών είναι $T_p=15\text{ }^\circ\text{C}$. Οι προβλέψεις του μοντέλου απεικονίζονται στα σχήματα 3-9 και 3-10 και συγκεντρώνονται σε τρεις κατηγορίες: (i) ενεργειακές απώλειες λόγω διαφυγών και μέσω αγωγής προς το έδαφος (ii) λόγω συναγωγής από το κάλυμμα και (iii) λόγω ακτινοβολίας από το κάλυμμα. Με εξαίρεση τις απώλειες λόγω αγωγιμότητας διαμέσου του εδάφους (οι οποίες με βάση το μοντέλο παραμένουν αμετάβλητες) όλες οι άλλες απώλειες εκτιμάται ότι μειώνονται στην περίπτωση της υπέρυθρης θέρμανσης. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι 40-50% μείωση της ενεργειακής απαίτησης στην περίπτωση της υπέρυθρης θέρμανσης σε σχέση με το σύστημα θέρμανσης με θερμό αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής.



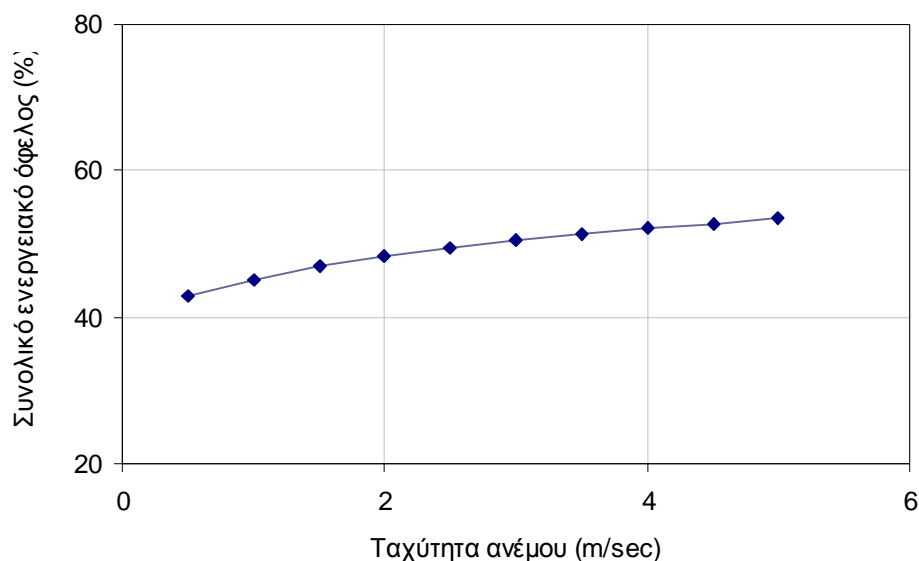
Σχήμα 3-9: Επίδραση της εξωτερικής θερμοκρασίας στις προβλεπόμενες ενεργειακές απώλειες και στο εκτιμώμενο ενεργειακό όφελος με χρήση συμβατικού συστήματος θέρμανσης.



Σχήμα 3-10: Επίδραση της εξωτερικής θερμοκρασίας στις προβλεπόμενες ενεργειακές απώλειες και στο εκτιμώμενο ενεργειακό όφελος με χρήση υπέρυθρης θέρμανσης.

3.6.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ (WS) ΚΑΙ ΤΩΝ ΔΙΑΦΥΓΩΝ (N) ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Για να εκτιμηθεί η επίδραση της αλλαγής της ταχύτητας του ανέμου στις ενεργειακές απώλειες συναγωγής στο κάλυμμα και διαφυγών στον αέρα του θερμοκηπίου, το θεωρητικό μοντέλο χρησιμοποιείται και προσομοιώνει μια τυπική εξωτερική θερμοκρασία $T_o=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ και μια επιθυμητή θερμοκρασία φυτών $T_p=15\text{ }^{\circ}\text{C}$ με διακύμανση ταχύτητας ανέμου σε ένα εύρος $u=0.5 - 5.0\text{ m s}^{-1}$. Για τους ενεργειακούς υπολογισμούς, θεωρείται ότι απώλειες λόγω διαφυγών έχουν γραμμική σχέση με την ταχύτητα του ανέμου και τίθεται ο αριθμός εναλλαγών του αέρα N , ίσος με το μέτρο της ταχύτητας του ανέμου σε m s^{-1} ($N=0.5-5.0\text{ h}^{-1}$). Η συνδυασμένη επίδραση ενός υψηλότερου συντελεστή συναγωγής μεταξύ του καλύμματος και του εξωτερικού αέρα h_{co} σε συνδυασμό με την αύξηση των εναλλαγών του αέρα λόγω μιας μεγαλύτερης ταχύτητας ανέμου καταλήγει σε αυξημένες ενεργειακές απώλειες. Αυτή η αύξηση είναι μικρότερη στην περίπτωση της υπέρυθρης θέρμανσης, και το συνολικό ενεργειακό όφελος αυξάνεται περισσότερο από 50% όταν η ταχύτητα ανέμου ξεπερνά τα 3.0 m s^{-1} (σχήμα 3-11).



Σχήμα 3-11: Επίδραση της διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου στα ενεργειακά οφέλη με χρήση υπέρυθρης θέρμανσης

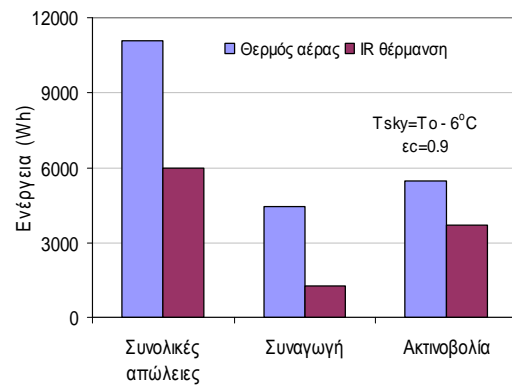
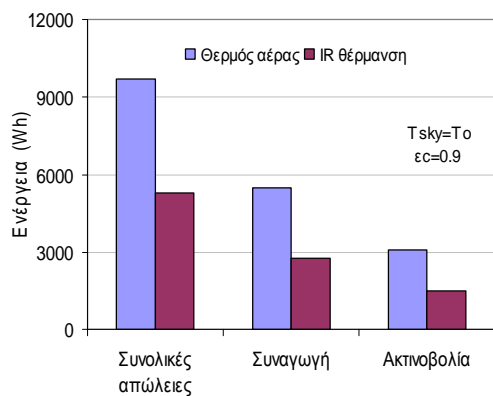
3.6.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΟΥΡΑΝΟΥ (T_{sky}) ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΤΟΥ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ (ϵ_c) ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Για να αποτιμηθεί η σημασία της θερμοκρασίας του ουρανού σε συνδυασμό με τον συντελεστή εκπομπής του καλύμματος, το θεωρητικό μοντέλο χρησιμοποιείται σε παραμετρική μελέτη για $T_{sky}=T_o$, για εύρος θερμοκρασιών εξωτερικού περιβάλλοντος από $-6 - 10$ °C, για αντιπροσωπευτική ταχύτητα ανέμου $u=1$ m s⁻¹, για επιθυμητή θερμοκρασία φυτών $T_p=15$ °C και για τυπικό υλικό κάλυψης με συντελεστή εκπομπής $\epsilon_c=0.9$ (σχήμα 3-12). Για τα ίδια δεδομένα, οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται χρησιμοποιώντας για $T_{sky}=T_o-6$. Σε αυτήν την περίπτωση οι συνολικές ενεργειακές απώλειες του θερμοκηπίου που υπολογίζονται, αυξάνονται έως **12%** και για τα δύο συστήματα θέρμανσης, μειώνονται οι απώλειες του καλύμματος λόγω συναγωγής στην θέρμανση με θερμό αέρα έως **20%** ενώ στην υπέρυθρη θέρμανση έως και **50%** και αυξάνουν και για τα δύο συστήματα θέρμανσης έως και **50%** οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας (σχήμα 3-13). Το ποσοστό του ενεργειακού οφέλους που προκύπτει για το σύστημα υπέρυθρης θέρμανσης σε σχέση με το σύστημα θερμού αέρα δεν μεταβάλλεται σχεδόν καθόλου με την μεταβολή της θερμοκρασίας ουρανού και είναι **45-50%** (σχήμα 3-14).

Εν συνεχεία το θεωρητικό μοντέλο χρησιμοποιείται σε παραμετρική μελέτη με τα ίδια ακριβώς παραπάνω δεδομένα με μόνη διαφορά την θεώρηση υλικού κάλυψης με χαμηλό συντελεστή εκπομπής $\epsilon_c=0.2$. Η χρήση καλύμματος χαμηλού συντελεστή εκπομπής καταλήγει σε μειωμένες συνολικές ενεργειακές απώλειες του θερμοκηπίου σε σχέση με τυπικό υλικό κάλυψης με $\epsilon_c=0.9$ καθώς και σε πολύ μικρή μείωση του ενεργειακού οφέλους που προκύπτει για την υπέρυθρη θέρμανση σε σχέση με το

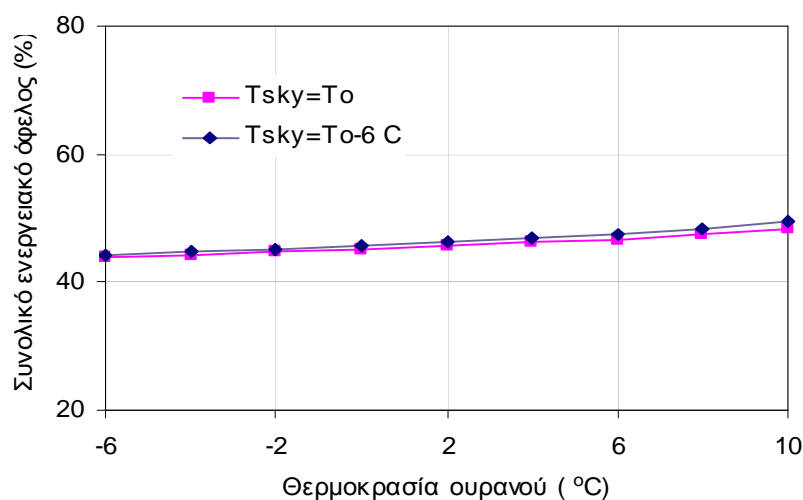
σύστημα θερμού αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής. Το ενεργειακό όφελος δεν μεταβάλλεται περισσότερο από 4% και κυμαίνεται από 42-45%.

Όσον αφορά την διαφοροποίηση της θερμοκρασίας ουρανού $T_{sky} = T_o - 6$ στην περίπτωση του καλύμματος χαμηλής εκπομπής οι συνολικές ενεργειακές απώλειες του θερμοκηπίου αυξάνονται έως 4% και για τα δύο συστήματα θέρμανσης, μειώνονται οι απώλειες του καλύμματος λόγω συναγωγής στην θέρμανση με θερμό αέρα 4% ενώ στην υπέρυθη θέρμανση έως και 15% και αυξάνουν και για τα δύο συστήματα θέρμανσης έως και 50% οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας (σχήμα 3-15 και 3-16). Το ποσοστό του ενεργειακού οφέλους που προκύπτει για το σύστημα υπέρυθρης θέρμανσης σε σχέση με το σύστημα θερμού αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής επίσης δεν μεταβάλλεται καθόλου και κυμαίνεται από 42-45%. Κατόπιν τούτων εκτιμάται ότι οποιαδήποτε θερμοκρασία ουρανού επιλεγεί δεν επηρεάζει την σύγκριση των συστημάτων θέρμανσης

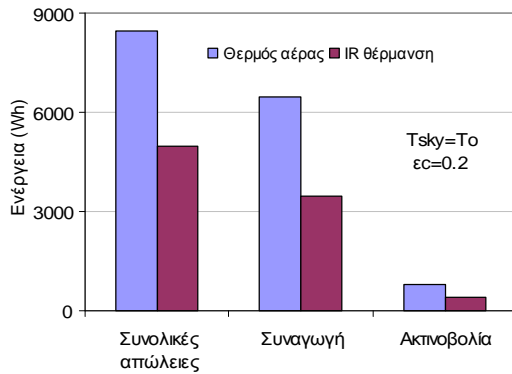


Σχήμα 3-12: Συνολικές απώλειες θερμοκηπίου και απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας καλύμματος.

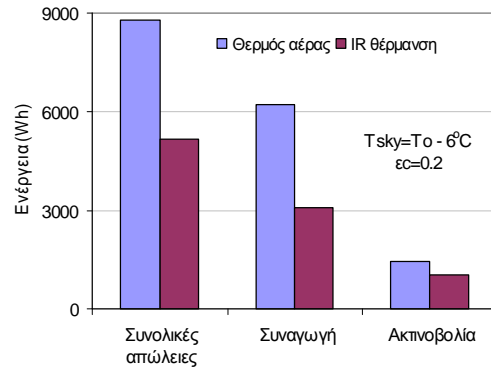
Σχήμα 3-13: Συνολικές απώλειες θερμοκηπίου και απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας καλύμματος.



Σχήμα 3-14: Επίδραση της θερμοκρασίας ουρανού στα προβλεπόμενα ενεργειακά οφέλη από την χρήση υπέρυθρης θέρμανσης.



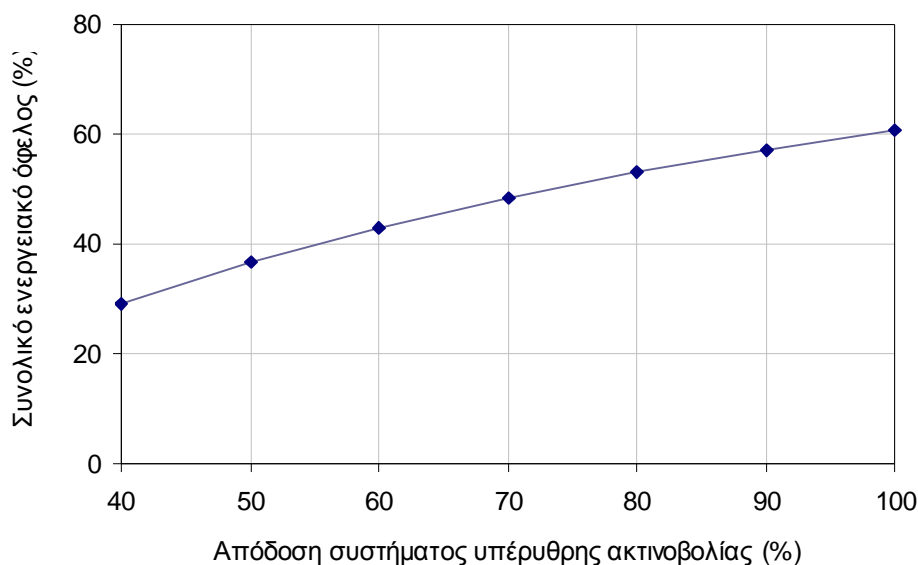
Σχήμα 3-15: Συνολικές απώλειες θερμοκηπίου και απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας καλύμματος



Σχήμα 3-16: Συνολικές απώλειες θερμοκηπίου και απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας καλύμματος

3.6.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (N) ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΣΕ IR

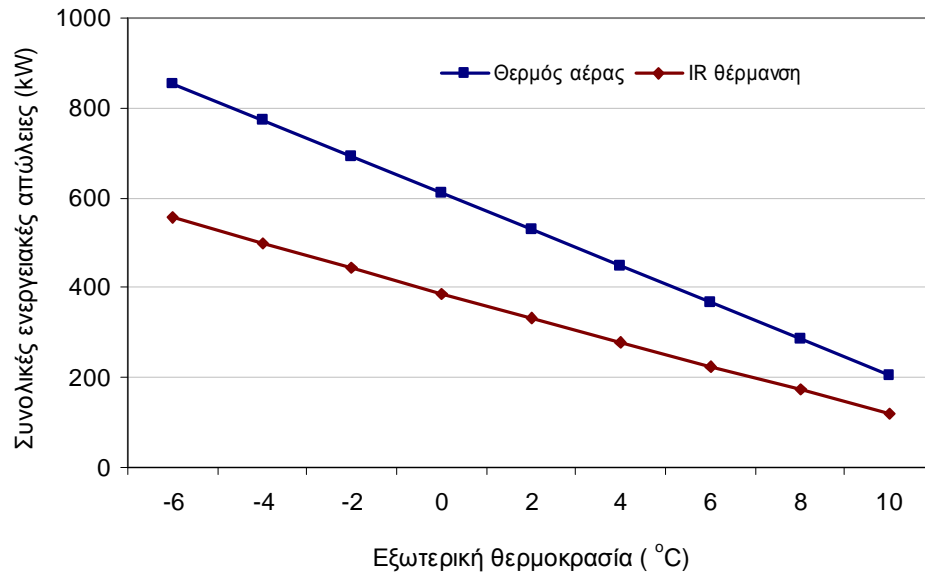
Το μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιείται σε παραμετρική μελέτη για να εκτιμηθούν τα δυνητικά ενεργειακά οφέλη από πηγές υπέρυθρης ακτινοβολίας με βελτιωμένο συντελεστή απόδοσης (η). Το βασικό χαρακτηριστικό των διαφόρων πηγών υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι η απόδοση υπέρυθρης ακτινοβολίας n , δηλαδή το ποσοστό της καταναλωμένης ηλεκτρικής ενέργειας (ή άλλης μορφής ενέργειας) που αποδίδεται ως ακτινοβολία. Στο κεφάλαιο 4 (Συστήματα θέρμανσης) για τους λαμπτήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα ο συντελεστής απόδοσής τους έχει καθοριστεί από αναλυτικές μετρήσεις σε $n=60\%$. Συνεπώς η παραμετρική μελέτη γίνεται για ένα εύρος απόδοσης $\eta=40-100\%$, για αντιπροσωπευτική εξωτερική θερμοκρασία $T_o=0\text{ }^\circ\text{C}$, ταχύτητα ανέμου $u=1\text{ m s}^{-1}$ και θερμοκρασία φυτών $T_p=15\text{ }^\circ\text{C}$. Τα αποτελέσματα (σχήμα 3-17) δείχνουν το ποσοστό του ενεργειακού οφέλους που επιτυγχάνεται ως συνάρτηση του συντελεστή απόδοσης των συστημάτων υπέρυθρης θέρμανσης. Είναι εμφανές ότι η υπέρυθη θέρμανση IR θα γίνει σημαντικά ελκυστικότερη με τη διαθεσιμότητα βελτιωμένων πηγών ως προς τον συντελεστή απόδοσης.



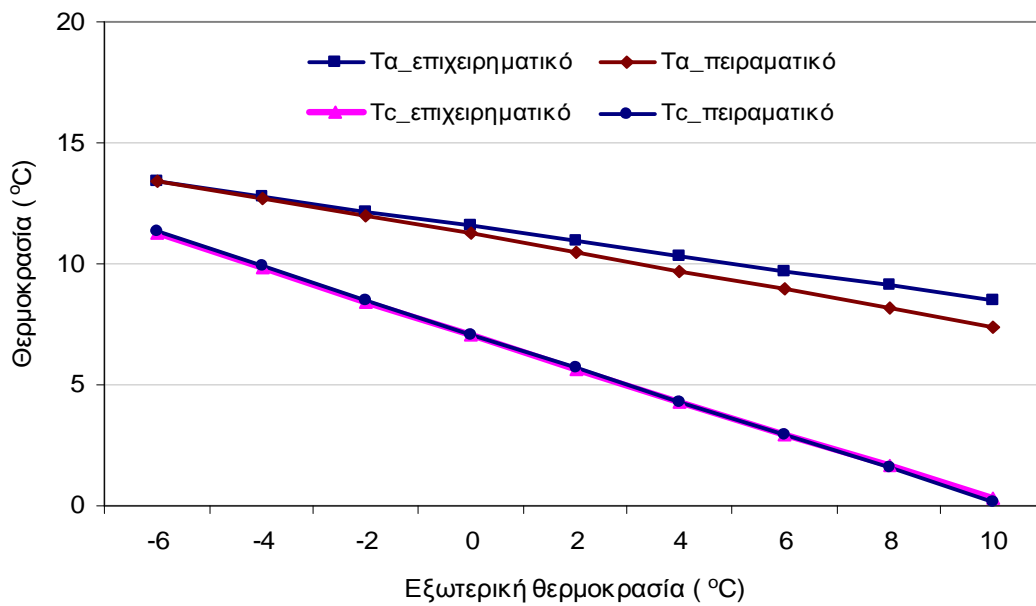
Σχήμα 3-17: Επίδραση του συντελεστή απόδοσης των πηγών υπέρυθρης θέρμανσης στα προβλεπόμενα ενεργειακά οφέλη από την χρήση υπέρυθρης θέρμανσης.

3.6.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΟΥ ΟΦΕΛΟΥΣ ΣΕ ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

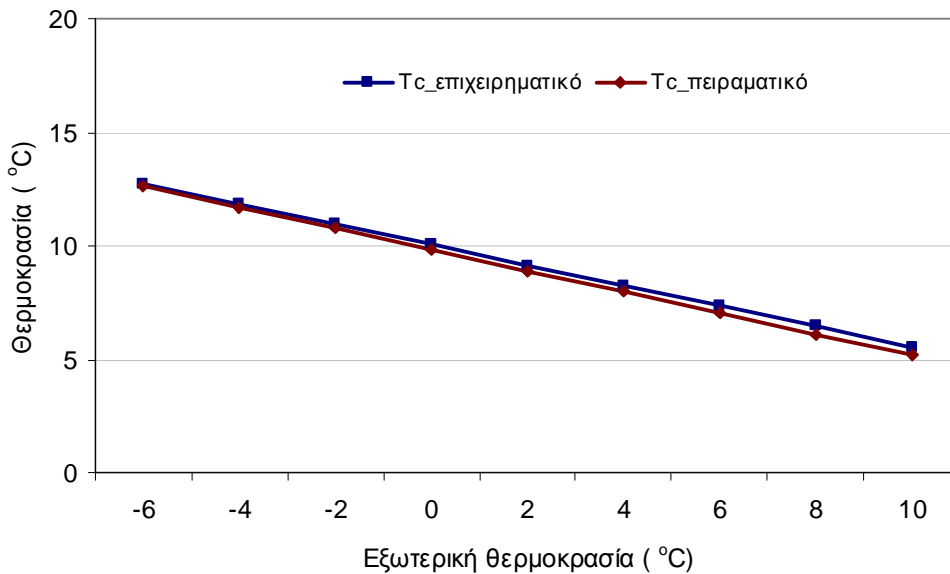
Για να εκτιμηθεί το αναμενόμενο ενεργειακό όφελος από την χρήση της τεχνολογίας θέρμανσης με ακτινοβολία το θεωρητικό μοντέλο χρησιμοποιείται σε επιχειρηματικό θερμοκήπιο έκτασης 4στρ. για της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα και καλύμματος πρόβλεψη και των συνολικών ενεργειακών απωλειών. Οι υπολογισμοί γίνονται για ένα εύρος θερμοκρασιών εξωτερικού περιβάλλοντος από $-6 - 10^{\circ}\text{C}$, μια αντιπροσωπευτική ταχύτητα ανέμου 1 ms^{-1} και για υλικό κάλυψης με $\varepsilon_c=0.2$. Η επιθυμητή θερμοκρασία των φυτών είναι $T_p=15^{\circ}\text{C}$. Το επιχειρηματικό θερμοκήπιο έχει συνολικό μήκος 100m και αποτελείται από 4 κατασκευαστικές μονάδες με άνοιγμα αψίδων εκάστη 9.60 m, ύψος ορθοστάτη 4 m και συνολικό ύψος ως την κορυφή 6.50m. Η επιφάνεια καλύμματος είναι $A_c=5533\text{ m}^2$, η επιφάνεια θερμοκηπίου είναι $A_p=3840\text{ m}^2$, και ο όγκος θερμοκηπίου είναι $V=20160\text{ m}^3$. Στο σχήμα 3.18 αποτυπώνονται οι συνολικές ενεργειακές απώλειες έτσι όπως διαμορφώνονται για κάθε σύστημα θέρμανσης που χρησιμοποιείται. Στο σχήμα 3-19 και 3.20 παρουσιάζονται οι προβλέψεις της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα και καλύμματος στο πειραματικό και επιχειρηματικό θερμοκήπιο με χρήση υπέρυθρης θέρμανσης και θερμού αέρα αντίστοιχα. Οι προβλεπόμενες τιμές παρουσιάζουν εξαιρετικά καλή προσέγγιση.



Σχήμα 3-18: Προβλεπόμενες ενεργειακές απώλειες σε επιχειρηματικό θερμοκήπιο με χρήση υπέρυθρης θέρμανσης και θερμού αέρα αντίστοιχα.

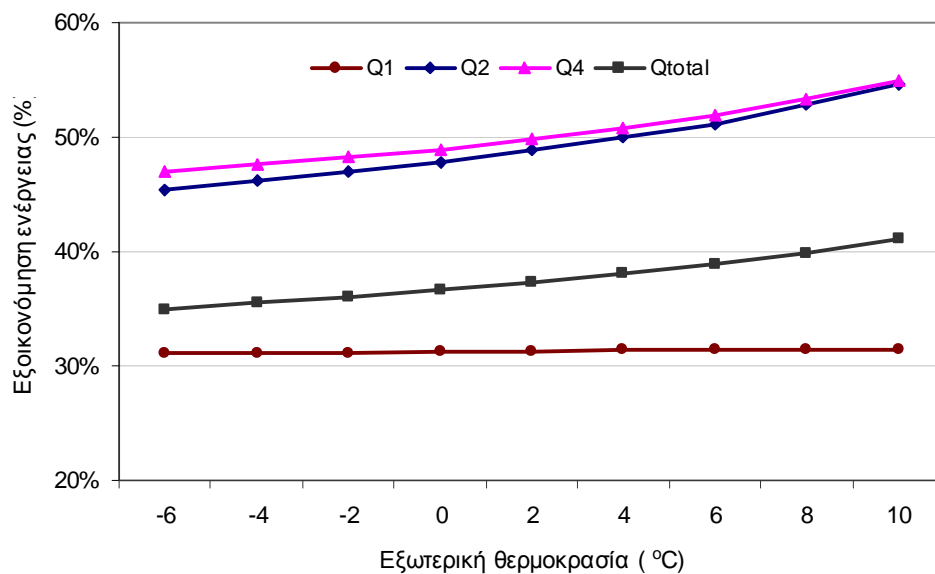


Σχήμα 3-19: Προβλεπόμενες θερμοκρασίες εσωτερικού αέρα και καλύμματος στο πειραματικό και επιχειρηματικό θερμοκήπιο αντίστοιχα με χρήση υπέρυθρης θέρμανσης.



Σχήμα 3-20: Προβλεπόμενες θερμοκρασίες εσωτερικού καλύμματος στο πειραματικό και επιχειρηματικό θερμοκήπιο αντίστοιχα με χρήση θερμού αέρα .

Στο σχήμα 3.21 παρουσιάζεται η εξοικονόμηση ενέργειας για κάθε κατηγορία ενεργειακών απωλειών (Q_1 ενεργειακές απώλειες λόγω διαφυγών, Q_2 απώλειες συναγωγής από το κάλυμμα και Q_3 απώλειες ακτινοβολίας από το κάλυμμα) καθώς και το συνολικό ενεργειακό όφελος (Q_{Total}). Παρατηρείται ότι ενώ η επιμέρους εξοικονόμηση ενέργειας σε κάθε κατηγορία ενεργειακών απωλειών είναι υψηλή, η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας κυμαίνεται από 35-42%. Αυτή η μείωση εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με το πειραματικό που κυμαίνεται από 40-50% εκτιμάται ότι οφείλεται στην μεγάλη αναλογία ενεργειακών απωλειών από το έδαφος που και στους δύο τύπους θερμοκηπίων παραμένουν ίδιες.



Σχήμα 3-21: Επιμέρους εκτιμώμενα ενεργειακά οφέλη και συνολικό ενεργειακό όφελος σε επιχειρηματικό θερμοκήπιο με χρήση υπέρυθρης θέρμανσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι πειραματικές εγκαταστάσεις που κατασκευάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα της θερμικής βελτιστοποίησης του θερμοκηπίου με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας και η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Οι πειραματικές εγκαταστάσεις αποτελούνται από δύο πειραματικά θερμοκήπια που είναι εξοπλισμένα με πλήρη συστήματα μετρήσεων, καταγραφής και ελέγχου καθώς και με αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό. Ο εξοπλισμός αυτός διασφαλίζει την λεπτομερή καταγραφή των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την λειτουργία και επιτρέπουν την αξιολόγηση των συστημάτων θέρμανσης που χρησιμοποιούνται, δηλ. συμβατικό σύστημα και υπέρυθρη ακτινοβολία αντίστοιχα. Τα πειράματα περιλαμβάνουν συστηματικές μετρήσεις και καταγραφή των παραμέτρων εκείνων που καθορίζουν το εσωτερικό μικροκλίμα του θερμοκηπίου. Οι εξωτερικές κλιματολογικές συνθήκες καταγράφονται στον μετεωρολογικό σταθμό των θερμοκηπίων που είναι εξοπλισμένος με τους κατάλληλους αισθητήρες. Η ανάπτυξη αυτών των πειραματικών διατάξεων κρίθηκε απαραίτητη για: (i) την πιστοποίηση των δυνατοτήτων της υπέρυθρης θέρμανσης και (ii) την βελτίωση και πιστοποίηση του μοντέλου με σκοπό την πλήρη παραμετρική διερεύνηση και βελτίωση του σχεδιασμού.

4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν πιλοτικά 2 πειραματικά θερμοκήπια. Ο τεχνολογικός σχεδιασμός των θερμοκηπίων έγινε με σκοπό την βέλτιστη μηχανική αντοχή τους, την επίτευξη του άριστου περιβάλλοντος στο υπέργειο τμήμα των φυτών και τη δυνατότητα χρήσης του κατάλληλου εξοπλισμού πειραματικών μετρήσεων και συστημάτων αυτοματισμού, ώστε να επιτυγχάνεται ο καλύτερος έλεγχος των συνθηκών μικροκλίματος του εσωτερικού περιβάλλοντος.

4.1.1 ΔΟΜΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Τα πειραματικά θερμοκήπια είναι αμφίρρικτου τύπου απλής γραμμής, αποτελούμενα από μια κατασκευαστική μονάδα έκαστο, προηγμένης τεχνολογίας και κατασκευασμένα από υλικά υψηλής ποιότητας. Αμφίρρικτο απλό είναι το θερμοκήπιο που σχηματίζεται με την κατά μήκος επανάληψη της κατασκευαστικής μονάδας και Βασική κατασκευαστική μονάδα του θερμοκηπίου είναι το μικρότερο πλήρες τμήμα του, το οποίο επαναλαμβάνομενο κατά μήκος (απλό) και κατά πλάτος (πολλαπλό) σχηματίζει το σύνολο.

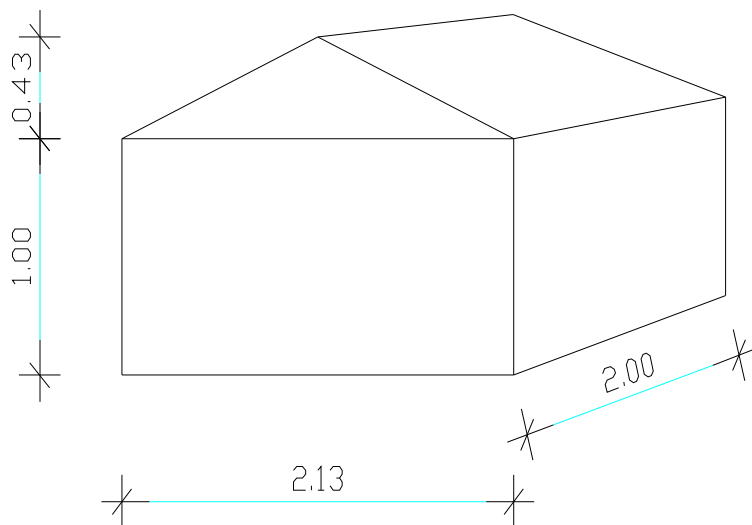
4.1.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Τα πειραματικά θερμοκήπια σχεδιάστηκαν υπό κλίμακα με αναφορά ένα πραγματικό παραγωγικό θερμοκήπιο και έχουν μήκος **2m**, πλάτος **2.13m**, ύψος υδρορροής **1m**, συνολικό ύψος ως την κορυφή **1.50m** και γωνία κλίσης της στέγης **25°** (σχήμα 4-1). Η επιφάνεια καλύμματος είναι $A_c=14.05 \text{ m}^2$, η επιφάνεια θερμοκηπίου είναι $A_p=4.26 \text{ m}^2$, και ο όγκος θερμοκηπίου είναι $V=5.33 \text{ m}^3$.

Ο σχεδιασμός των πειραματικών θερμοκηπίων έχει λάβει υπόψη αρκετούς παράγοντες, όπως την ομοιότητα με πραγματικά παραγωγικά θερμοκήπια, την εισαγωγή και τοποθέτηση του απαραίτητου εξοπλισμού πειραματικών μετρήσεων και τις καλλιεργητικές διαδικασίες για την αποτελεσματική ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών. Χρησιμοποιήθηκε ως θερμοκήπιο αναφοράς ένα πραγματικό παραγωγικό υαλόφρακτο θερμοκήπιο, τυπικό για την γεωγραφική περιοχή των πειραματικών θερμοκηπίων με μήκος **25 m**, πλάτος κατασκευαστικής μονάδας **6.4 m** και ύψος **5.3 m**. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πειραματικών θερμοκηπίων συγκρίνονται και οδηγούν σε ικανοποιητικές σχέσεις ως προς το θερμοκήπιο αναφοράς που έχει επιφάνεια καλύμματος **432 m²**, επιφάνεια εδάφους **160 m²** και όγκο **744 m³**. Οι αντίστοιχα λόγοι χαρακτηριστικών μηκών ($A^{1/2}$, $V^{1/3}$) είναι της τάξεως **5.2–6.1**, ενώ ο λόγος του καλύμματος προς την επιφάνεια εδάφους είναι **2.7** για το θερμοκήπιο αναφοράς και **3.3** για τα πειραματικά (πίνακας 4-1).

Πίνακας 4-1: Διαστασιολόγηση πειραματικών θερμοκηπίων

	Κανονικό παραγωγικό θερμοκήπιο	Τροποποιημένο πειραματικό θερμοκήπιο
Πλάτος κατασκ. μονάδας	6.40 m	2.13 m
Μήκος θερμοκηπίου	25 m	2.00 m
Συνολικό ύψος	5.30 m	1.50 m
Επιφάνεια καλύμματος	432 m²	14.05 m²
Επιφάνεια θερμοκηπίου	160 m²	4.26 m²
Όγκος θερμοκηπίου	744 m³	5.33 m³
Λόγοι χαρακτηριστικών μηκών		
Μήκους	6.124	
Επιφάνειας	5.547	
Όγκου	5.18	
Βάση/ κάλυμμα παραγωγικού	2.70	
Βάση/ κάλυμμα πειραματικού	3.29	



Σχήμα 4-1: Κατασκευαστική μονάδα θερμοκηπίου.

4.1.3 ΥΛΙΚΑ ΣΚΕΛΕΤΟΥ

Ο σκελετός των θερμοκηπίων είναι κατασκευασμένος από αλουμίνιο. Το αλουμίνιο επιλέχθηκε γιατί παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Δημιουργεί πολύ ελαφρότερα στοιχεία σκελετού λόγω του μικρού ειδικού βάρους και συνεπώς μικρού βάρους κατασκευής
- Οι διατομές είναι μικρές, η ανακλαστική επιφάνεια μικρότερη, γεγονός που ευνοεί τη φωτεινότητα του χώρου
- Κατασκευάζεται και αυτοματοποιείται εύκολα ο παθητικός εξαερισμός, γιατί δίνει ελαφρότερα πλαίσια που δεν δημιουργούν προβλήματα λειτουργίας
- Τα διάφορα σκελετικά στοιχεία στα οποία τοποθετούνται οι υαλοπίνακες, διαμορφώνονται με εξώθηση και μπορούν να κατασκευαστούν σε πολύπλοκες διατομές, ικανές να δώσουν καλή στεγανότητα στο θερμοκήπιο και αποκομιδή του νερού συμπύκνωσης.
- Η στερέωση των υαλοπινάκων είναι εύκολη και ασφαλής.
- Δεν διαβρώνεται στο περιβάλλον του θερμοκηπίου, δεν χρειάζεται σχεδόν καθόλου συντήρηση, έχει μεγάλη διάρκεια ζωής.

Το αλουμίνιο που χρησιμοποιείται στις θερμοκηπιακές κατασκευές είναι συνήθως κράμα αλουμινίου, γιατί το καθαρό αλουμίνιο δεν έχει μεγάλη στιβαρότητα. Τα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στα θερμοκήπια περιέχουν συνήθως περισσότερο από **96-99%** αλουμίνιο και συνήθως κάποιο από τα: χαλκό, μαγγάνιο, πυρίτιο, μαγνήσιο και πυρίτιο μαζί, ψευδάργυρο, λίθιο, νικέλιο και μαγνήσιο μαζί.

4.1.4 ΥΛΙΚΑ ΚΑΛΥΨΗΣ

Ως υλικό κάλυψης των θερμοκηπίων χρησιμοποιούνται πλάκες θερμικώς ενισχυμένου υαλοπίνακα (**heat-strengthened**), χαμηλής εκπομπής (**Low-E**) και πάχους **3 mm**, που στηρίζονται περιμετρικά στα πλαίσια αλουμινίου. Αυτή η τοποθέτηση εκμηδενίζει τα προβλήματα στεγανότητας που εμφανίζονται στα υαλόφρακτα θερμοκήπια και οφείλονται στην κακή επαφή που παρουσιάζεται σταδιακά στα σημεία στήριξης του υαλοπίνακα στο σκελετό.

Το γυαλί λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της δομής του είναι το καταλληλότερο υλικό για πειραματισμό. Οι φυσικές του ιδιότητες είναι:

- άμορφο υλικό μη κρυσταλλικής δομής
- στερεό υψηλής σκληρότητας
- διαφανές, με υψηλή περατότητα στην ηλιακή ακτινοβολία (ορατό φως)
- Δεν μεταβάλλει τις οπτικές του ιδιότητές με την πάροδο του χρόνου
- χημικά και βιολογικά αδρανές
- μονωτικό υλικό
- εύθραυστο
- πλήρως ανακυκλώσιμο υλικό

Το κύριο μειονέκτημα που παρουσιάζει το κοινό (**annealed**) γυαλί είναι ότι είναι εύθραυστο υλικό, αφού μπορεί να αντέξει μόνο μικρά φορτία εφελκυσμού που είναι δυνατόν να αναπτυχθούν στην επιφάνειά του, είτε από φορτία που προκαλούν κάμψη είτε από αλλαγές της θερμοκρασίας. Οι ιδιότητες του κοινού γυαλιού βελτιώνονται, ενισχύοντας τα μηχανικά χαρακτηριστικά του με θερμική επεξεργασία που προσδίδει μεγαλύτερου βαθμού μηχανική και θερμική αντοχή. Το γυαλί θερμαίνεται πρώτα σε περίπου **600 °C** και μετά ψύχεται απότομα (πλήρης σκλήρυνση) ή πιο αργά (θερμική ενίσχυση) και στις δύο περιπτώσεις όμως με προσεκτικά ελεγχόμενη ταχύτητα ψύξης. Αυτές οι επεξεργασίες επιβάλλουν στην επιφάνεια του γυαλιού παραμένουσες τάσεις δίνοντας στο γυαλί ειδικά χαρακτηριστικά, όπως 2πλάσια (θερμικώς ενισχυμένο, **heat-strengthened**) ή 5πλάσια αντίσταση (θερμικώς σκληρυμένο, **toughened** ή **tempered**) σε μηχανικό και θερμικό σοκ σε σχέση με το κοινό γυαλί. Έτσι, το γυαλί προστατεύεται από θραύση που προκαλείται από υψηλή θερμοκρασιακή διαφορά στην επιφάνεια του (έντονη ηλιοφάνεια ή σκίαση). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τύπους γυαλιού με υψηλή ενεργειακή απορρόφηση που εκτίθενται στην ηλιακή ακτινοβολία. Η χρήση τέτοιων υαλοπινάκων στα θερμοκήπια με αυξημένες φυσικές ιδιότητες και μηχανικές αντοχές έχει ελαχιστοποιήσει το ικανό και αναγκαίο πάχος τους, καθιστώντας το θερμοκήπιο ανθεκτικό σε μεγάλες καταπονήσεις (υψηλά φορτία ανεμοπίεσης, θερμικά φορτία).

Μια ιδιαίτερα χρήσιμη ιδιότητα του γυαλιού είναι η αδράνεια, εξαιτίας της οποίας δύσκολα μεταβάλλει τη χημική του σύσταση ή αντιδρά με άλλες ουσίες. Η άμορφη φύση του γυαλιού που είναι σαν ένα «υπερψυχθέν υγρό», αντίθετα από τα άλλα στερεά, έχει ως αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια των μορίων του γυαλιού να μην μπορούν να μεταπηδούν σε άλλες στιβάδες και να επανέρχονται απορροφώντας ή εκπέμποντας ακτινοβολία φάσματος ορατού και κοντινού υπέρυθρου. Επομένως δεν απορροφούν ή εκπέμπουν μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία (**190-3000 nm**),

αντίθετα, η ενέργεια περνά μέσα από τα μόρια σαν να μην υπήρχαν με αποτέλεσμα το γυαλί να παρουσιάζει πολύ καλές ραδιομετρικές ιδιότητες (πίνακας 4-2). Πιο συγκεκριμένα, έχει πολύ καλή περατότητα στην ορατή ακτινοβολία (**380-700 nm**) και την κοντινή υπέρυθρη (**700-800 nm**), ενώ απορροφά ένα μεγάλο ποσοστό της υπεριώδους ακτινοβολίας (**190-380 nm**). Αντίθετα είναι ελάχιστα περατό στη θερμική ακτινοβολία που εκπέμπουν όλες οι επιφάνειες που περιβάλλονται από γυαλί, εκδηλώνοντας έτσι την γνωστή "ιδιότητα του θερμοκηπίου".

Στις σύγχρονες επιχειρηματικές καλλιέργειες το υλικό κάλυψης που χρησιμοποιείται είναι κυρίως γυαλί σε δύο τύπους, το τυπικό γυαλί (**standard**) και το γυαλί χαμηλής εκπομπής ακτινοβολίας (**Low-E**). Οι ραδιομετρικές ιδιότητες αυτών των δύο τύπων γυαλιού που ενδιαφέρουν την παρούσα εργασία όπως ο συντελεστής εκπομπής (ϵ_c) αναφέρονται στον πίνακα 4-2.

Πίνακας 4-2: Ραδιομετρικές ιδιότητες διαφόρων τύπων γυαλιού

	Τυπικό γυαλί (Standard)	Γυαλί χαμηλής εκπομπής (Low-E)
Συντελεστής εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας εξωτερικής επιφάνειας, ϵ_{cc}	0.90	0.20
Συντελεστής εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας εσωτερικής επιφάνειας, ϵ_{ci}	0.90	0.90
Συντελεστής ανάκλασης θερμικής ακτινοβολίας εξωτερικής επιφάνειας, ρ_{cc}	0.10	0.80
Συντελεστής ανάκλασης θερμικής ακτινοβολίας εσωτερικής επιφάνειας, ρ_{ci}	0.10	0.10
Συντελεστής περατότητας θερμικής ακτινοβολίας, τ	0.00	0.00

4.1.5 ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ

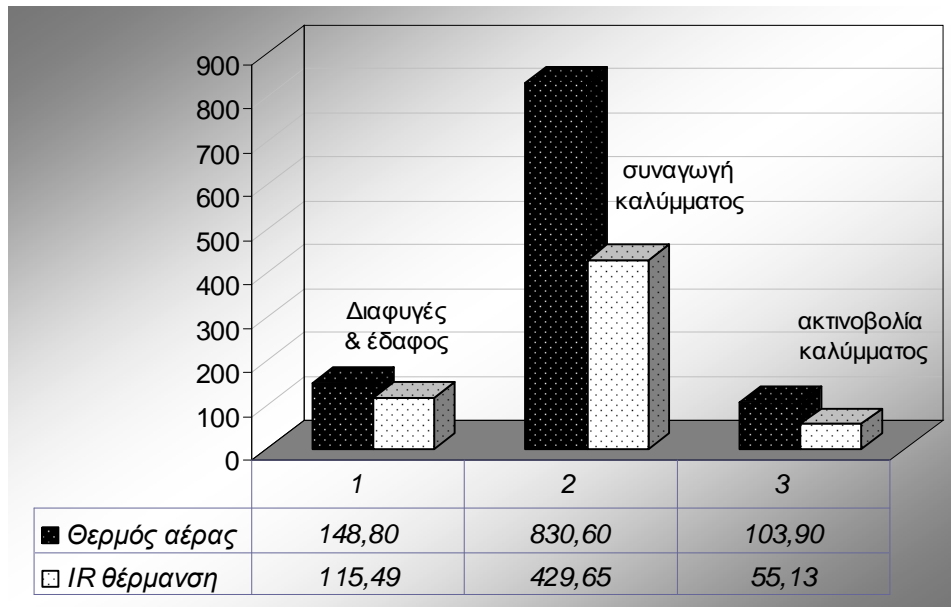
Τα πειραματικά θερμοκήπια εδράζονται επί κατάλληλης θεμελίωσης η οποία συνίσταται από περιμετρικό κράσπεδο οπλισμένου σκυροδέματος ορθογωνικής διατομής **0.40m x 0.40 m**. Μετά την τοποθέτηση των θερμοκηπίων επί των κρασπέδων, τα θερμοκήπια αγκυρώθηκαν με συνδέσμους (αναμονές) που είχαν εγκιβωτιστεί στο σκυρόδεμα των κρασπέδων. Έτσι επιτεύχθηκε σταθερή και μόνιμη αγκύρωση των θερμοκηπίων επί της θεμελίωσης.

4.1.6 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Αριθμός εναλλαγών του αέρα (N): Τα πειραματικά θερμοκήπια είναι νέες σταθερές υαλόφρακτες κατασκευές και βρίσκονται σε περιοχή που χαρακτηρίζεται από χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Γιαυτό επιλέγεται ως αριθμός εναλλαγών του αέρα $N = 1$. Η στεγανότητα της όλης κατασκευής είναι πολύ καλύτερη από τον μέσο όρο και το μοναδικό άνοιγμα οροφής λειτουργεί κατά την διάρκεια της ημέρας εφόσον οι καιρικές συνθήκες το επιβάλλουν, αλλά δεν ανοίγει ποτέ κατά την διάρκεια της θερμικής νύχτας.

Μέγιστες Θερμικές απαιτήσεις (Q_{total}): για τον υπολογισμό της ισχύος των δύο συστημάτων θέρμανσης που επελέγησαν για τα πειραματικά θερμοκήπια, ώστε να παρέχεται η δυνατότητα ικανοποιητικής ρύθμισης της θερμοκρασίας τους, εκτιμήθηκαν οι μέγιστες απώλειες των θερμοκηπίων σε θερμότητα στην μονάδα του χρόνου. Οι μέγιστες απώλειες συνήθως συμβαίνουν την νύχτα, όταν η εξωτερική θερμοκρασία φτάσει την ελάχιστη τιμή της. Το κάθε σύστημα θέρμανσης θα πρέπει να καλύπτει πλήρως αυτές τις απώλειες.


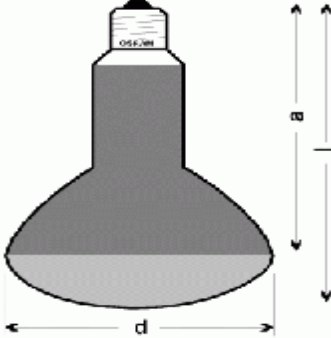

Για να εκτιμηθεί η μέγιστη απαίτηση θερμότητας του κάθε πειραματικού θερμοκηπίου, χρησιμοποιείται το θεωρητικό μοντέλο προσομοίωσης που έχει αναπτυχθεί στο κεφάλαιο 3, για κάθε περίπτωση συστήματος θέρμανσης. Οι υπολογισμοί γίνονται για την μέση ελάχιστη θερμοκρασία του δυσμενέστερου μήνα της θερμικής περιόδου, αλλά επειδή στις περισσότερες των περιπτώσεων λαμβάνεται $T_o=0$ °C, το ίδιο θα χρησιμοποιηθεί για τους υπολογισμούς. Στην γεωγραφική περιοχή των θερμοκηπίων ο δυσμενέστερος μήνας είναι ο Ιανουάριος με μέση ελάχιστη θερμοκρασία $T_o=6$ °C. Λαμβάνεται μια μέση αντιπροσωπευτική ταχύτητα ανέμου της γεωγραφικής περιοχής $WS=1m/sec$ και επιθυμητή θερμοκρασία των φυτών $T_p=15$ °C. Οι εκτιμήσεις του μοντέλου απεικονίζονται στο σχήμα 4-2 και επιμερίζονται σε τρεις κατηγορίες: (i) ενεργειακές απώλειες λόγω διαφυγών και μέσω μετάδοσης με αγωγή προς το έδαφος, (ii) λόγω συναγωγής από το κάλυμμα και (iii) λόγω ακτινοβολίας από το κάλυμμα. Η πραγματική ισχύς των συστημάτων θέρμανσης πρέπει να είναι ίση με την μέγιστη απαιτούμενη θερμότητα στην μονάδα του χρόνου. Επομένως η ονομαστική ισχύς τους πρέπει να είναι αυξημένη κατά ένα ποσοστό που είναι αντιστρόφως ανάλογο με τον βαθμό απόδοσης των συστημάτων.



Σχήμα 4-2: Μέγιστες ενεργειακές απώλειες (W) σε θερμότητα των θερμοκηπίων.

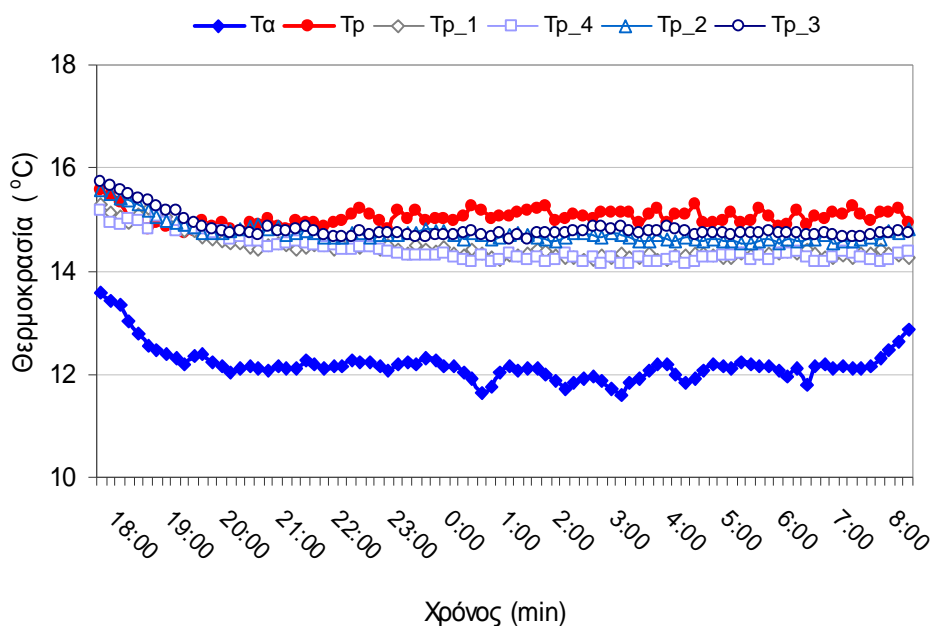
4.1.7 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Τα δύο συστήματα θέρμανσης που χρησιμοποιούνται αντίστοιχα στα θερμοκήπια είναι αερόθερμο εξαγωγής θερμού αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής και λαμπτήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η επιλογή των τεχνικών χαρακτηριστικών των συστημάτων θέρμανσης έγινε σύμφωνα με τις μέγιστες ενεργειακές απαιτήσεις των πειραματικών θερμοκηπίων όπως αυτές προσδιορίστηκαν στην ενότητα 4.1.6 (Λειτουργικά χαρακτηριστικά θερμοκηπίου). Το αερόθερμο εξαγωγής θερμού αέρα είναι 3 επιπέδων λειτουργίας ονομαστικής ισχύος 1.0, 1.2 και 2 kW αντίστοιχα, με παράλληλη χρήση ανεμιστήρα ανάμιξης του θερμού αέρα για αποφυγή στρωμάτωσης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Η υπέρυθρη θέρμανση προσφέρεται από 4 λαμπτήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας ονομαστικής ισχύος 250W έκαστος με ενσωματωμένο εσωτερικό ανακλαστήρα (εικόνα 4-α). Χρησιμοποιώντας την τάση του ηλεκτρικού δικτύου της περιοχής και την ένταση του διερχόμενου ρεύματος υπολογίστηκε η πραγματική ισχύς του αερόθερμου που είναι 950 W (στο επίπεδο του 1 kW) και 1100 (στο επίπεδο του 1.2 kW) και των λαμπτήρων υπέρυθρης ακτινοβολίας που συνολικά είναι 850 W.

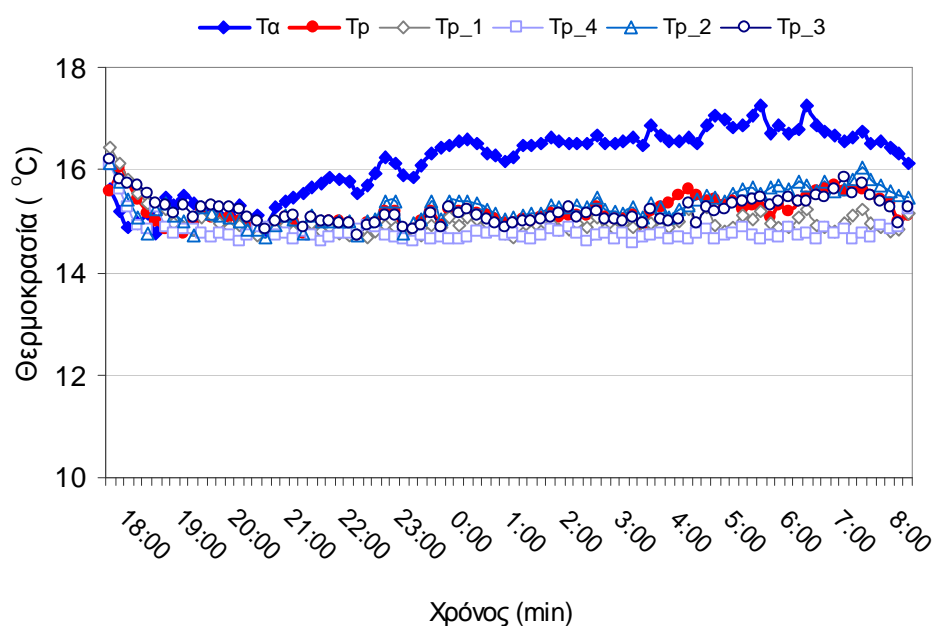
		
<p>Διαστάσεις: 240x340x185 mm</p> <p>Ισχύς 3 επιπέδων: 1-1.2- 2 kW</p> <p>Παροχή: 200 m³/h</p> <p>Διατομή ανεμιστήρα εξαγωγής αέρα: 0.025 m²</p> <p>Ταχύτητα εξαγωγής αέρα: 2.20 m s⁻¹</p>	<p>Διάμετρος (d): 127 mm</p> <p>Ύψος (l): 185 mm</p> <p>Ισχύς: 250 W</p> <p>Δέσμη Γωνίας: 60°</p> <p>Θερμοκρασία εξωτερικής επιφανείας σε συνθήκες λειτουργίας: 80-100 °C</p>	<p>Διάμετρος (d): 250 mm</p> <p>Ύψος (l): 265 mm</p> <p>Υλικό κατασκευής: <i>αλουμίνιο</i></p> <p>Συντελεστής εκπομπής (ϵ_c): 0.2</p>

Εικόνα 4-α: Τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων θέρμανσης

Η λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης είναι αυτοματοποιημένη και ελέγχεται με βάση την θερμοκρασία αναφοράς (T_p). Για την καλλιέργεια που χρησιμοποιείται η θερμοκρασία αναφοράς είναι $T_p = 15 \pm 1^\circ\text{C}$. Από μετρήσεις στο θερμοκήπιο με υπέρυθρη θέρμανση μια τυπική χειμερινή νύχτα (18/01/09) με μέση νυχτερινή θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος $\bar{T}_{o_n} = 5.10^\circ\text{C}$, φαίνεται ότι η θερμοκρασία των φυτών είναι ομοιόμορφη στην κεντρική περιοχή του θερμοκηπίου (T_{p_2}, T_{p_3}) ενώ στις περιοχές κοντά στα τοιχώματα (T_{p_1}, T_{p_4}) είναι έως 1.5°C χαμηλότερη σε σχέση με την κεντρική περιοχή (σχήμα 4-3). Αντίστοιχα στο σχήμα 4-4 φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο που χρησιμοποιείται το αερόθερμο να έχει πολύ μικρότερη απόκλιση. Συνεπώς οι θερμοκρασίες του φυτικού θόλου μπορούν να αντιπροσωπεύονται από μία θερμοκρασία αναφοράς που λαμβάνεται στην μέση του θερμοκηπίου και που χρησιμοποιείται για τον όλο θερμικό έλεγχο του θερμοκηπίου. Οι θέσεις των $T_{p_1}, T_{p_2}, T_p(T_r), T_{p_3}$ και T_{p_4} απεικονίζονται στα σχήματα 4-9 και 4-10. Το σύστημα θέρμανσης τίθεται σε λειτουργία όταν η θερμοκρασία αναφοράς πέσει κάτω από 14°C και κλείνει όταν ξεπεράσει τους 16°C .

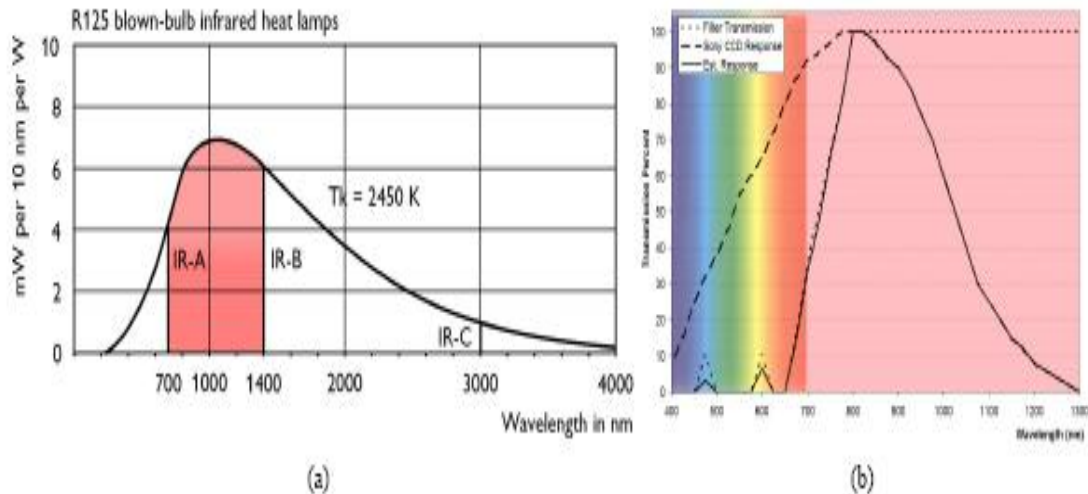


Σχήμα 4-3: Ομοιομορφία κατανομής θερμοκρασιών φυτικού θόλου με χρήση λαμπτήρων υπέρυθρης ακτινοβολίας



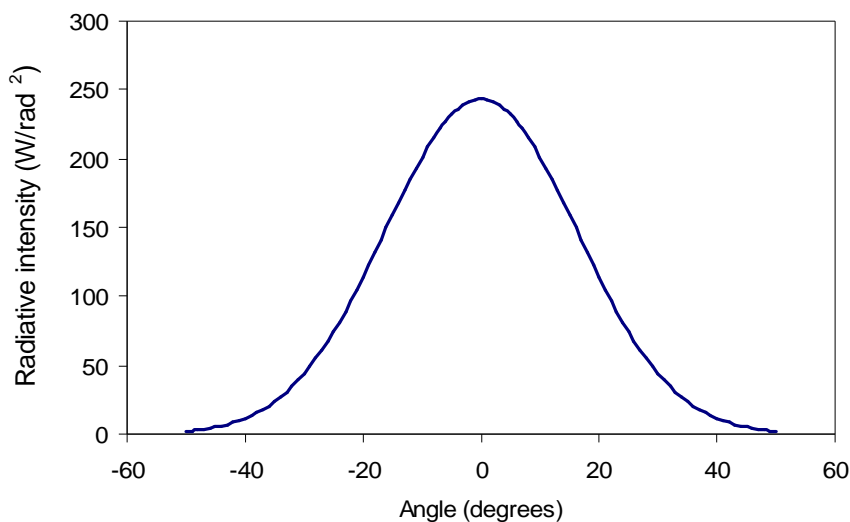
Σχήμα 4-4: Ομοιομορφία κατανομής θερμοκρασιών φυτικού θόλου με χρήση αερόθερμου θερμού αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής.

Οι λαμπτήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι κατασκευασμένοι από σκληρό γυαλί με υψηλή μηχανική αντοχή και αντίσταση σε θερμικά σοκ (εκτόξευση υδροσταγονιδίων). Οι λαμπτήρες εκπέμπουν στο κοντινό υπέρυθρο, **NIR (0.7-1.4.0 μm)** ένα υψηλό ποσοστό υπέρυθρης ακτινοβολίας και εκπέμπουν ένα χαμηλό ποσοστό στο φάσμα του ορατού φωτός (**0.3-0.4 μm**) (σχήμα 4-5).

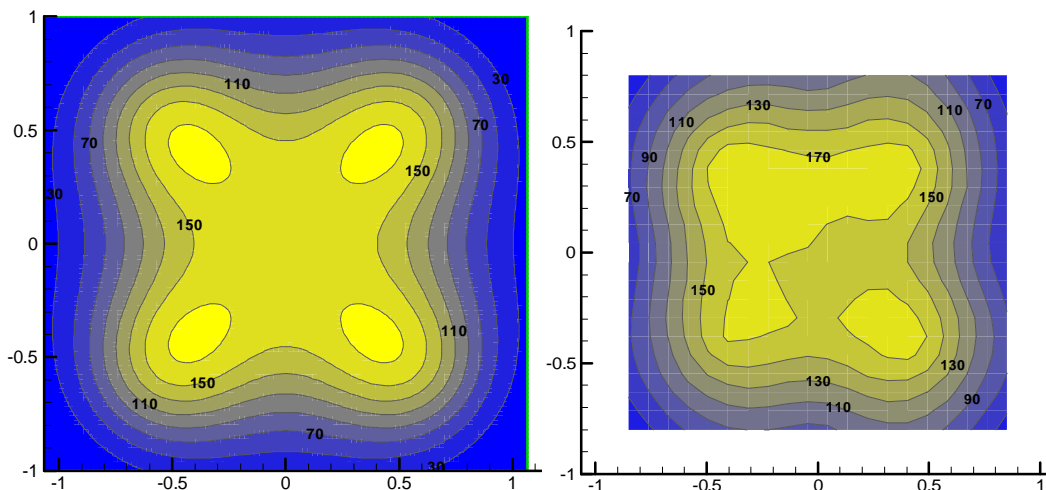


Σχήμα 4-5: Φασματική κατανομή του συστήματος υπέρυθρης ακτινοβολίας (<http://www.lighting.philips.com>)

Οι λαμπτήρες τοποθετήθηκαν στις τέσσερις γωνίες του θερμοκηπίου σε ύψος **1 m** πάνω από το έδαφος και εντός **4** ανακλαστήρων από κράμα αλουμινίου για πλήρη ακτινοβολή της υπέρυθρης ακτινοβολίας προς τον φυτικό θόλο και ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας των λαμπτήρων προς τα τοιχώματα του θερμοκηπίου. Η κατανομή της έντασης της υπέρυθρης ακτινοβολίας για ένα λαμπτήρα μετρήθηκε με πυρανόμετρο τύπου **thermopile (300–3000 nm)** σε απόσταση **1m** (σχήμα 4-6). Η συνολική ροή θερμότητας μέσα στο θερμοκήπιο παρουσιάζεται στο σχήμα 4-7 και δείχνει ένα ομοιόμορφο μοτίβο για μια μεγάλη περιοχή γύρω από το κέντρο του θερμοκηπίου, ενώ οι τιμές μειώνονται σε μια μικρή περιοχή κοντά στα τοιχώματα του θερμοκηπίου. Η θερμική ροή στο πρώτο διάγραμμα εκτιμήθηκε με το **Mathematica** με βάση τον προσανατολισμό και την κατανομή κάθε λαμπτήρα και στο δεύτερο διάγραμμα μετρήθηκε στο θερμοκήπιο με το **thermopile** πυρανόμετρο. Αυτή η κατανομή στην συνέχεια αποδείχτηκε και επαρκώς ομοιόμορφη για την καλλιέργεια των φυτών, τα οποία παρουσίασαν ομοιόμορφη ανάπτυξη μέσα στο θερμοκήπιο. Αναμένεται ότι σε μεγαλύτερα παραγωγικά θερμοκήπια που υπάρχουν περισσότερες σχεδιαστικές επιλογές για το πλήθος, την θέση και τον προσανατολισμό των πηγών θέρμανσης μπορούν να επιτευχθούν καλύτερες κατανομές της θερμικής ροής στον χώρο καλλιέργειας.



Σχήμα 4-6: Κατανομή έντασης υπέρυθρης ακτινοβολίας



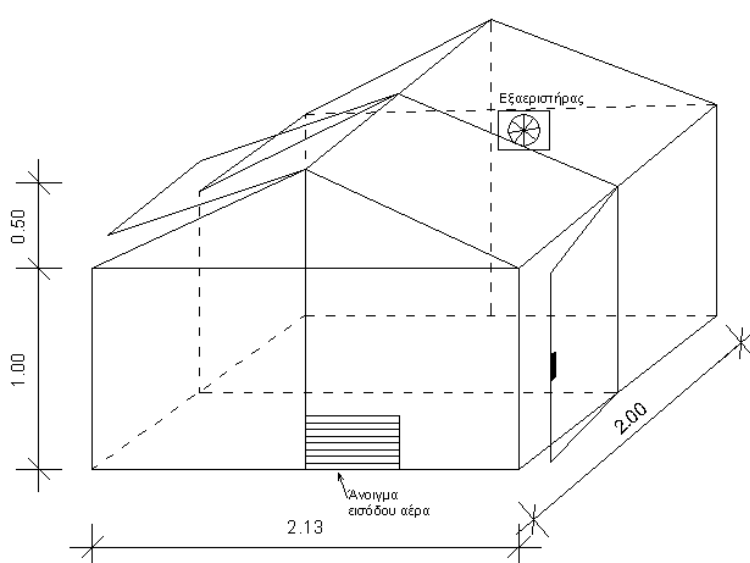
Σχήμα 4-7: Κατανομή της θερμικής ροής των λαμπτήρων (W/m^2) στο επίπεδο του φυτικού θόλου

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των λαμπτήρων υπέρυθρης ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται είναι η απόδοση υπέρυθρης ακτινοβολίας n . Ο βαθμός απόδοσης ορίζεται με βάση το ποσοστό της προσφερόμενης θερμότητας με ακτινοβολία που καταλήγει στα φυτά ώστε αυτά να διατηρηθούν στην επιθυμητή θερμοκρασία. Η ολοκλήρωση των πειραματικών δεδομένων της θερμικής κατανομής δίνει $n = 60\%$. Το υπόλοιπο 40% της εισερχόμενης ενέργειας χάνεται λόγω συναγωγής στον εσωτερικό αέρα του θερμοκηπίου, ποσοστό που λαμβάνεται υπόψη και μοντελοποιείται στο μοντέλο προσομοίωσης του ενεργειακού ισοζυγίου στο κεφάλαιο 3. Επειδή οι απώλειες λόγω συναγωγής των συστημάτων υπέρυθρης ακτινοβολίας $Q_{lamps,conv}$, μειώνουν την απόδοση του συστήματος, θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερες. Αυτό μπορεί να συμβεί σε εκείνα τα συστήματα υπέρυθρης ακτινοβολίας, που η εξωτερική τους επιφάνεια δεν θερμαίνεται σημαντικά κατά την λειτουργία τους. Στην παρούσα πειραματική διαδικασία οι λαμπτήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας αναπτύσσουν σχετικά χαμηλή θερμοκρασία εξωτερικής επιφάνειας σε συνθήκες πλήρους λειτουργίας που κυμαίνεται από $80-100\text{ }^\circ\text{C}$

4.1.8 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ

Τα πειραματικά θερμοκήπια διαθέτουν συστήματα φυσικού και δυναμικού εξαερισμού. Ο φυσικός εξαερισμός παρέχεται με ένα παράθυρο οροφής και ενισχυτικά και από ένα πλευρικό άνοιγμα (πόρτα). Το παράθυρο οροφής έχει ύψος 1.05 m , πλάτος 0.95 m και άνοιγμα 0.25 m , που επιτυγχάνεται με ειδικό μηχανισμό αλουμιένιας κρεμαριέρας. Η μετάδοση της κίνησης επιτυγχάνεται με ηλεκτρομειωτήρα. Η αυτοματοποίηση των ανοιγμάτων οροφής γίνεται με ηλεκτροκινητήρες που η εκκίνηση τους γίνεται με σύστημα αυτοματισμού. Για την λειτουργία του το σύστημα λαμβάνει υπόψη την καθορισμένη θερμοκρασία αναφοράς εντός των θερμοκηπίων, την ταχύτητα του πνέοντος ανέμου και την βροχόπτωση που δίνονται από τον μετεωρολογικό σταθμό των πειραματικών θερμοκηπίων. Το σύστημα φυσικού εξαερισμού τίθεται σε λειτουργία όταν η θερμοκρασία αναφοράς ξεπεράσει τους $23\text{ }^\circ\text{C}$ και να κλείνει όταν η θερμοκρασία αναφοράς πέσει κάτω από $20\text{ }^\circ\text{C}$ ή όταν η ταχύτητα ανέμου ξεπεράσει τα 6 ms^{-1} ή όταν υπάρχει βροχόπτωση.

Στην θερμική περίοδο και κατά την διάρκεια της ημέρας η θερμοκρασία ρυθμίζεται κυρίως από το άνοιγμα της οροφής, ώστε να προφυλάσσονται τα φυτά από τα ψυχρά ρεύματα, και καλύπτονται οι περίπου **40/h** αλλαγές του αέρα του θερμοκηπίου που απαιτούνται. Τα ανοίγματα φυσικού εξαερισμού κάποιες ημέρες στην αρχή και στο τέλος της θερμικής περιόδου (Νοέμβριο και Μάρτιο) επειδή μπορεί να υπάρχει έντονη ηλιοφάνεια και να απαιτούνται **60/h** αλλαγές του αέρα, δεν επαρκούν για τη μείωση της υψηλής θερμοκρασίας που επικρατεί στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Τότε για αποφυγή της υπερθέρμανσης του θερμοκηπίου εφαρμόζεται επιπλέον δυναμικός εξαερισμός που παρέχεται από έναν εξαεριστήρα $\Phi 120$, παροχής **90 m³/h** και ισχύος **16W**. Είναι εξαερισμός με υποπίεση, δηλαδή απομακρύνει τον αέρα από το εσωτερικό του θερμοκηπίου προς το εξωτερικό δημιουργώντας υποπίεση, οπότε φρέσκος αέρας εισέρχεται από το άνοιγμα εισόδου αέρα που βρίσκεται στην απέναντι πλευρά (σχήμα 4-8).



Σχήμα 4-8: Συστήματα φυσικού και δυναμικού εξαερισμού θερμοκηπίων

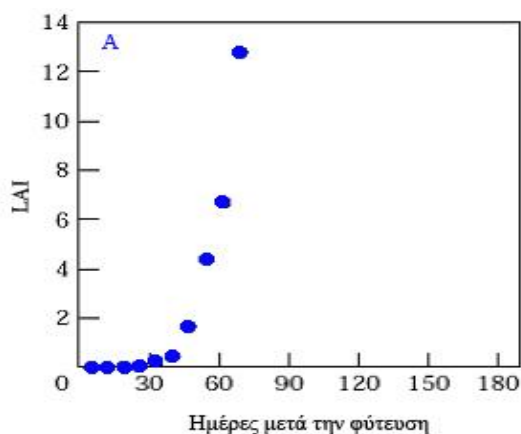
4.1.9 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ

Η πειραματική καλλιέργεια που χρησιμοποιείται είναι σπορόφυτα μαρουλιού (**Lactuca sativa L. var. Toledo**, τύπου **Romana**) με πυκνότητα φύτευσης **12 φυτά/m²**. Οι ποικιλίες διαφέρουν μεταξύ τους και εντός του τύπου όσο και οι διάφοροι τύποι μεταξύ τους, επομένως οι αποστάσεις φύτευσης διαμορφώνονται ανάλογα με την αναμενόμενη τελική ανάπτυξη του φυτού (ποικιλίας). Γενικά οι αποστάσεις φύτευσης είναι **30-40 cm** και προς τις δυο κατευθύνσεις ή **25-35 cm** επί της γραμμής και **30-50 cm** μεταξύ των γραμμών.

Το μαρούλι είναι ετήσιο ποώδες φυτό, με τελικό ύψος παραγόμενου φυτού **30 - 40 cm**, γρήγορης και σχετικά δισδιάστατης ανάπτυξης, με σχετικά μέτριες θερμικές απαιτήσεις. Καλλιεργείται στα θερμοκήπια από Νοέμβριο-Απρίλιο γιατί η ανάπτυξη

του γίνεται πιο γρήγορα, παράγεται προϊόν πολύ καλής ποιότητας και εκτός από την καλλιέργεια στο έδαφος παρέχεται η δυνατότητα της ανάπτυξης των φυτών σε υδροπονικές καλλιέργειες. Ο κύκλος ανάπτυξης εντός του θερμοκηπίου από την φύτευση έως την πλήρη ωρίμανση (DAE) διαρκεί 40-50 ημέρες, ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος (ημερήσια και νυχτερινή θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία) και εδαφικού περιβάλλοντος (υγρασία εδάφους, θρεπτικά στοιχεία). Οι ημερήσιες θερμοκρασίες εντός των οποίων επιτυγχάνεται βέλτιστη ανάπτυξη είναι με ηλιοφάνεια 21-24 °C, με συννεφιά 18-21 °C και οι νυχτερινές είναι 14-16 °C αντίστοιχα (Ολύμπιος 2001). Χαρακτηριστικό γνώρισμα της πειραματικής καλλιέργειας, είναι η αργή ανάπτυξη της φυλλικής επιφάνειας (LAI, leaf area index) στο μεγαλύτερο μέρος του καλλιεργητικού χρόνου και η απότομη και ταχεία ανάπτυξη της σχεδόν στο τέλος του χρόνου (σχήμα 4-9).

Το μαρούλι επιλέχτηκε ως πειραματική καλλιέργεια λόγω της διδιάστατης ανάπτυξης που έχει, η οποία γίνεται κυρίως κοντά στο έδαφος κάτι που διευκολύνει την επίτευξη ομοιόμορφης θέρμανσης σε όλη την επιφάνειά του κατά την χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας. Επιπλέον αποτελεί τυπική καλλιέργεια της γεωγραφικής περιοχής των πειραματικών θερμοκηπίων. Να αναφερθεί ότι είναι το σημαντικότερο φυλλώδες λαχανικό που καλλιεργείται και στην Μεσογειακή περιοχή και στις χώρες της Ευρώπης γιατί χρησιμοποιείται νωπό και έχει υψηλή θρεπτική αξία λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε βιταμίνη Α και C και επίσης είναι καλή πηγή Ca και P.



Σχήμα 4-9: Δείκτης ανάπτυξης φυλλικής επιφάνειας (LAI) της πειραματικής καλλιέργειας ως συνάρτηση των ημερών μετά την φύτευση (Tei et al, 1996).

4.2 ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ - ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4.2.1 ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ ΜΙΚΡΟ-ΚΛΙΜΑΤΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Στα πειραματικά θερμοκήπια έλαβαν χώρα διάφορες σειρές πειραμάτων η πιστότητα των οποίων απαιτούσε συνεχή έλεγχο και καταγραφή του μικροκλίματος των θερμοκηπίων. Για την καταγραφή και τον έλεγχο του μικροκλίματος σε κάθε θερμοκήπιο (σχήμα 4-10 και 4-11) χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω αισθητήρες :

Πυρανόμετρο (SP-LITE): Αισθητήρας πυριτίου ο οποίος χρησιμοποιείται για να μετράει την ηλιακή ενέργεια που λαμβάνεται από ολόκληρο το ημισφαίριο με εύρος φασματικής ανταπόκρισης **400-1100 nm**, περιοχή μετρήσεων **0 – 2000 W/m²** και θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας από **-30 έως 70°C**. Το συγκεκριμένο πυρανόμετρο χρησιμοποιείται στο εσωτερικό των θερμοκηπίων πάνω σε ιστό **0.5 m**, για να μετράει την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία. Αποτελείται από φωτοδίοδο, προστατευτικό κάλυμμα και καλώδιο. Το κύκλωμα περιλαμβάνει μια αντίσταση συνδεδεμένη παράλληλα με την φωτοδίοδο έτσι ώστε να παράγεται ηλεκτρική τάση που είναι ανάλογη της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που περνάει. Συνδέεται απευθείας με τον **Datalogger** και το αποτέλεσμα δίνεται σε **Wm⁻²**.

Ακτινόμετρο (PAR-LITE): Αισθητήρας που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της πυκνότητας ροής των φωτοσυνθετικών φωτονίων. Στην πράξη, αυτή η ποσότητα αποκαλείται **PAR** και συμβολίζει την Φωτοσυνθετικά Ενεργή Ακτινοβολία (**Photosynthetically Active Radiation**). Η μέτρηση αντιπροσωπεύει τον αριθμό των φωτονίων που λαμβάνονται από ολόκληρο το ημισφαίριο (εύρος πεδίου ανίχνευσης **180°**), στο φασματικό εύρος **400 έως 700 nm** της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανά τετραγωνικό μέτρο και ανά δευτερόλεπτο. Αυτά τα φωτόνια χρησιμοποιούνται από τα πράσινα μέρη των φυτών στην διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Έχει περιοχή μετρήσεων **0 – 10000 μmol m⁻²s⁻¹** και θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας από **-30 έως 70 °C**. Αποτελείται από φωτοδίοδο, φίλτρα, **a diffuser**, προστατευτικό κέλυφος, καλώδιο και στηρίζεται σε κατάλληλη βάση οριζοντίωσης. Συνδέεται απευθείας με τον **Datalogger** και το αποτέλεσμα εκφράζεται σε **μmol m⁻²s⁻¹**.

Πυρανόμετρο (CMP3): Αισθητήρας κατάλληλος για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε επίπεδη επιφάνεια. Εξαιτίας της οριζόντιας φασματικής ευαισθησίας του (**300–3000 nm**), χρησιμοποιείται σε συνθήκες φυσικού φωτισμού, κάτω από φυτικές επιφάνειες, μέσα σε θερμοκήπια ή κτήρια και ανεστραμμένος για μέτρηση της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης χρησιμοποιείται για μέτρηση τεχνητού φωτισμού που εκπέμπουν οι περισσότεροι τύποι λαμπτήρων (Ξένου, Αλογόνου) καθώς και για την μέτρηση θερμότητας που εκπέμπουν οι λαμπτήρες Υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η ευαίσθητη επιφάνεια του αποτελείται από θερμοστήλη **Cu-Ni** με συμμετρία περιστροφής τοποθετημένη κάτω από γυάλινο θόλο πάχους **2mm**, με τέτοιο τρόπο ώστε το πυρανόμετρο να έχει εύρος πεδίου ανίχνευσης **180°**. Έχει περιοχή μετρήσεων **0 – 2000 W/m²** και θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας από **-40 έως 80 °C**. Διαθέτει σύστημα οριζοντίωσης με ρυθμιζόμενα πέλματα ώστε να επιτυγχάνεται ακριβής οριζοντίωσή του. Συνδέεται απευθείας με τον **Datalogger** και το αποτέλεσμα δίνεται σε **Wm⁻²**.

Αισθητήρας σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας (S3CO3): Αισθητήρας κατάλληλος για τη μέτρηση της σχετικής υγρασίας (*RH*), και της θερμοκρασίας *T_a* του εσωτερικού περιβάλλοντος των θερμοκηπίων. Η περιοχή μετρήσεων όσον αφορά την σχετική υγρασία είναι **0-100%** και όσον αφορά την θερμοκρασία είναι **-40 έως 60°C**. Διαθέτει κατάλληλο **interface** για σύνδεση με τον **Datalogger**.

Θερμοζεύγη (T): Αποτελούνται από δύο αγωγούς από διαφορετικά μέταλλα **Cu(+)/Constantan(-)**, συγκολλημένα στο ένα τους άκρο. Όταν τα δυο διαφορετικά μέταλλα έρθουν σε επαφή αναπτύσσεται μεταξύ τους μια διαφορά δυναμικού **E** (**Seebeck**) που εξαρτάται από την θερμοκρασία και το είδος των μετάλλων. Σημαντικό πλεονέκτημα είναι η **μικρή** τους μάζα που τους επιτρέπει να έρχονται σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον τους πολύ γρήγορα. Στα θερμοκήπια χρησιμοποιήθηκαν θερμοζεύγη τύπου *T* (**χαλκού-κονσταντάνης**), διαμέτρου **0.5 mm** και διαμέτρου **0.2 mm**, με θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας από **-180-400 °C**

Ηλεκτρονικά βατόμετρα: Χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή της ενέργειας που καταναλώνεται στα πειραματικά θερμοκήπια (**kWh**)

4.2.2 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ ΜΑΚΡΟ-ΚΛΙΜΑΤΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Στην περιοχή των πειραματικών θερμοκηπίων εγκαταστάθηκε μετεωρολογικός σταθμός για συνεχή καταγραφή των αντιπροσωπευτικών κλιματολογικών συνθηκών που επικρατούν (σχήμα **4-0** και **4-11**). Ο σταθμός είναι σε θέση τέτοια ώστε να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις από κτίρια και κυκλοφορία και πληρεί τις προδιαγραφές **WMO (World Meteorological Organization)**. Φέρει κεντρικό ιστό σωληνωτού τύπου, ύψους **2.50 m** και διαμέτρου **1.5"** πάνω στον οποίο είναι τοποθετημένοι σε βραχίονες στήριξης μήκους **0.65 m**, οι αισθητήρες ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, υπέρυθρης ακτινοβολίας και θερμοκρασίας ουρανού, σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας αέρα, ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου. Ο αισθητήρας ύψους βροχής είναι τοποθετημένος σε δευτερεύοντα ιστό ύψους **1.80 m**. Επί του κεντρικού ιστού είναι τοποθετημένη και η μονάδα συλλογής, επεξεργασίας και αποθήκευσης μετρήσεων (**Datalogger**). Αναλυτικότερα:

Πυρανόμετρο (SP-LITE): Αισθητήρας πυριτίου ο οποίος χρησιμοποιείται για να μετράει την ηλιακή ενέργεια που λαμβάνεται από ολόκληρο το ημισφαίριο με εύρος φασματικής ανταπόκρισης **400-1100 nm**, περιοχή μετρήσεων **0 – 2000 W/m²** και θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας από **-30 έως 70 °C**. Το εν λόγω πυρανόμετρο είναι τοποθετημένο σε βραχίονα στον ιστό του μετεωρολογικού για να μετράει την ολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Αποτελείται από φωτοδίοδο, προστατευτικό κάλυμμα και καλώδιο. Το κύκλωμα περιλαμβάνει μια αντίσταση συνδεδεμένη παράλληλα με την φωτοδίοδο έτσι ώστε να παράγεται ηλεκτρική τάση που είναι ανάλογη της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που περνάει. Συνδέεται απευθείας με τον **Datalogger** και το αποτέλεσμα δίνεται σε **Wm⁻²**.

Πυργεόμετρο (CGR3): Αισθητήρας κατάλληλος για τη μέτρηση της μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας (ροή) πάνω σε μια επιφάνεια στην φασματική περιοχή **4500 – 42000 nm**. Η ακτινοβολία που μετράει ο αισθητήρας είναι ουσιαστικά η

ακτινοβολία που εκπέμπει ο ουρανός. Θεωρώντας ότι ο ουρανός συμπεριφέρεται σαν ένα τέλειο μαύρο σώμα (δεν έχει απώλειες ακτινοβολίας) ο αισθητήρας μπορεί κατά προσέγγιση να υπολογίσει την θερμοκρασία του ουρανού με κατάλληλο τύπο υπολογισμού που διαθέτει. Ο αισθητήρας έχει ενσωματωμένο σύστημα θέρμανσης ώστε να αποφεύγεται η επικάλυψη υδρατμών στην επιφάνειά του και αισθητήρα θερμοκρασίας (**thermistor** ή **PT100**) για μέτρηση της θερμοκρασίας του αισθητήρα υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Ανεμόμετρο (A100K): Ο αισθητήρας μέτρησης ταχύτητας ανέμου είναι τύπου τριών ημισφαιρικών ή κωνικών κυπέλλων με παλμική έξοδο με περιοχή μετρήσεων **0-75 m/sec**, κατώφλι λειτουργίας **0.15 m/sec** και θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας από **-50** έως **55 °C**. Τα εκτεθειμένα στις καιρικές συνθήκες μέρη του είναι κατασκευασμένα από μη οξειδωμένα υλικά. Είναι τοποθετημένος στον ιστό του σταθμού σε ύψος **2.30 m** από το έδαφος.

Αισθητήρας σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος (MP101A): Αισθητήρας κατάλληλος για τη μέτρηση της σχετικής υγρασίας (**RH**), και της θερμοκρασίας T_o του εξωτερικού περιβάλλοντος των θερμοκηπίων. Γι αυτό τον λόγο διαθέτει αισθητήριο στοιχείο ιδιαίτερα ανθεκτικό σε βιομηχανικούς ρύπους και χαρακτηρίζεται από μεγάλη σταθερότητα. Ο αισθητήρας βρίσκεται σε κλωβίσκο προστασίας αποτελούμενο από **10** επάλληλους δίσκους από θερμοπλαστικό υλικό και έχει περιοχή μετρήσεων όσον αφορά την σχετική υγρασία **0-100%** και **-40** έως **60°C** όσον αφορά την θερμοκρασία.

Αισθητήρας μέτρησης ύψους βροχής (52203): Αισθητήρας τύπου ανατρεπόμενων καδίσκων που διαθέτει σύστημα οριζοντίωσης και ενσωματωμένη ενδεικτική φουσαλίδα. Είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτα υλικά και έχει μηχανισμό κατακράτησης ξένων υλών. Τα εκτεθειμένα στις καιρικές συνθήκες μέρη του είναι μεταλλικά. Η στήριξή του να γίνεται με ιστό ύψους **1 m** και αντηρίδες, ανθεκτικό στην όξινη και έντονη βροχόπτωση και γενικά στις δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Έχει ευαισθησία **0.1 mm/tip** και θερμοκρασία λειτουργίας από **0 - 50 °C**.

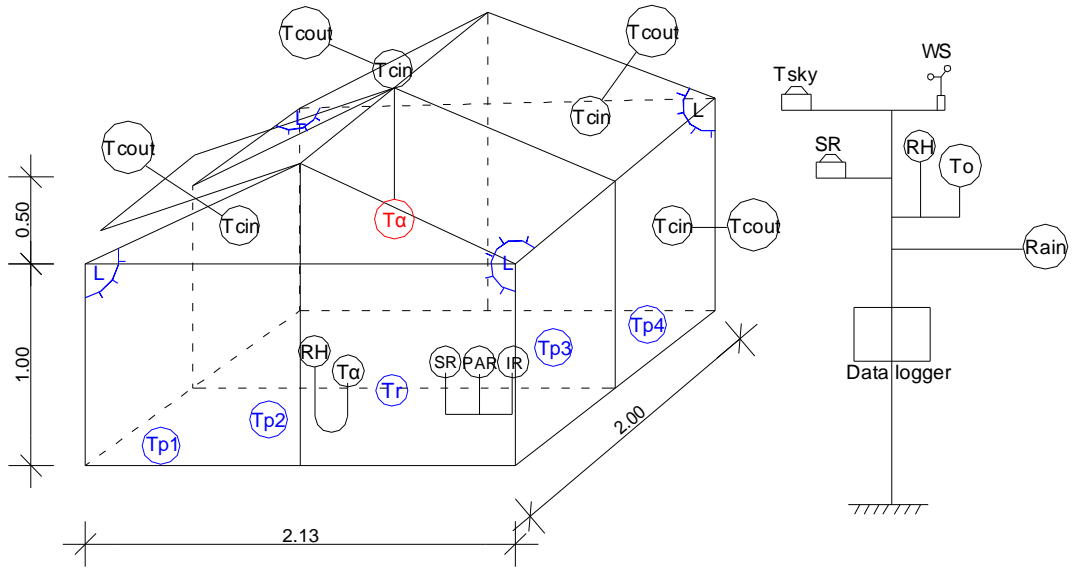
Μονάδα συλλογής, επεξεργασίας και αποθήκευσης μετρήσεων (Datalogger, CR10X): Ο Datalogger CR10X του κατασκευαστικού Οίκου Campbell Αγγλίας, είναι μια μικρή και ερμητικά κλειστή μονάδα μέσα σε ανοξείδωτο περίβλημα, η οποία έχει ενσωματωμένη εξαιρετικά μεγάλη υπολογιστική ισχύ για συλλογή και επεξεργασία στοιχείων. Η μονάδα είναι εγκατεστημένη πάνω στον ιστό του μετεωρολογικού σταθμού, προκειμένου να συλλέγει, να επεξεργάζεται και να αποθηκεύει τις τιμές διαφόρων περιβαλλοντικών παραμέτρων. Η μονάδα έχει δυνατότητα δειγματοληψίας των σημάτων όλων των αισθητήρων που είναι συνδεδεμένοι στις εισόδους της σε τακτά και προγραμματιζόμενα χρονικά διαστήματα στη διάρκεια του **24**ώρου. Οι τιμές αυτές υφίστανται επεξεργασία με βάση σχετικά προγράμματα και εντολές, που είναι καταχωρημένα στη μνήμη της μονάδας και καταχωρούνται σε μνήμη εξόδου από όπου γίνεται μεταφορά σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω ασύρματης ζεύξης. Η μονάδα μεταξύ άλλων διαθέτει:

- Δώδεκα εισόδους αναλογικών μετρήσεων με δυνατότητα διαφορικής σύνδεσης, ψηφιοποίηση **12bit**, ελάχιστη κλίμακα **±5mV** και ακρίβεια **0,05% FS**.
- Δύο απαριθμητικές εισόδους με δυνατότητα μέτρησης συχνότητας, κλεισιμάτων επαφής ή αριθμού παλμών, με ικανότητα απαρίθμησης τουλάχιστον **12KHz**.

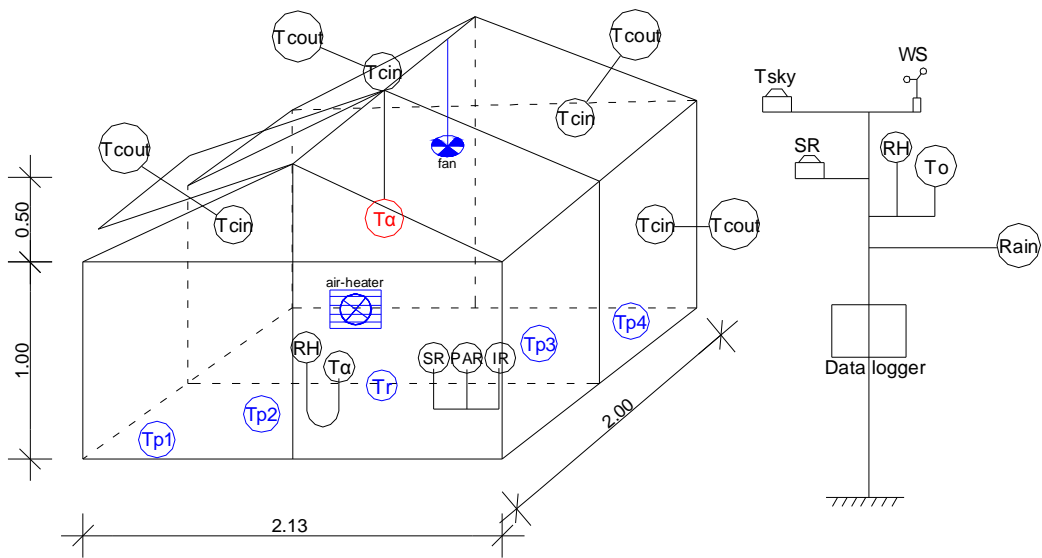
- Τρεις προγραμματιζόμενες αναλογικές εξόδους με τάση **0 - ±2,5V** για διέγερση αισθητήρων, με προγραμματιζόμενη διάρκεια ενεργοποίησης.
- **8** ψηφιακές θύρες **I/O**
- Μία είσοδο για έξυπνους αισθητήρες που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο **SDI12**.
- Εκτέλεση υπολογισμών με αριθμητική **32bit**.
- Χωρητικότητα αποθηκευτικής μνήμης **128 KB** για τουλάχιστον **60.000** μετρήσεις.
- Δυνατότητα υποστήριξης των αποθηκευμένων τιμών με ενσωματωμένη μπαταρία Λιθίου, ώστε να μην χάνονται οι μετρήσεις σε περίπτωση βλάβης του κύριου συστήματος τροφοδοσίας.
- Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας από **-25°C** έως **80°C**.
- Λογισμικό ελεγχόμενης πρόσβασης τριών επιπέδων, τουλάχιστον ώστε να μην είναι δυνατή η αλλαγή του προγράμματος ή η συλλογή μετρήσεων από μη εξουσιοδοτημένα άτομα (**Analyzer 4.5 Datalogger Software**).

Σύστημα ασύρματης μετάδοσης δεδομένων: Με το σύστημα αυτό επιτυγχάνεται ασύρματη (**GSM**) επικοινωνία (μέσω δικτύου κινητής τηλεφωνίας), με τον απομακρυσμένο **DataLogger (CR10X)** που βρίσκεται στην περιοχή των πειραματικών θερμοκηπίων. Το σύστημα περιλαμβάνει εξοπλισμό σταθμού (**modem** ασύρματης ζεύξης, εξωτερική κεραία, **Interface**, σύνδεση **GSM**) και εξοπλισμό βάσης (**modem** σταθερής τηλεφωνίας).

Analyzer 4.5 (Analyzer Datalogger Software): Το πρόγραμμα **Analyzer** είναι μία **32bit client-server** παραθυρική εφαρμογή για τα λειτουργικά συστήματα **Windows 98/Me/NT4/2000/XP** και απευθύνεται σε όλους εκείνους που χρησιμοποιούν **Dataloggers** ή υπολογιστές με κάρτες συλλογής δεδομένων (**D.A.C.**) για την συλλογή μετρήσεων από αισθητήρες ή αναλυτές και επιθυμούν να αποθηκεύσουν τις τιμές αυτές σε μία κεντρική βάση δεδομένων με δυνατότητες παρουσίασης, επεξεργασίας, στατιστικής ανάλυσης, δημιουργίας γραφικών παραστάσεων, εκτυπώσεων, απεικόνισης σε χάρτη κλπ. Το πρόγραμμα λαμβάνει τις μετεωρολογικές μετρήσεις από τον **Datalogger** του μετεωρολογικού σταθμού με την χρήση **modem** ή/και με απευθείας σύνδεση. Τις μετρήσεις αυτές τις αποθηκεύει στην βάση δεδομένων που δημιουργεί το ίδιο, δημιουργώντας έτσι μία βάση πληροφοριών με όλα τα μετρούμενα μετεωρολογικά μεγέθη του σταθμού για όλο το χρονικό διάστημα λειτουργίας του. Η βάση δεδομένων είναι της μορφής **mdb (microsoft access)** ή **microsoft SQL server**.



Σχήμα 4-10: Πειραματικό θερμοκήπιο και μετεωρολογικός σταθμός με σύστημα θέρμανσης με υπέρυθρη ακτινοβολία



Σχήμα 4-11: Πειραματικό θερμοκήπιο και μετεωρολογικός σταθμός με σύστημα θέρμανσης θερμού αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής

4.2.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Οι σχετικοί παράμετροι με το μικροκλίμα των πειραματικών θερμοκηπίων που ελέγχονται και καταγράφονται είναι:

- η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, *Solrad_in* ($W m^{-2}$)
- η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία *PAR* ($\mu mol m^{-2}s^{-1}$)
- η θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος, *Ta* ($^{\circ}C$), με χρήση θερμοζεύγους διαμέτρου **0.5 mm**, το οποίο κρέμεται στο κέντρο του θερμοκηπίου σε ύψος **1.20 m** από το έδαφος και **0.30 m** από την οροφή του θερμοκηπίου.
- η θερμοκρασία φυτών σε πέντε περιοχές του φυτικού θόλου, με 5 θερμοζεύγη αντίστοιχα *Tr1*, *Tr2*, *Tr3* και *Tr4* διαμέτρου **0.5 mm**. Τα θερμοζεύγη είναι κατανομημένα στο έδαφος και τοποθετημένα επί της διαγώνιου των θερμοκηπίων κάτω από τα νεαρά φυτά. Καλύπτονται επίσης από την ακτινοβολία των λαμπτήρων με προστατευτικές επιφάνειες ανάκλασης.
- ένα θερμοζεύγος εκ των προαναφερθέντων πέντε, είναι τοποθετημένο στο κέντρο του θερμοκηπίου επί της διαγώνιου και χρησιμοποιείται ως θερμοκρασία αναφοράς αντιπροσωπεύοντας τις θερμοκρασίες του φυτικού θόλου *Tr(Tp)*. Για αυτόν τον λόγο σε όλη την εργασία ως θερμοκρασία αναφοράς αναφέρεται η συγκεκριμένη θερμοκρασία φυτών και συμβολίζεται ως *Tr*. Με την θερμοκρασία αναφοράς ελέγχεται η λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης και εξαερισμού των θερμοκηπίων.
- η εσωτερική και εξωτερική θερμοκρασία των βορινών καλυμμάτων *Tcin*, *Tcout*, με 4 θερμοζεύγη αντίστοιχα.
- η εσωτερική και εξωτερική θερμοκρασία των νοτίων καλυμμάτων *Tcin*, *Tcout* με 4 θερμοζεύγη αντίστοιχα. Τα θερμοζεύγη που χρησιμοποιούνται σε όλα τα καλύμματα είναι διαμέτρου **0.2 mm**, λόγω της γρηγορότερης ανταπόκρισης και μεγαλύτερης ευαισθησίας που διαθέτουν
- η σχετική υγρασία εσωτερικού περιβάλλοντος, *RH* (%)
- η διάρκεια λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης *Lights_on*, *Heater_on* (*sec*), για τον υπολογισμό της καταναλωμένης ενέργειας (*Wh*)

Οι κλιματολογικοί παράγοντες που λαμβάνονται και καταγράφονται στον μετεωρολογικό σταθμό των πειραματικών θερμοκηπίων και έχουν άμεση επίδραση στο διαμορφούμενο εσωτερικό κλίμα των θερμοκηπίων είναι:

- η συνολικά προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, *Solrad_out* ($W m^{-2}$)
- η μεγάλου μήκους ακτινοβολία, *IR* ($W m^{-2}$)
- η θερμοκρασία περιβάλλοντος, *To* ($^{\circ}C$)
- η θερμοκρασία ουρανού, *Tsky* (*K*)
- η ταχύτητα ανέμου, *WS* (ms^{-1})

- η σχετική υγρασία περιβάλλοντος, *RH (%)* και
- το ύψος βροχόπτωσης, *rain (mm)*

Ειδικότερα, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η θερμοκρασία ουρανού και η ταχύτητα ανέμου, μετρούνται σε ύψος **2.5 m** και είναι παράμετροι που μαζί με την θερμοκρασία του φυτικού θόλου εισέρχονται στο μοντέλο προσομοίωσης του ενεργειακού ισοζυγίου των θερμοκηπίων.

Οι παράμετροι κεντρικού ενδιαφέροντος στην παρούσα διατριβή είναι η θερμοκρασία φυτών, εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, η θερμοκρασία καλύμματος, η θερμοκρασία ουρανού, η ταχύτητα ανέμου και η διάρκεια λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης. Επειδή οι τιμές αυτών των παραμέτρων αλλάζουν με τον χρόνο, τα δεδομένα σαρώνονται κάθε λεπτό, υπολογίζονται οι μέσοι όροι κάθε **10/λεπτο** και καταγράφονται σε **24/h** βάση στον **Datalogger** του σταθμού. Η προσοχή εστιάζεται στην θερμική συμπεριφορά του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια της θερμικής νύχτας και πιο συγκεκριμένα στην θερμοκρασία εσωτερικού αέρα και καλύμματος, όταν τα συστήματα θέρμανσης αυτόματα ανοίγουν και κλείνουν.

Υπολογίζονται οι μέσες ολονύχτιες τιμές από τις αντίστοιχες χρονικές ακολουθίες βασιζόμενες στο διάστημα μεταξύ της απότομης αλλαγής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στην ανατολή και στην δύση του ήλιου καθώς και την αποκατάσταση σταθερών συνθηκών εντός των θερμοκηπίων. Επίσης υπολογίζεται η μέση χρονική εξέλιξη καθεμιάς από τις προαναφερθείσες παραμέτρους στην διάρκεια της θερμικής περιόδου.

4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΕΙΡΕΣ

Τα πειράματα διεξήχθησαν στα θερμοκήπια στην διάρκεια δύο θερμικών περιόδων. Ως θερμική περίοδο ορίζουμε την περίοδο κατά την οποία οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες έχουν ανάγκη από θέρμανση, ιδιαίτερα κατά την διάρκεια της νύχτας και διαρκεί περίπου **6** μήνες, Νοέμβριο-Απρίλιο.

Την πρώτη θερμική περίοδο (**2007/08**) χρησιμοποιήθηκε ένα πειραματικό θερμοκήπιο με εναλλαγή των συστημάτων θέρμανσης που εφαρμόζονται. Την δεύτερη θερμική περίοδο (**2008/09**) χρησιμοποιήθηκαν δύο ίδια πειραματικά θερμοκήπια στα οποία τα συστήματα θέρμανσης λειτούργησαν τον ακριβώς ίδιο χρόνο μέσα στην θερμική περίοδο και κάτω από τις ίδιες κλιματολογικές συνθήκες. Και στις δύο περιόδους η πειραματική καλλιέργεια που χρησιμοποιήθηκε είναι το μαρούλι.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των δύο συστημάτων θέρμανσης –θερμού αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής και και μικρού μήκους κύματος υπέρυθρης ακτινοβολίας (NIR) αντίστοιχα –στα πειραματικά θερμοκήπια. Τα πειραματικά θερμοκήπια χρησιμοποιήθηκαν σε δύο θερμικές περιόδους. Την πρώτη θερμική περίοδο χρησιμοποιήθηκε ένα πειραματικό θερμοκήπιο με εναλλαγή των συστημάτων θέρμανσης ενώ την δεύτερη θερμική περίοδο χρησιμοποιήθηκαν δύο πανομοιότυπα πειραματικά θερμοκήπια στα οποία τα συστήματα θέρμανσης λειτούργησαν τον ίδιο ακριβώς χρόνο μέσα στην θερμική περίοδο και κάτω από τις ίδιες κλιματολογικές συνθήκες.

Το κεφάλαιο χωρίζεται σε 4 επιμέρους ενότητες. Στην πρώτη και δεύτερη ενότητα ελέγχεται η θερμική συμπεριφορά των πειραματικών θερμοκηπίων στην διάρκεια και των δύο θερμικών περιόδων με χρήση χρονικών ακολουθιών κάθε νύχτας και πειραματικών μέσων τιμών των παραμέτρων της θερμοκρασία εσωτερικού αέρα T_a και καλύμματος T_c που καθορίζουν τις ενεργειακές απώλειες των θερμοκηπίων. Γίνεται ενεργειακή αξιολόγηση των δύο διαφορετικών συστημάτων θέρμανσης που εφαρμόζονται υπολογίζοντας και συγκρίνοντας τις μέσες και μέγιστες συνολικές θερμικές απώλειες που συμβαίνουν. Τα μεγέθη αυτά αναμένεται να είναι ανάλογα της μέσης και μέγιστης κατανάλωσης ενέργειας κατά τις νυχτερινές ώρες. Γίνεται αξιοποίηση της έννοιας των βαθμοημερών και ορίζεται ένας ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας U για κάθε θερμοκήπιο ανάλογα με το σύστημα θέρμανσης που εφαρμόζεται.

Στην τρίτη ενότητα ελέγχεται η αξιοπιστία των θεωρητικών αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Η ποιότητα του μοντέλου προσομοίωσης είναι σημαντική για την μεταφορά των πειραματικών αποτελεσμάτων στην κλίμακα των πραγματικών θερμοκηπίων παραγωγής και ο έλεγχος της ποιότητας του μοντέλου είναι σημαντικό στοιχείο της παρούσας διατριβής.

Στην τέταρτη ενότητα γίνεται η σύγκριση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του παραγομένου προϊόντος εντός και των δύο πειραματικών θερμοκηπίων.

5.1 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Τα πειράματα διεξήχθησαν κατά την διάρκεια δύο συνεχών θερμικών περιόδων. Την πρώτη θερμική περίοδο (2007/08) πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ένα πειραματικό θερμοκήπιο με τα υπό σύγκριση συστήματα θέρμανσης να χρησιμοποιούνται με εναλλαγή. Το θερμοκήπιο λειτούργησε από Ιανουάριο – Μάρτιο του 2008 για περίπου 80 ημέρες. Τις 52 ημέρες εξ αυτών λειτούργησε με σύστημα θέρμανσης μικρού μήκους κύματος υπέρυθρης ακτινοβολίας (λαμπτήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας) και τις υπόλοιπες 20 λειτούργησε με συμβατικό σύστημα θέρμανσης, (θερμός αέρας εξαναγκασμένης συναγωγής) και παρουσία ανεμιστήρα για καλύτερη ανάμειξη του θερμού αέρα και αποφυγή στρωμάτωσης της θερμοκρασίας στο

εσωτερικό του θερμοκηπίου. Επίσης για ένα μικρό διάστημα (10 ημέρες) το θερμοκήπιο λειτούργησε με χρήση αερόθερμου και απουσία ανεμιστήρα. Αυτή την θερμική περίοδο οι μετρήσεις της ανεμόπτωσης έγιναν με ανεμόμετρο **NRG #40** που είχε κατώφλι μετρήσεων **0.75 ms⁻¹** με αποτέλεσμα να υστερεί στην καταγραφή της χαμηλής ταχύτητας ανέμου. Ως θερμοκρασία ουρανού χρησιμοποιείται η θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος ($T_{sky}=T_o$).

Την δεύτερη θερμική περίοδο (2008/09) χρησιμοποιήθηκαν 2 πανομοιότυπα πειραματικά θερμοκήπια. Η ανάγκη κατασκευής του δεύτερου θερμοκηπίου προέκυψε από τα ενθαρρυντικά πειραματικά αποτελέσματα της πρώτης περιόδου λειτουργίας και από τα εκτιμώμενα ενεργειακά οφέλη που προκύπτουν από την χρήση της υπέρυθρης ακτινοβολίας και είναι της τάξεως 45-50%. Για να γίνει καταγραφή των ενεργειακών απωλειών και το ενεργειακό όφελος από την χρήση της υπέρυθρης θέρμανσης να ποσοτικοποιηθεί σε απόλυτες τιμές, κρίθηκε αναγκαίο να λειτουργήσουν δύο ακριβώς ίδια πειραματικά θερμοκήπια κάτω από απόλυτα ίδιες κλιματολογικές συνθήκες. Το ένα θερμοκήπιο λειτούργησε με αερόθερμο θερμού αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής και παρουσία ανεμιστήρα και το δεύτερο με μικρού μήκους κύματος υπέρυθρη θέρμανση. Αυτήν την θερμική περίοδο οι μετρήσεις της ανεμόπτωσης γίνονται με ανεμόμετρο **A100K** με κατώφλι μετρήσεων **0.15 ms⁻¹** και μετρείται και η θερμοκρασία ουρανού. Τα θερμοκήπια λειτούργησαν την θερμική περίοδο Νοεμβρίου – Μαρτίου 2008/09. Η πειραματική καλλιέργεια που χρησιμοποιήθηκε είναι μαρούλι (*Lactuca sativa L.*) με πυκνότητα καλλιέργειας 12 φυτά/m². Παρουσία των δύο πειραματικών θερμοκηπίων τα δύο συστήματα θέρμανσης χρησιμοποιούνται τον ίδιο ακριβώς χρόνο μέσα στην θερμική περίοδο και το σημαντικότερο κάτω από τις ίδιες κλιματολογικές συνθήκες. Η δεύτερη θερμική περίοδος είναι η πιο σημαντική περίοδος πειραμάτων για την εξαγωγή ασφαλών και σαφών συμπερασμάτων σε σχέση με τις δυνατότητες της υπέρυθρης θέρμανσης ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί.

Οι μέγιστες θερμικές ανάγκες των θερμοκηπίων με βάση την ελάχιστη θερμοκρασία του δυσμενέστερου μήνα της θερμικής περιόδου, $T_o=0$ °C και το επιθυμητό επίπεδο διατήρησης της θερμοκρασίας των φυτών $T_p=15$ °C, όπως αυτές εκτιμήθηκαν χρησιμοποιώντας το μοντέλο προσομοίωσης, είναι για το συμβατικής θέρμανσης θερμοκήπιο $Q_{total}=1090$ W και για το υπέρυθρης θέρμανσης $Q_{total}=600$ W. Για κάλυψη των μέγιστων θερμικών απωλειών, το αερόθερμο τέθηκε στο επίπεδο λειτουργίας ισχύος 1.2 kW. Η χρήση 4 λαμπτήρων υπέρυθρης ακτινοβολίας συνολικής ισχύος 1 kW και γωνίας δέσμης της ακτινοβολίας 60° καλύπτει πλήρως τις μέγιστες απώλειες δεδομένου ότι ο βαθμός απόδοσης των λαμπτήρων της ακτινοβολίας σε θερμότητα που καταλήγει στα φυτά είναι $n=60\%$.

Οι πειραματικές παράμετροι κεντρικού ενδιαφέροντος είναι:

- Οι θερμοκρασίες του φυτικού θόλου που αντιπροσωπεύονται από την θερμοκρασία αναφοράς $T_p=15\pm 1$ °C που λαμβάνεται στην μέση του θερμοκηπίου και χρησιμοποιείται για το θερμικό έλεγχο όλου του θερμοκηπίου.
- Η θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος T_a και η θερμοκρασία καλύμματος T_c έτσι όπως αυτές διαμορφώνονται κατά την χρήση των δύο συστημάτων θέρμανσης γιατί είναι οι κύριες θερμοκρασίες που καθορίζουν τις ενεργειακές απώλειες του κάθε θερμοκηπίου. Η θερμοκρασία καλύμματος επειδή διαφέρει ελάχιστα ανάλογα με την θέση, αντιπροσωπεύεται από μια μέση τιμή που δίνεται από τα θερμοζεύγη που την καταγράφουν.
- Η θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος T_o , η θερμοκρασία ουρανού T_{sky} και η ταχύτητα ανέμου WS , που λαμβάνονται από τον μετεωρολογικό σταθμό των

θερμοκηπίων.

- Η ενεργειακή κατανάλωση έκαστου πειραματικού θερμοκηπίου η οποία καταγράφεται με δύο τρόπους ώστε να εξαχθούν σωστά και σαφή συμπεράσματα: **(i)** στο σύστημα καταγραφής πειραματικών δεδομένων καταγράφεται η διάρκεια λειτουργίας του κάθε συστήματος θέρμανσης και εν συνεχεία με την χρήση της πραγματικής ισχύος του κάθε συστήματος γίνεται υπολογισμός της καταναλωμένης ενέργειας (**kWh**) και **(ii)** σε κάθε θερμοκήπιο είναι εγκατεστημένο ηλεκτρονικό βατόμετρο για απευθείας καταγραφή της ενέργειας που καταναλώνεται (**kWh**)

Τα διαγράμματα σχεδιάζονται αρχικά με βάση τις χρονικές ακολουθίες της κάθε νύχτας της θερμικής περιόδου. Ως νύχτα θεωρείται το διάστημα μεταξύ της απότομης αλλαγής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στην ανατολή και στην δύση του ήλιου καθώς και την αποκατάσταση σταθερών συνθηκών εντός των θερμοκηπίων. Εν συνεχεία γίνεται αναγωγή στις μέσες τιμές θερμοκρασίας νύχτας των παραμέτρων κεντρικού ενδιαφέροντος. Επειδή οι τιμές αυτών των παραμέτρων αλλάζουν με τον χρόνο, τα δεδομένα καταγράφονται κάθε λεπτό, υπολογίζονται οι μέσοι όροι κάθε 10/λέπτου και καταγράφονται σε 24/h βάση στον **Datalogger** του σταθμού.

Στις ενότητες και στα διαγράμματα που ακολουθούν αναλύονται και απεικονίζονται:

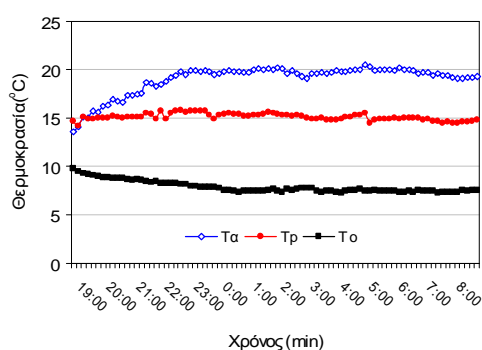
- η θερμική συμπεριφορά του πειραματικού θερμοκηπίου στην διάρκεια της πρώτης θερμικής περιόδου
- η θερμική συμπεριφορά των πειραματικών θερμοκηπίων καθ' όλη την διάρκεια της δεύτερης θερμικής περιόδου
- η χρονική εξέλιξη της μέσης νύχτας
- η επίδραση της θερμοκρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος
- οι βαθμώρες λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης (**HDh**) και η αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας
- η σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων του μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα
- τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του παραγόμενου προϊόντος

5.2 ΠΡΩΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ

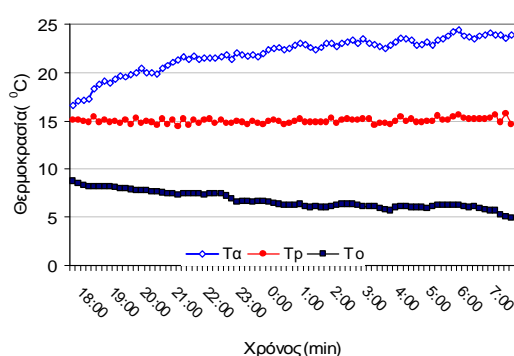
5.2.1 ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ (T_a) ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΝΥΧΤΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΥ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΑΠΟΥΣΙΑ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ

Στο σχήμα 5-1 τα πειραματικά αποτελέσματα από δύο τυπικές χειμερινές νύχτες μέσης τιμής θερμοκρασίας $\bar{T}_o = 7.8\text{ }^\circ\text{C}$ και $\bar{T}_o = 6.7\text{ }^\circ\text{C}$ και χαμηλής ανεμόπτωσης $WS = 1.5\text{ m/sec}$ και 2 m/sec αντίστοιχα, με χρήση θερμού αέρα και απουσία ανεμιστήρα, υποδεικνύουν ότι χωρίς δυναμική επανακυκλοφορία του θερμού αέρα μέσα στο θερμοκήπιο, εγκαθίσταται σημαντική στρωμάτωση. Πιο συγκεκριμένα, στο διάγραμμα A η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα T_a αυξάνει έως και $5\text{ }^\circ\text{C}$ περισσότερο από την θερμοκρασία αναφοράς ($T_p = 15 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$) του θερμοκηπίου. Περαιτέρω, στο διάγραμμα B παρατηρείται επιδείνωση του φαινομένου καθώς η εξωτερική θερμοκρασία πέφτει και η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται. Οι ενεργειακές απώλειες που καταγράφονται είναι πολύ υψηλές.

A



B

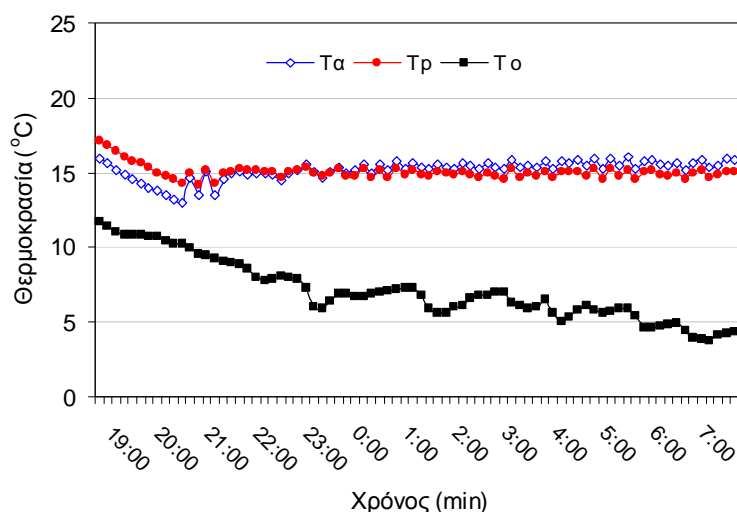


Σχήμα 5-1: Χρονική εξέλιξη της μεταβολής της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα (T_a) με χρήση θερμού αέρα και απουσία ανεμιστήρα.

5.2.2 ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ (T_a) ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΝΥΧΤΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΥ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ

Στο σχήμα 5-2 στα πειραματικά αποτελέσματα μιας αντιπροσωπευτικής νύχτας μέσης τιμής θερμοκρασίας $\bar{T}_o = 7.0\text{ }^\circ\text{C}$ και μικρής ανεμόπτωσης, με χρήση θερμού αέρα και παρουσία ανεμιστήρα, η θερμοκρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος, T_a λόγω επανακυκλοφορίας και πλήρους ανάμειξης του θερμού αέρα παραμένει ελαφρώς υψηλότερη από την θερμοκρασία αναφοράς ($T_p = 15 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$), η στρωμάτωση της θερμοκρασίας εμποδίζεται αποτελεσματικά. Αυτή η πειραματική παρατήρηση ταιριάζει απόλυτα με την παραδοχή που έχει υιοθετηθεί στο μοντέλο προσομοίωσης για σχεδόν ίσες θερμοκρασίες φυτών και εσωτερικού αέρα ($T_a = T_p$), κατά την διάρκεια θέρμανσης του θερμοκηπίου με συμβατικό σύστημα θέρμανσης. Οι ενεργειακές

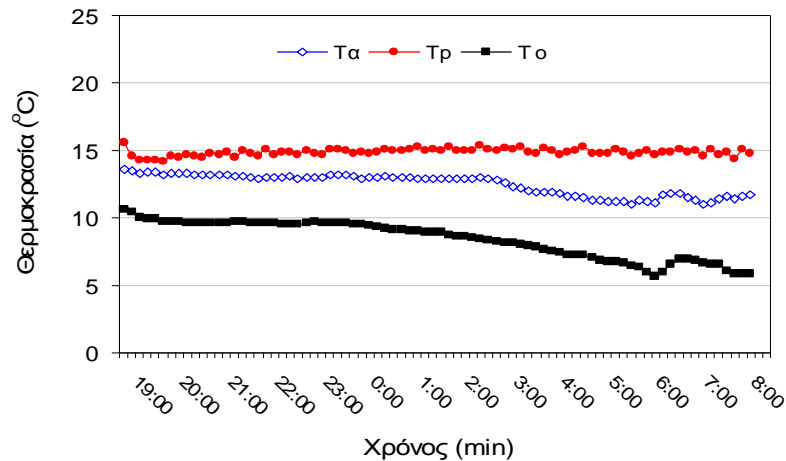
απώλειες που καταγράφονται μειώνονται σε σχέση με την περίπτωση της απουσίας ανεμιστήρα περίπου **20%**, αλλά εξακολουθούν να παραμένουν υψηλές.



Σχήμα 5-2: Χρονική εξέλιξη της μεταβολής της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα (T_a) με χρήση θερμού αέρα και παρουσία ανεμιστήρα

5.2.3 ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ (T_a) ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΝΥΧΤΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ IR.

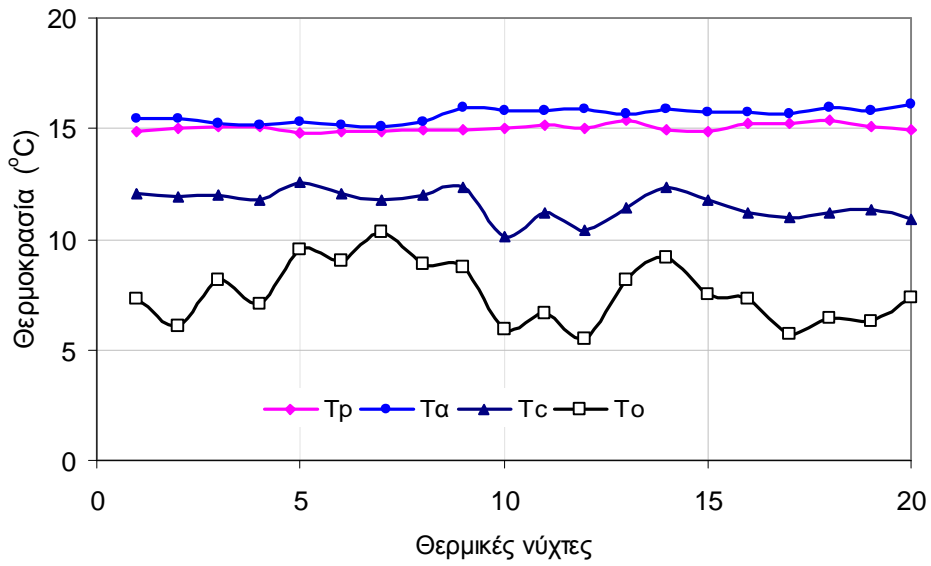
Στο σχήμα 5.3 τα πειραματικά αποτελέσματα είναι από μια τυπική χειμερινή νύχτα μέσης τιμής θερμοκρασίας $\bar{T}_o = 8.0 \text{ }^\circ\text{C}$ με χρήση συστήματος υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η θερμοκρασία αναφοράς παρουσία των λαμπτήρων παραμένει επιτυχώς στα επιθυμητά επίπεδα έτσι όπως αυτά έχουν καθοριστεί ($T_p = 15 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) παρά την διακύμανση της εξωτερικής θερμοκρασίας. Το σημαντικότερο είναι ότι η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα παραμένει αρκετά χαμηλότερη από $2 - 3 \text{ }^\circ\text{C}$ σε σχέση με τη θερμοκρασία αναφοράς, δίνοντας έτσι μια πρώτη ένδειξη για τις δυνατότητες της υπέρυθρης θέρμανσης στα θερμοκήπια. Περαιτέρω παρατηρείται ότι η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα ακολουθεί τις αυξομειώσεις της εξωτερικής θερμοκρασίας. Έτσι η διαφορά $T_a - T_o$ είναι ένδειξη σταθερού ποσοστού μείωσης των θερμικών απωλειών και αύξησης των απόλυτων μεγεθών της ενέργειας που εξοικονομείται. Στην περίπτωση της συμβατικής θέρμανσης η παραπάνω διαφορά αυξάνει αναλογικά (με επανακυκλοφορία του αέρα) ή ακόμα ταχύτερα (χωρίς επανακυκλοφορία) σε σχέση με την πτώση της εξωτερικής θερμοκρασίας και είναι ένδειξη σταθερού ποσοστού αύξησης των θερμικών απωλειών.



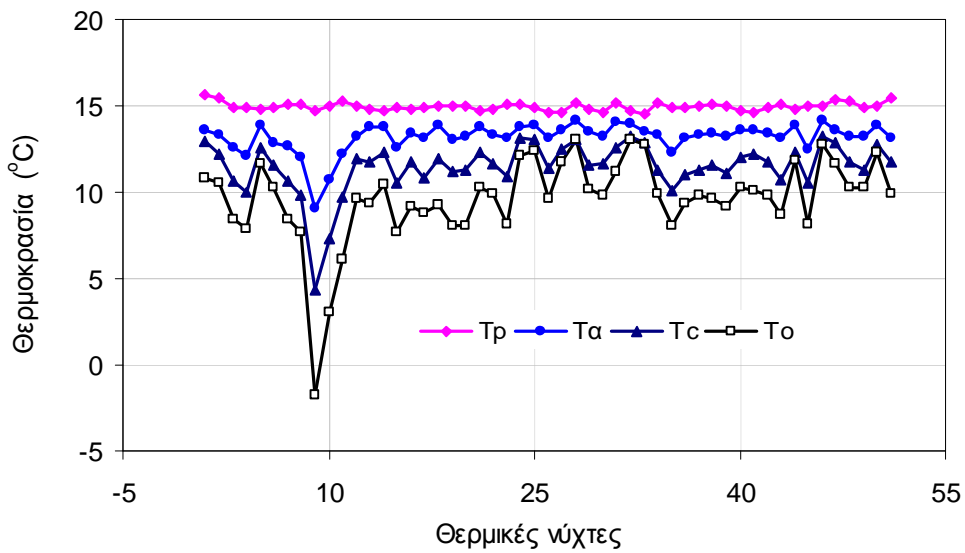
Σχήμα 5-3: Χρονική εξέλιξη της μεταβολής της T_α με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας

5.2.4 ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΣΩΝ ΤΙΜΩΝ ΝΥΧΤΑΣ

Στα σχήματα 5-4 και 5-5 απεικονίζεται η θερμική συμπεριφορά του θερμοκηπίου στην διάρκεια της πρώτης θερμικής περιόδου. Οι συνολικές νύχτες που εμφανίζονται στον άξονα x απεικονίζονται με χρονική αλληλουχία. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα διαγράμματα είναι η διακύμανση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα και του καλύμματος, η θερμοκρασία αναφοράς του συστήματος ($T_p = 15 \pm 1^\circ\text{C}$) και η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος, είναι δε οι μέσες τιμές θερμοκρασίας νύχτας που προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα αυτής της περιόδου. Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 5-4 απεικονίζονται οι θερμικές νύχτες με χρήση και ανακυκλοφορία θερμού αέρα. Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι ίδια ή ελαφρώς υψηλότερη κατά 1°C σε σχέση με τη θερμοκρασία αναφοράς, ενώ η θερμοκρασία καλύμματος κυμαίνεται συνήθως $2 - 3^\circ\text{C}$ χαμηλότερα φτάνοντας ενίοτε και τους 4°C όταν η νύχτα είναι αρκετά κρύα. Στο σχήμα 5-5 απεικονίζονται οι θερμικές νύχτες με χρήση συστήματος υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι σημαντικά χαμηλότερη από την θερμοκρασία αναφοράς $2 - 5^\circ\text{C}$ ενώ η θερμοκρασία καλύμματος είναι ακόμα πιο χαμηλότερη και κυμαίνεται από $3 - 7^\circ\text{C}$ ακολουθώντας την πτώση της εξωτερικής θερμοκρασίας. Αυτά τα αποτελέσματα είναι τα αναμενόμενα σύμφωνα με τις αρχές λειτουργίας της υπέρυθρης ακτινοβολίας και δίνουν μια πρώτη εκτίμηση όσον αφορά την μείωση των ενεργειακών απωλειών του θερμοκηπίου που φαίνεται να είναι σημαντική και τις δυνατότητες χρήσης της υπέρυθρης ακτινοβολίας στα θερμοκήπια.



Σχήμα 5-4: Διακύμανση μέσω πειραματικών τιμών εσωτερικού αέρα και καλύμματος με χρήση θερμού αέρα.

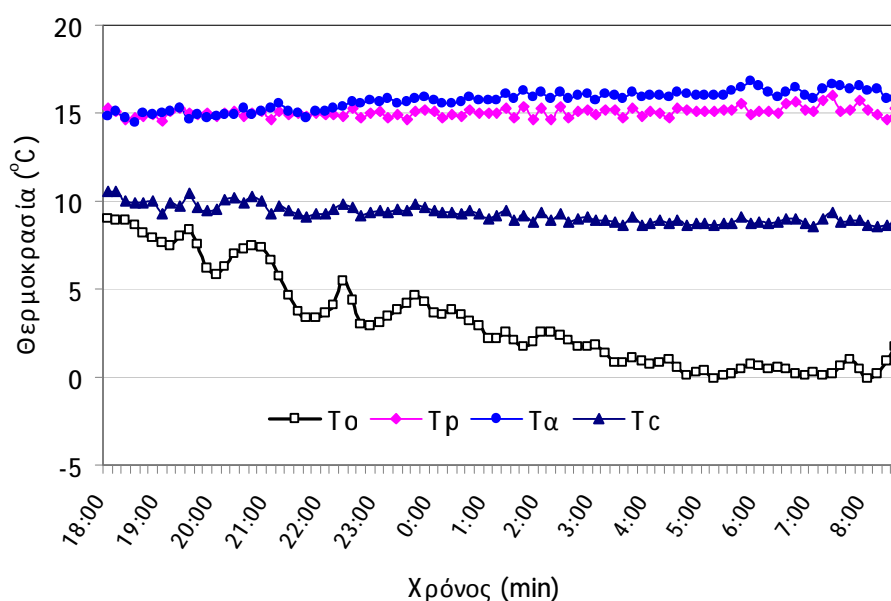


Σχήμα 5-5: Διακύμανση μέσω πειραματικών τιμών εσωτερικού αέρα και καλύμματος με χρήση **IR**.

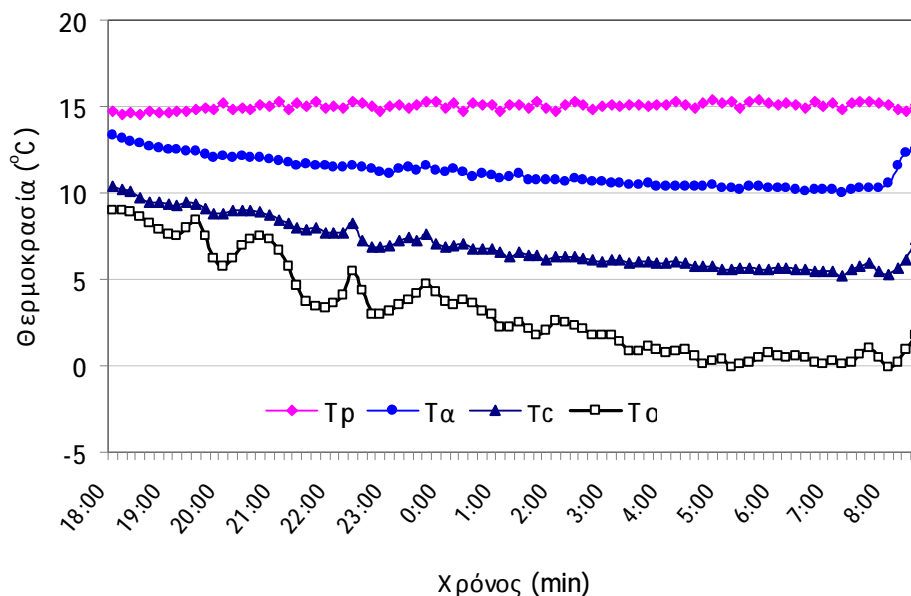
5.3 ΔΕΥΤΕΡΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ

5.3.1 ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΜΙΑΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΧΕΙΜΕΡΙΝΗΣ ΝΥΧΤΑΣ

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα και καλύμματος των πειραματικών θερμοκηπίων κατά την διάρκεια μιας πολύ κρύας νύχτας του Δεκεμβρίου (8-9/12) με μέση θερμοκρασία $\overline{T_o}=3.17\text{ }^{\circ}\text{C}$, χωρίς άνεμο $\overline{WS}=0.38\text{ m/sec}$ και μέση θερμοκρασία ουρανού $T_{sky}=260\text{K}$. Στην περίπτωση της υπέρυθρης θέρμανσης η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι αρκετά χαμηλότερη $2 - 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ σε σχέση με την θερμοκρασία αναφοράς που διατηρείται στην καθορισμένη τιμή της και μειώνεται σταδιακά ακολουθώντας την τάση της εξωτερικής θερμοκρασίας (σχήμα 5-6). Αντίθετα, στην περίπτωση του συμβατικού συστήματος η εσωτερική θερμοκρασία διατηρείται στην περιοχή της θερμοκρασίας αναφοράς και λίγο υψηλότερα (σχήμα 5-7). Η θερμοκρασία καλύμματος είναι χαμηλότερη και στα δύο συστήματα, είναι όμως αισθητά πιο χαμηλή στο θερμοκήπιο υπέρυθρης θέρμανσης και κυμαίνεται από $5-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερα σε σχέση με την θερμοκρασία αναφοράς.



Σχήμα 5-6: Χρονική εξέλιξη της μεταβολής της T_a κατά την διάρκεια κρύας χειμερινής νύχτας με χρήση θερμού αέρα

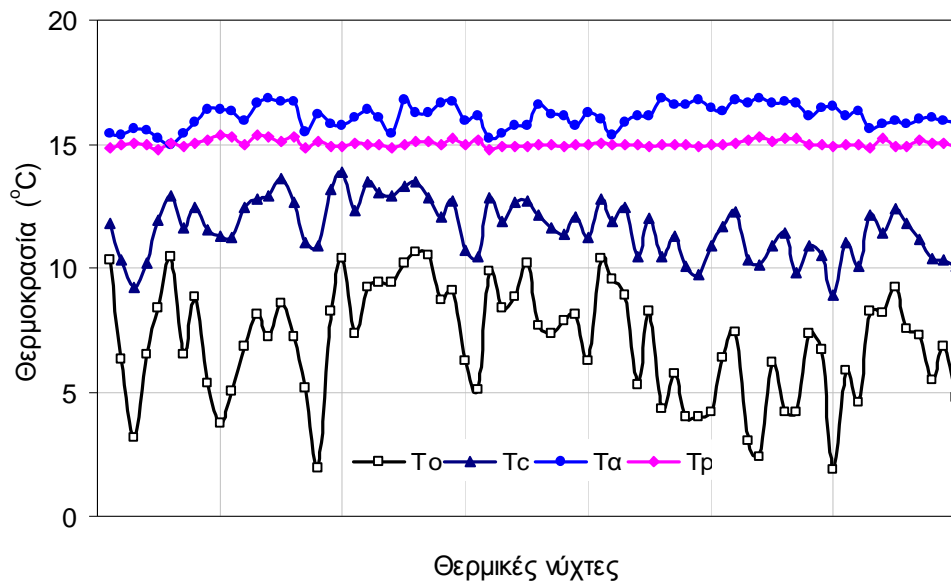


Σχήμα 5-7: Χρονική εξέλιξη της μεταβολής της T_a κατά την διάρκεια κρύας χειμερινής νύχτας με υπέρυθρη θέρμανση

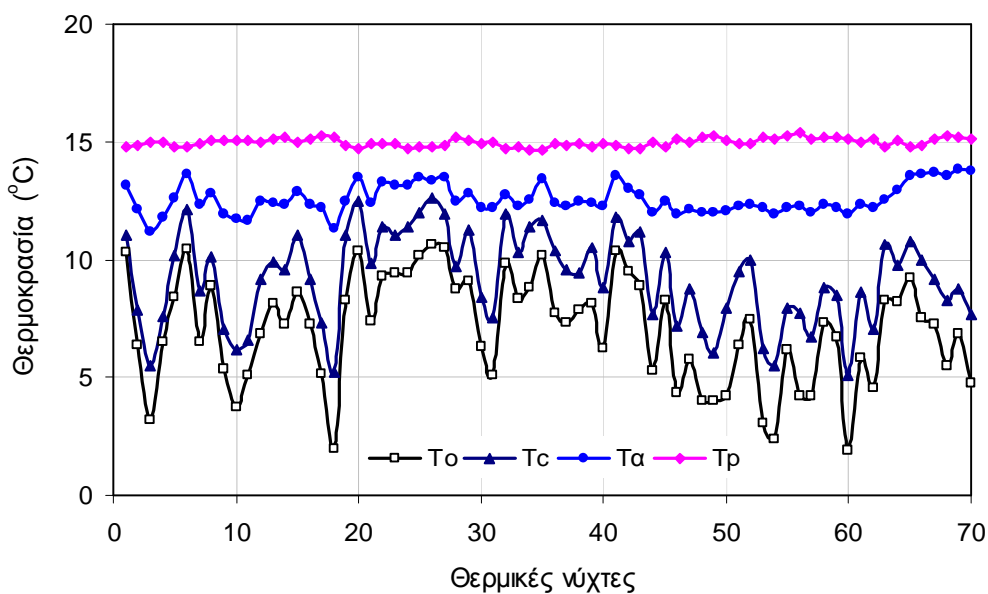
5.3.2 ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΣΩΝ ΤΙΜΩΝ ΝΥΧΤΑΣ

Στο σχήμα 5-8 απεικονίζεται η θερμική συμπεριφορά των δύο ταυτόσημων πειραματικών θερμοκηπίων κάτω από τις ίδιες ακριβώς κλιματολογικές συνθήκες στην δεύτερη θερμική περίοδο. Και σε αυτά τα διαγράμματα οι τάσεις της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα και του καλύμματος παραμένουν ίδιες όπως στην πρώτη θερμική περίοδο. Με χρήση και ανακυκλοφορία θερμού αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι ίδια ή λίγο υψηλότερη έως $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ από την θερμοκρασία αναφοράς και κάποιες πολύ κρύες νύχτες που η λειτουργία του αερόθερμου είναι συνεχής φτάνει έως και $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ υψηλότερα, ενώ η θερμοκρασία καλύμματος κυμαίνεται και πάλι από $2 - 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερα. Η αντίστοιχη διακύμανση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα και του καλύμματος με χρήση υπέρυθρης θέρμανσης απεικονίζεται στο σχήμα 5-9. Η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι σημαντικά χαμηλότερη από την θερμοκρασία αναφοράς $2 - 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ενώ η θερμοκρασία καλύμματος είναι ακόμα πιο χαμηλότερη και κυμαίνεται από $4 - 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερα. Η μείωση των ενεργειακών απωλειών σε αυτό το θερμοκήπιο είναι σημαντική σε σχέση με το συμβατικό και είναι της τάξεως του 45%. Μια παρατήρηση στο ίδιο σχήμα είναι ότι τις τελευταίες νύχτες παρά το ότι επικρατούν χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες, η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα να είναι υψηλότερη κατά $0.5-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ από αντίστοιχες νύχτες με παρόμοιες κλιματολογικές συνθήκες. Αυτό οφείλεται στο χαρακτηριστικό γνώρισμα της πειραματικής καλλιέργειας, της αργής διαδιάστατης ανάπτυξης στο μεγαλύτερο μέρος του καλλιεργητικού χρόνου (4/5) και της απότομης και ταχείας ανάπτυξης προς το τέλος του χρόνου (1/5). Αποτέλεσμα αυτής της ανάπτυξης είναι η κάλυψη του θερμοζεύγους αναφοράς T_p από μεγαλύτερο όγκο φύλλων (καλύπτεται ήδη με προστατευτική επιφάνεια ανάκλασης από την ακτινοβολία των λαμπτήρων). Αυτό είναι μια ασφαλής τακτική για την τελική ποιότητα του παραγομένου προϊόντος. Πιθανώς όμως να υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης του θερμικού ελέγχου του

θερμοκηπίου αυτήν την τελευταία περίοδο ταχείας αύξησης της καλλιέργειας (που είναι όμως γνώρισμα των περισσότερων θερμοκηπιακών καλλιεργειών) κυρίως για να μην υπάρχει άσκοπη χρήση ενέργειας.



Σχήμα 5-8: Διακύμανση μέσω πειραματικών τιμών εσωτερικού αέρα και καλύμματος με χρήση θερμού αέρα

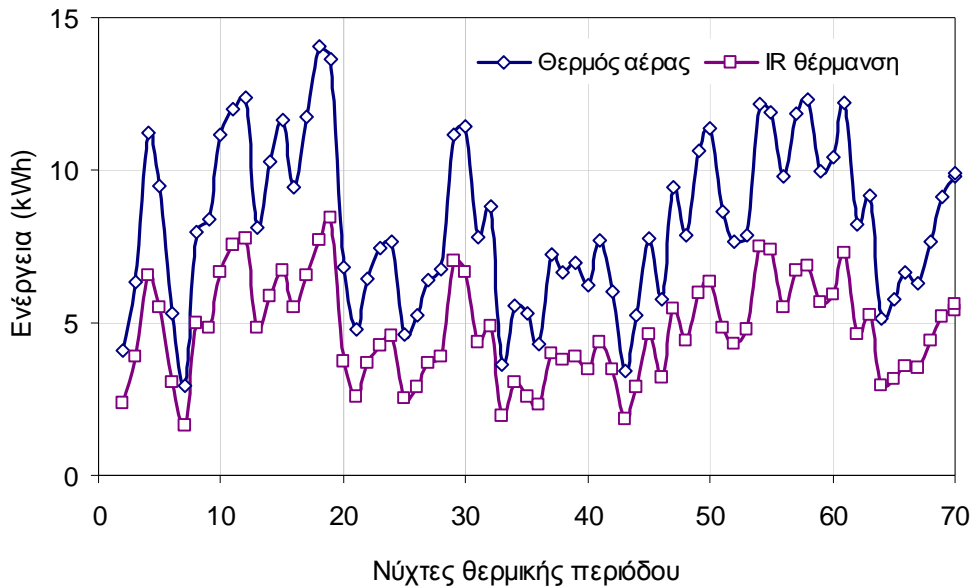


Σχήμα 5-9: Διακύμανση μέσω πειραματικών τιμών θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα και καλύμματος με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας

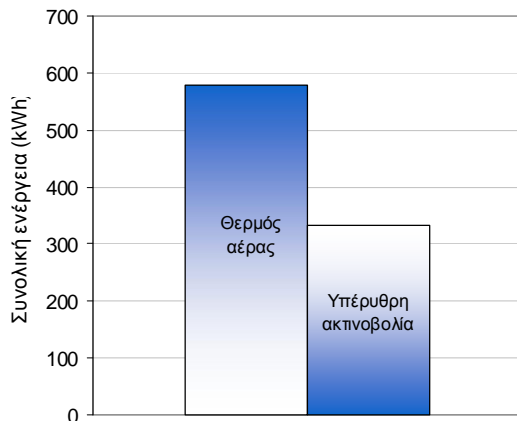
5.3.3 ΜΕΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ

Στο σχήμα 5-10 απεικονίζεται η μέση νυχτερινή ενεργειακή κατανάλωση των δύο θερμοκηπίων την δεύτερη θερμική περίοδο. Για την ποσοτικοποίηση της

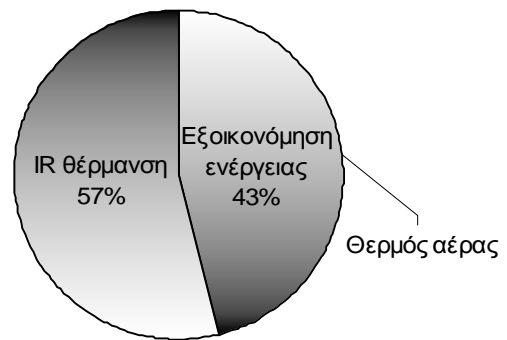
κατανάλωσης χρησιμοποιήθηκαν ο συνολικός χρόνος που λειτούργησαν τα δύο συστήματα θέρμανσης κάθε νύχτα και η πραγματική ισχύς του κάθε συστήματος αντίστοιχα. Στο σχήμα 5-11 φαίνεται η συνολική ενεργειακή κατανάλωση για το κάθε σύστημα θέρμανσης και στο σχήμα 5-12 αποτυπώνεται το συνολικό ενεργειακό όφελος που προκύπτει από την χρήση της υπέρυθρης ακτινοβολίας που φτάνει το **43%**. Αντίστοιχη ενεργειακή κατανάλωση ($\pm 1\%$) μετρήθηκε από το ηλεκτρονικό βατόμετρο του κάθε θερμοκηπίου πιστοποιώντας τις δυνατότητες εφαρμογής της υπέρυθρης θέρμανσης.



Σχήμα 5-10: Μέση συνολική ενεργειακή κατανάλωση κάθε νύχτας κατά την διάρκεια της δεύτερης θερμικής περιόδου



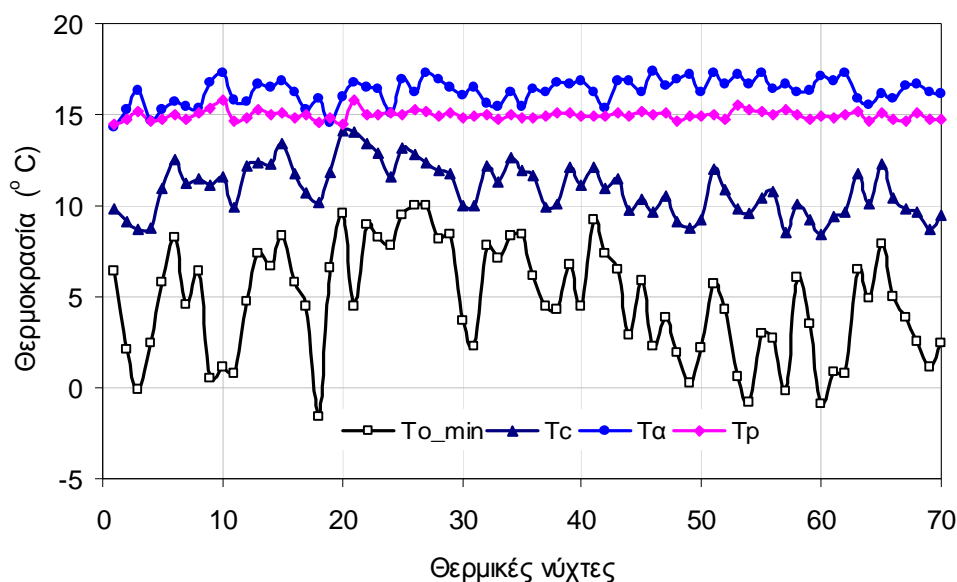
Σχήμα 5-11: Μέση συνολική ενεργειακή κατανάλωση των συστημάτων θέρμανσης την δεύτερη θερμική περίοδο



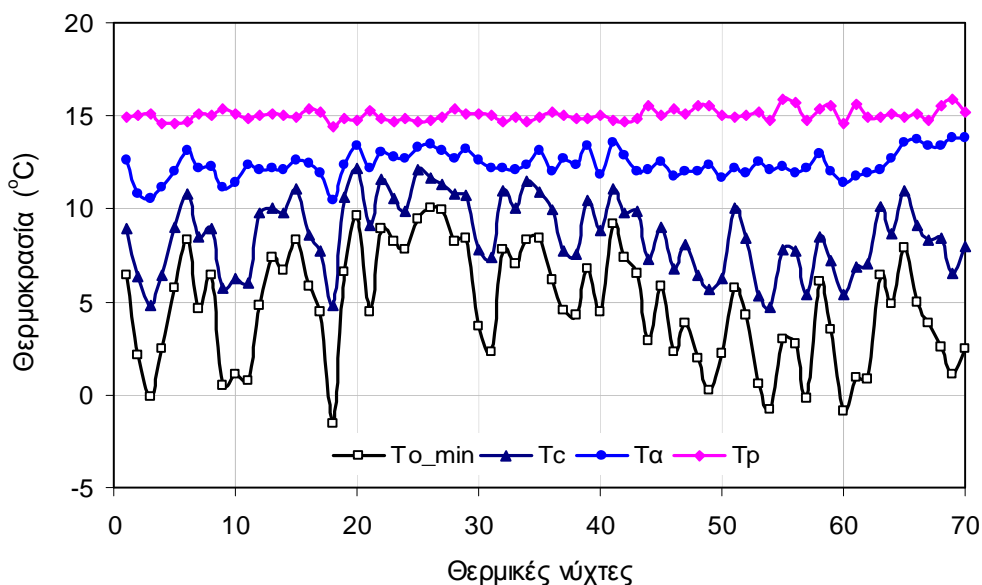
Σχήμα 5-12: Ενεργειακό όφελος της υπέρυθρης ακτινοβολίας ως ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας με χρήση συμβατικού συστήματος θέρμανσης

5.3.4 ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΤΙΜΩΝ - ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΑΙΤΗΣΗ

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι πειραματικές τιμές θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα και καλύμματος στα πειραματικά θερμοκήπια όπως αυτές διαμορφώνονται, όταν η θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος λαμβάνει κάθε νύχτα την ελάχιστη τιμή της. Η τάση των παραπάνω τιμών θερμοκρασίας στο συμβατικό σύστημα θέρμανσης παραμένει σχεδόν ίδια όπως όταν χρησιμοποιούνται οι μέσες τιμές. Έτσι η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι ίδια ή υψηλότερη έως $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ από την θερμοκρασία αναφοράς και η θερμοκρασία καλύμματος χαμηλότερη από $2 - 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (σχήμα 5-13). Στο θερμοκήπιο υπέρυθρης θέρμανσης η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι σημαντικά χαμηλότερη από την θερμοκρασία αναφοράς κατά $2 - 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ η θερμοκρασία καλύμματος είναι ακόμα πιο χαμηλότερη κυμαινόμενη από $4 - 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ακολουθώντας την πτώση της εξωτερικής θερμοκρασίας (σχήμα 5-14).

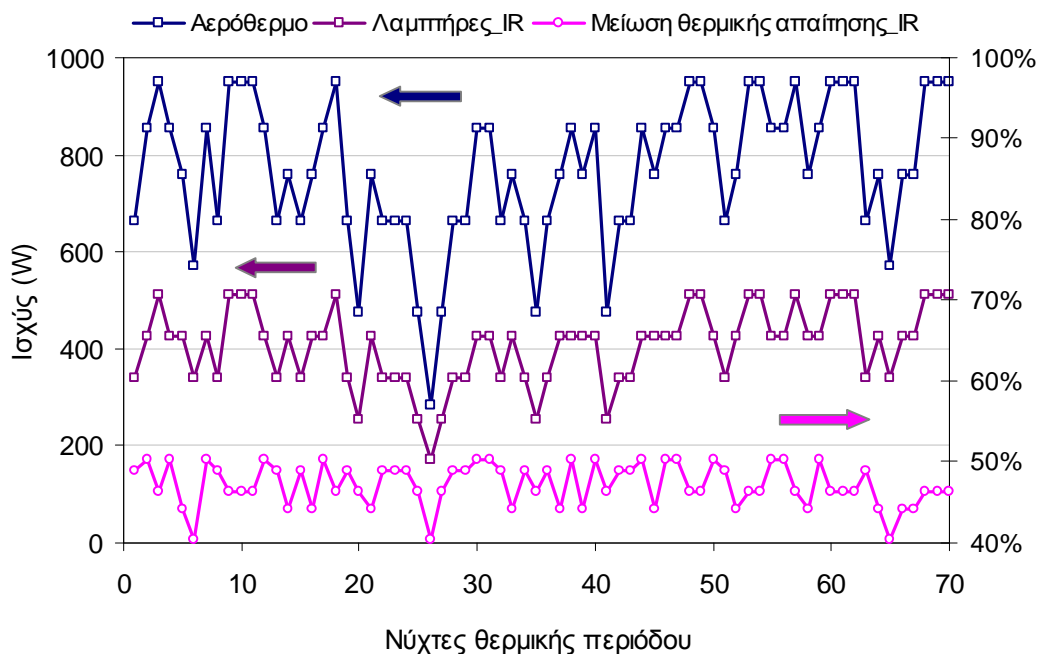


Σχήμα 5-13: Διακύμανση ελάχιστων πειραματικών τιμών θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα και καλύμματος με χρήση θερμού αέρα



Σχήμα 5-14: Διακύμανση ελάχιστων πειραματικών τιμών θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα και καλύμματος με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας

Η μέγιστη ενεργειακή απαίτηση του κάθε θερμοκηπίου όταν η εξωτερική θερμοκρασία λαμβάνει την ελάχιστη τιμή κάθε νύχτα φαίνεται στο σχήμα 5-15 το οποίο επιβεβαιώνει και την διαστασιολόγηση συστημάτων θέρμανσης που χρησιμοποιούνται, που έγινε λαμβάνοντας ως ελάχιστη τιμή εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος $T_o=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ και επιθυμητή θερμοκρασία φυτών $Tp=15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η μείωση της ενεργειακής απαίτησης στο θερμοκήπιο υπέρυθρης θέρμανσης είναι σημαντική και φτάνει το 47% καθώς η εξωτερική θερμοκρασία μειώνεται.



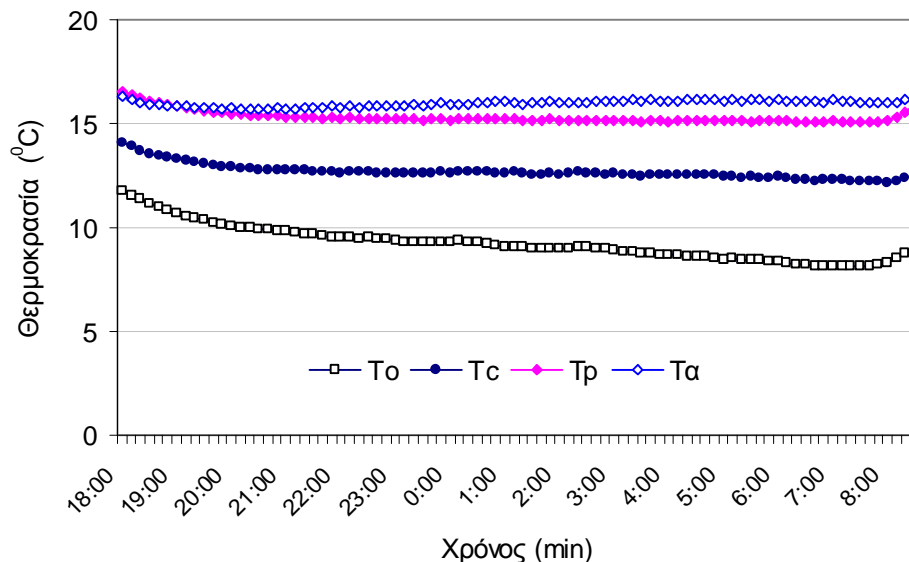
Σχήμα 5-15: Μέγιστη ενεργειακή κατανάλωση των συστημάτων θέρμανσης στην ελάχιστη τιμή της κάθε νύχτας

5.4 ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

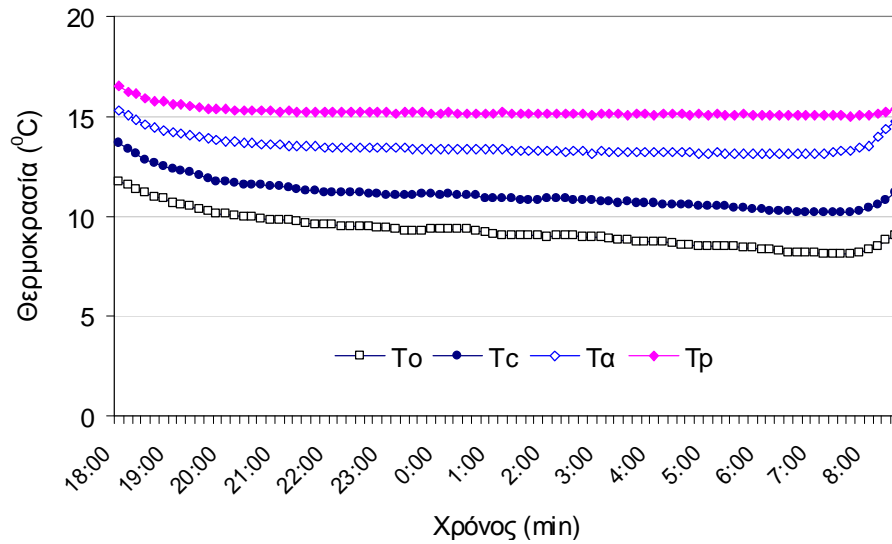
5.4.1 ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΤΟΥ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΝΥΧΤΑΣ

Για την παρακολούθηση της εξέλιξης της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα και του καλύμματος της μέσης νύχτας χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος όλων των δεκάλεπτων για όλη την δεύτερη θερμική περίοδο. Αυτός ο μέσος όρος αναφέρεται στο ημερολογιακό διάστημα από 1/11/09 έως 31/3/09 και στο χρονικό από 18:00 έως 8:30 που πρακτικά είναι το διάστημα που η εφαρμογή θέρμανσης κρίνεται απαραίτητη. Πιο συγκεκριμένα στο σχήμα 5-16 απεικονίζεται η θερμική συμπεριφορά του θερμοκηπίου με συμβατική θέρμανση όπου η θερμοκρασία αναφοράς είναι $T_p = 15\text{ }^\circ\text{C}$, η θερμοκρασία εσωτερικού αέρα T_o είναι ίδια ή λίγο υψηλότερη κατά $1\text{ }^\circ\text{C}$ και η θερμοκρασία καλύμματος είναι $1\text{-}2.5\text{ }^\circ\text{C}$ χαμηλότερη από την θερμοκρασία αναφοράς. Για το θερμοκήπιο υπέρυθρης θέρμανσης με σταθερή θερμοκρασία αναφοράς $T_p = 15\text{ }^\circ\text{C}$, η θερμοκρασία εσωτερικού αέρα T_o είναι $2\text{ }^\circ\text{C}$ χαμηλότερη από την θερμοκρασία αναφοράς και η θερμοκρασία καλύμματος $3\text{-}4\text{ }^\circ\text{C}$ ακόμα χαμηλότερα (σχήμα 5-17). Αυτές οι τάσεις διακύμανσης της θερμοκρασίας είναι αναμενόμενες και για τα δύο συστήματα θέρμανσης και παρόμοιες με τις τάσεις θερμοκρασίας όταν χρησιμοποιούνται οι μέσες τιμές κάθε νύχτας.

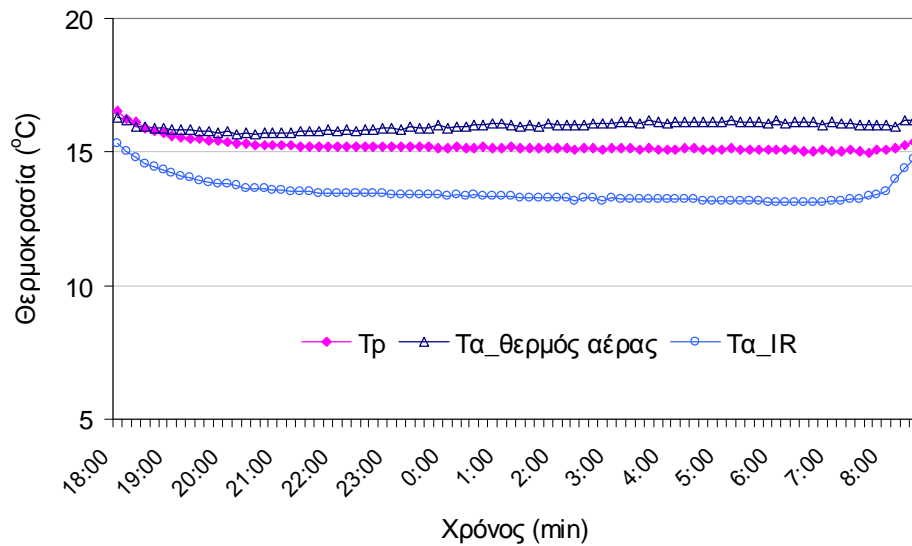
Οι παραπάνω διαφορές θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα και καλύμματος σε σχέση με την θερμοκρασία αναφοράς αποτυπώνονται στα διαγράμματα 5-18 και 5-19 και για τα δύο συστήματα θέρμανσης.



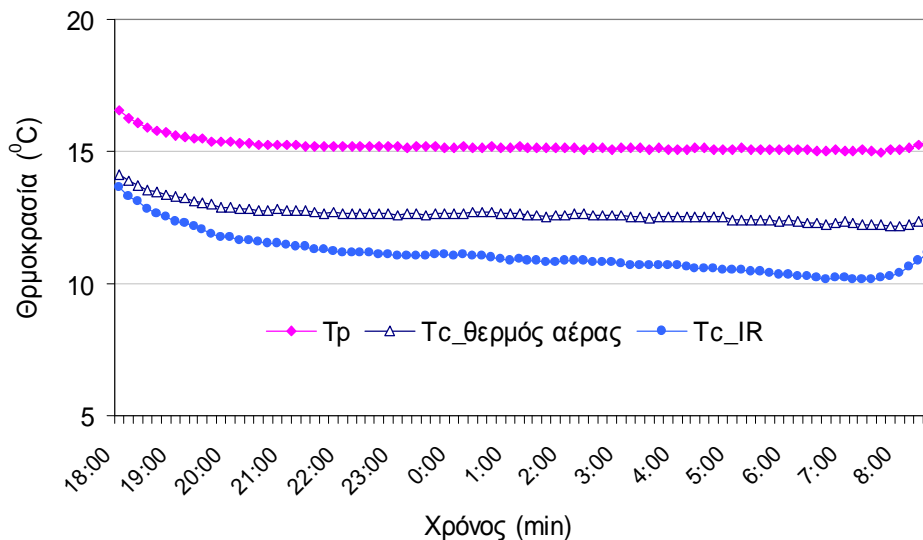
Σχήμα 5-16: Μεταβολής της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα και του καλύμματος στην διάρκεια της μέσης νύχτας με χρήση θερμού αέρα



Σχήμα 5-17: Μεταβολής της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα και του καλύμματος στην διάρκεια της μέσης νύχτας με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας



Σχήμα 5-18: Διαφορά θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα σε σχέση με την θερμοκρασία αναφοράς και για τα δύο συστήματα θέρμανσης

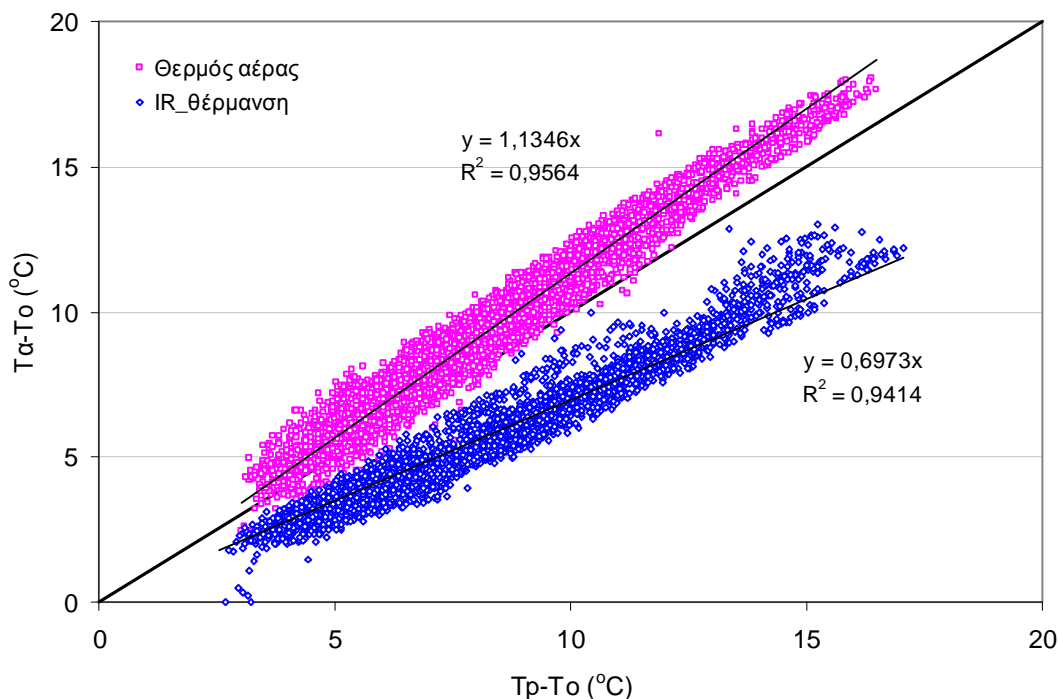


Σχήμα 5-19: Διαφορά θερμοκρασίας καλύμματος σε σχέση με την θερμοκρασία αναφοράς και για τα δύο συστήματα θέρμανσης

5.4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Το όφελος της υπέρυθρης θέρμανσης σχετίζεται με την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί την επιθυμητή θερμοκρασία του φυτικού θόλου ενώ ο εσωτερικός αέρας του θερμοκηπίου διατηρείται σε σημαντικά χαμηλότερη θερμοκρασία. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για το διάγραμμα 5-20 είναι οι μέσοι όροι κάθε 10/λέπτου έτσι όπως λαμβάνονται από το σύστημα καταγραφής δεδομένων, της θερμοκρασίας αναφοράς T_p , της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα T_a και της θερμοκρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος T_o . Ειδικότερα, το διάγραμμα προκύπτει από τα ζεύγη τιμών $(T_p - T_o)$ και $(T_a - T_o)$ για όλα τα δεκάλεπτα των νυχτών της θερμικής περιόδου. Οι ρόμβοι (μπλε σημεία) αντιστοιχούν στην υπέρυθρη θέρμανση και τα τετράγωνα (κόκκινα σημεία) στην συμβατική θέρμανση με θερμό αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής. Η διαγώνιος αναπαριστά το όριο όταν η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι ίση με την θερμοκρασία αναφοράς ($T_a = T_p$).

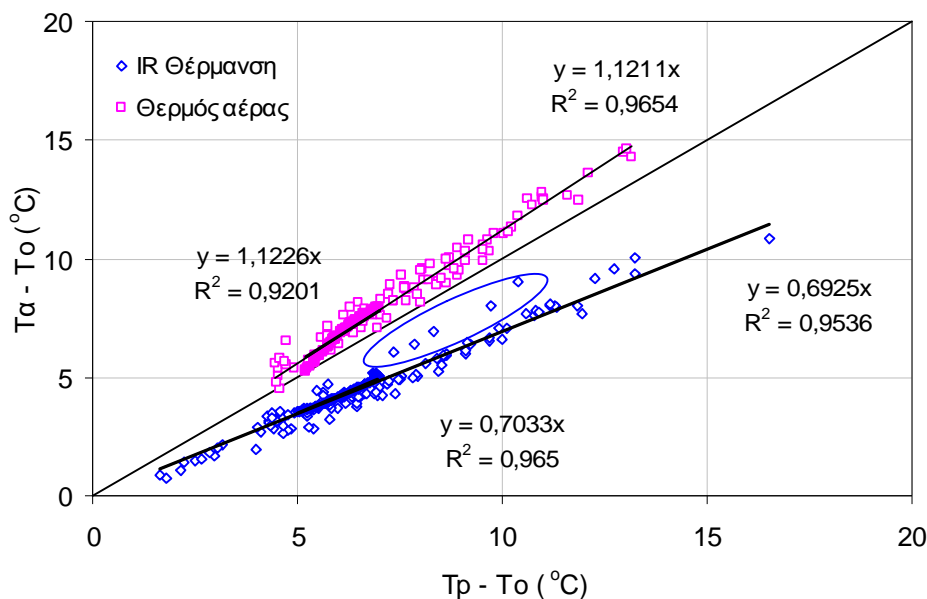
Το δυνητικό όφελος της υπέρυθρης θέρμανσης, απεικονίζεται καθαρά στο ίδιο σχήμα. Η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι πάντα χαμηλότερη σε σχέση με την θερμοκρασία αναφοράς που φαίνεται από την διαγώνιο. Αντιθέτως η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα όταν χρησιμοποιείται θερμός αέρας είναι σχεδόν πάντα ελαφρώς πάνω από την διαγώνιο. Τα δεδομένα και για τις δύο περιπτώσεις θέρμανσης είναι ικανοποιητικά προσεγγίσιμα από ευθείες, που υποδεικνύουν, ότι οι θερμικές απώλειες αυξάνουν ανάλογα με την πτώση της εξωτερικής θερμοκρασίας T_o . Η σύγκριση των κλίσεων των δύο ευθειών δίνει αναμενόμενο ενεργειακό όφελος 40%. Φαίνεται ότι το απόλυτο ενεργειακό όφελος αυξάνει γραμμικά ως προς την διαφορά της θερμοκρασίας αναφοράς και της εξωτερικής θερμοκρασίας και κατά συνέπεια κάνει την υπέρυθρη θέρμανση ιδιαίτερα ελκυστική για ψυχρότερα κλίματα.



Σχήμα 5-20: Ενεργειακό όφελος με βάση τις θερμοκρασιακές διαφορές των παραμέτρων με χρήση μέσων τιμών 10/λεπτών της θερμικής περιόδου.

Το διάγραμμα 5-21 σχεδιάζεται με βάση τις αντίστοιχες μέσες τιμές θερμοκρασίας νύχτας των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο παραπάνω διάγραμμα οι οποίες προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και τις χρονικές ακολουθίες της κάθε νύχτας και για τις δύο θερμικές περιόδους λειτουργίας των πειραματικών θερμοκηπίων. Ξανασχεδιάζονται οι διαφορές ($T_p - T_o$) και ($T_a - T_o$). Οι ανοιχτοί ρόμβοι (μπλε) αντιστοιχούν στην υπέρυθρη θέρμανση και τα ανοιχτά τετράγωνα (κόκκινα) στην συμβατική θέρμανση και η διαγώνιος αναπαριστά το όριο όταν η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι ίση με την θερμοκρασία αναφοράς ($T_a = T_p$). Τα δεδομένα προσεγγίζονται ικανοποιητικά από ευθείες και η σύγκριση των κλίσεων των δύο ευθειών δίνει αναμενόμενο ενεργειακό όφελος της τάξεως του 40%. Τα σημεία που βρίσκονται σε κύκλο αντιστοιχούν στο τελευταίο μέρος της καλλιεργητικής περιόδου (5-8 ημέρες) που υπάρχει ταχεία ανάπτυξη της καλλιέργειας και κάλυψη του θερμοζεύγους αναφοράς T_p από μεγαλύτερο όγκο φυτών (όπως έχει ήδη αναφερθεί). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μικρή αύξηση της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης και μείωση του αναμενόμενου ενεργειακού οφέλους 1-2% όταν αυτές οι ημέρες συνυπολογίζονται στην υπόλοιπη καλλιεργητική περίοδο.

Στο ίδιο διάγραμμα αποτυπώνονται οι θερμοκρασιακές διαφορές των ιδίων παραμέτρων με χρήση τιμών της μέσης νύχτας όλης της θερμικής περιόδου χρονικού διαστήματος 18:00-8:00. Οι γεμισμένοι ρόμβοι (μπλε σημεία) αντιστοιχούν στην υπέρυθρη θέρμανση, τα γεμισμένα τετράγωνα (κόκκινα) στην συμβατική θέρμανση και η σύγκριση των κλίσεων των ευθειών που προσεγγίζουν τα σημεία δίνει αναμενόμενο ενεργειακό όφελος είναι 38 %.



Σχήμα 5-21: θερμοκρασιακές διαφορές παραμέτρων με χρήση μέσων τιμών θερμοκρασίας και τιμών μέσης νύχτας θερμικής περιόδου και ενεργειακό όφελος.

5.4.3 ΒΑΘΜΟΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Κάθε βαθμός διαφοράς της μέσης νυχτερινής εξωτερικής θερμοκρασίας από την επιθυμητή θερμοκρασία των φυτών, όταν αυτή είναι μικρότερη ονομάζεται βαθμωρά νύχτας. Στην παρούσα εργασία ο υπολογισμός των βαθμωρών θέρμανσης (HDh) κάθε θερμικής νύχτας, έγινε με χρήση αναλυτικής μεθόδου διότι υπάρχουν αναλυτικά μετεωρολογικά δεδομένα για όλη την θερμική περίοδο. Η πρόσβαση σε τέτοιου είδους μετεωρολογικά δεδομένα συνήθως δεν είναι διαθέσιμη για την πλειονότητα των μελετητών. Ο υπολογισμός έγινε χρησιμοποιώντας ως θερμοκρασίες βάσης τους μέσους όρους κάθε 10/λεπτού της θερμοκρασίας αναφοράς T_p του θερμοκηπιακού συστήματος και της θερμοκρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος T_o αντίστοιχα της κάθε θερμικής νύχτας η οποία έχει n 10/λεπτα, και εκφράζεται από την σχέση:

$$HDh_n = \sum_{i=1}^{i=n} h(\bar{T}_{p_i} - \bar{T}_{o_i})$$

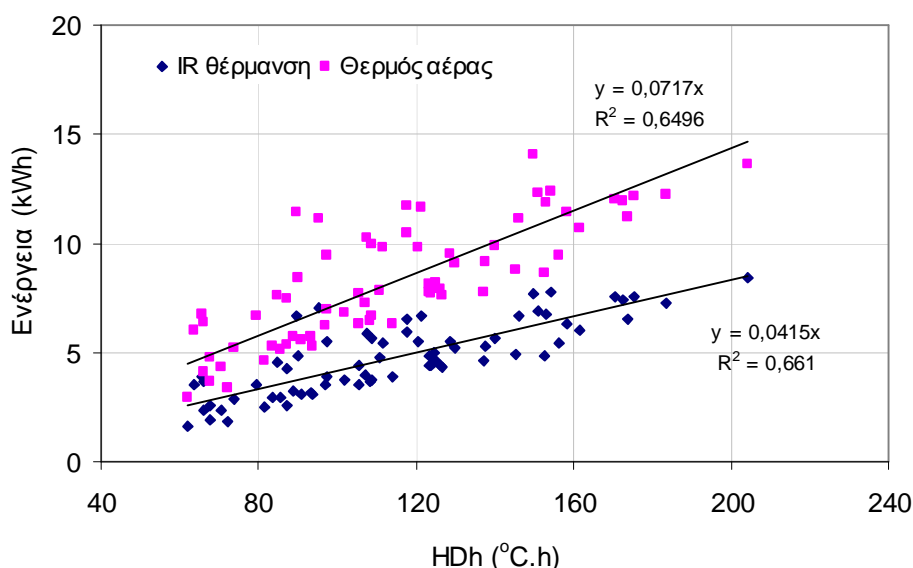
Στην παραπάνω σχέση και σύμφωνα με τον ορισμό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μέσοι όροι της θερμοκρασίας αναφοράς και της εξωτερικής θερμοκρασίας της κάθε νύχτας με το ίδιο ακριβώς αποτέλεσμα. Στο διάγραμμα 5-22 παρουσιάζονται οι βαθμωρές κάθε θερμικής νύχτας και η αντίστοιχη κατανάλωση. Τα μπλε σημεία αντιπροσωπεύουν την υπέρυθη θέρμανση και τα κόκκινα την συμβατική. Τα δεδομένα είναι προσεγγίζονται ικανοποιητικά από ευθείες, η σύγκριση των κλίσεων των δύο ευθειών δίνει επιτευχθέν ενεργειακό όφελος του 43% που είναι ακριβώς το ίδιο ποσοτικοποιημένο όφελος του σχήματος 5-11 και 5-12. Στο ίδιο σχήμα προσδιορίζεται ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας U ($W/m^2°C$) για το συμβατικό σύστημα και την υπέρυθη θέρμανση αντίστοιχα, στον οποίο εκφράζονται

μαζί οι ενεργειακές απώλειες λόγω συναγωγής/ακτινοβολίας του καλύμματος και οι απώλειες λόγω διαφυγών και αγωγής προς το έδαφος. Ως επιφάνεια αναφοράς λαμβάνεται η επιφάνεια καλύμματος του κάθε πειραματικού θερμοκηπίου. Αυτοί οι ολικοί συντελεστές μετάδοσης θερμότητας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους παραγωγούς για μία αξιόπιστη εκτίμηση των συνολικών απωλειών θερμότητας που θα λαμβάνουν χώρα στα θερμοκήπια όταν εφαρμόζονται τα αντίστοιχα συστήματα θέρμανσης. Οι συντελεστές δίδονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$E_{IR}=U_{IR} \cdot HDh \text{ και } U_{IR}=2.96 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$E_{conv}=U_{conv} \cdot HDh \text{ και } U_{conv}=5.12 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Παρατηρούμε ότι η τιμή του ολικού συντελεστή μετάδοσης της θερμότητας για το συμβατικό σύστημα θέρμανσης βρίσκεται εντός των ορίων της βιβλιογραφίας. Ο ολικός συντελεστής για την υπέρυθη θέρμανση είναι 43% μικρότερος δείχνοντας τις δυνατότητες της υπέρυθρης ακτινοβολίας.



Σχήμα 5-22: Βαθμώρες θέρμανσης και κατανάλωση ενέργειας

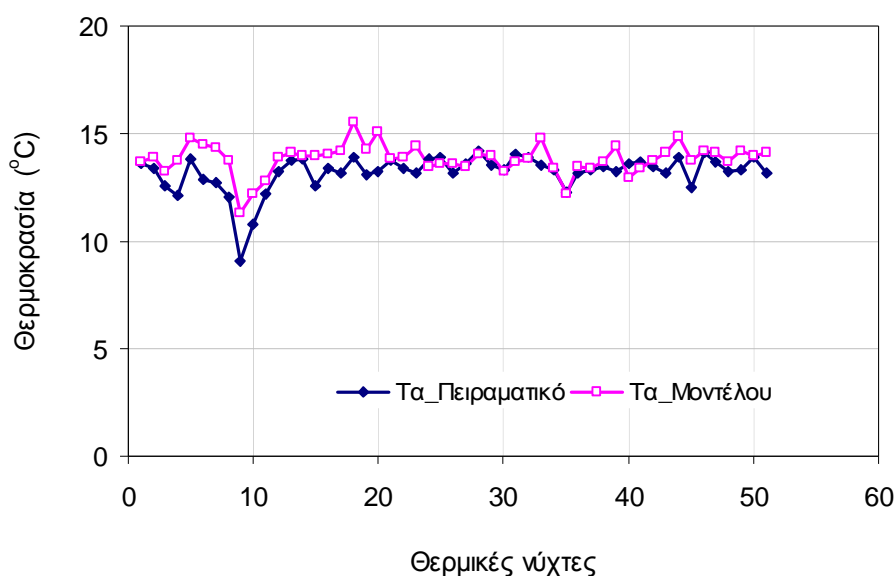
5.5 ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η ποιότητα του μοντέλου προσομοίωσης είναι σημαντική για την μεταφορά των πειραματικών αποτελεσμάτων στην κλίμακα των πραγματικών θερμοκηπίων παραγωγής. Γι αυτό τα θεωρητικά αποτελέσματα του μοντέλου συγκρίνονται με πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από συστηματικές μετρήσεις των παραγόντων εκείνων που ρυθμίζουν την θερμική συμπεριφορά του θερμοκηπίου και τις ενεργειακές του απώλειες κατά την εφαρμογή των δύο συστημάτων θέρμανσης.

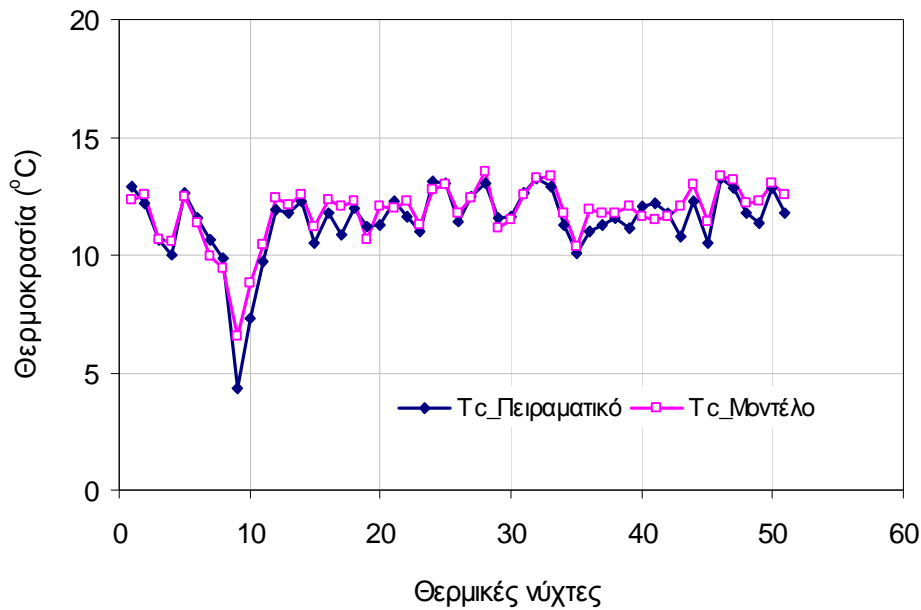
5.5.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΣΩΝ ΤΙΜΩΝ ΝΥΧΤΑΣ

Το μοντέλο προσομοίωσης που έχει αναπτυχθεί στο κεφάλαιο 3, είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να προβλέπει τις τιμές εσωτερικού αέρα και καλύμματος του θερμοκηπίου για δεδομένο σύνολο εξωτερικών κλιματολογικών συνθηκών γεωμετρικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών θερμοκηπίου. Στα παρακάτω διαγράμματα συγκρίνονται οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα και καλύμματος που προβλέπονται από το μοντέλο προσομοίωσης με τις αντίστοιχες μέσες πειραματικές νυχτερινές τιμές την πρώτη θερμική περίοδο (2008). Για τις εξωτερικές συνθήκες που υπεισέρχονται στο μοντέλο (T_o , T_{sky} , WS) χρησιμοποιούνται επίσης οι μέσες τιμές και συγκρίνονται.

Στα σχήματα 5-23 και 5-24 αποτυπώνονται οι προβλέψεις του μοντέλου για τις θερμοκρασίες εσωτερικού αέρα και καλύμματος κατά την διάρκεια λειτουργίας του θερμοκηπίου με υπέρυθρη θέρμανση και συγκρίνονται με πειραματικές τιμές. Πιο συγκεκριμένα η μέση διαφορά μεταξύ πειραματικών δεδομένων και εκτιμήσεων μοντέλου όσον αφορά την θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι $0.63\text{ }^{\circ}\text{C}$ και η τυπική απόκλιση των διαφορών (STDEV) είναι $0.70\text{ }^{\circ}\text{C}$ και όσον αφορά την θερμοκρασία του καλύμματος είναι $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $0.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα.

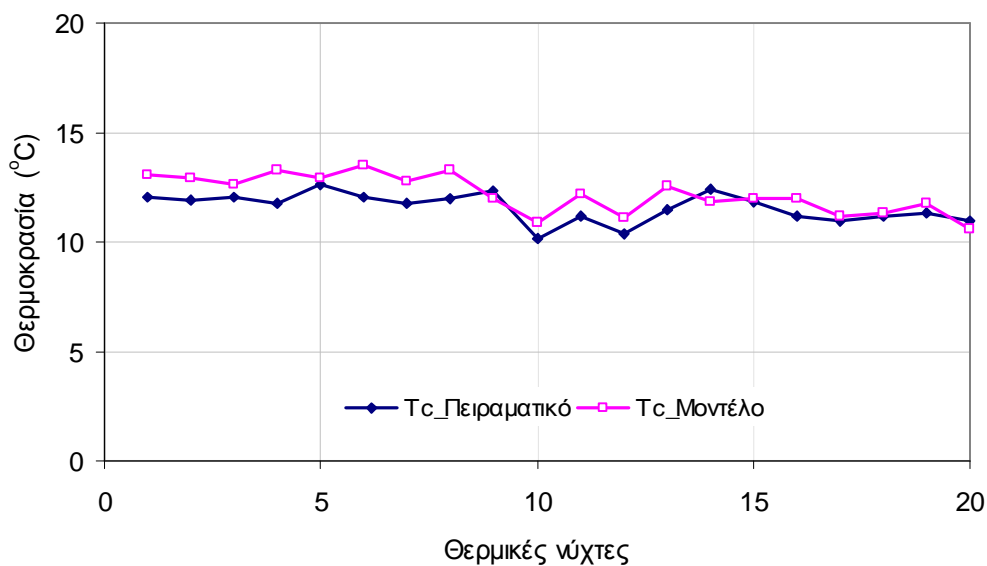


Σχήμα 5-23: Σύγκριση μέσων θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα (T_a) με τις πειραματικές τιμές με χρήση **IR**



Σχήμα 5-24: Σύγκριση μέσω των θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας καλύμματος (T_c) με τις πειραματικές τιμές με χρήση IR

Στο σχήμα 5-25 αποτυπώνονται οι μέσες προβλεπόμενες και οι μέσες πειραματικές θερμοκρασίες καλύμματος του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια χρήσης θερμού αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής και παρουσία ανεμιστήρα, οι οποίες παρουσιάζουν μέση διαφορά τιμών 0.61°C και τυπική απόκλιση διαφορών (STDEV) 0.61°C . Οι αναφερόμενες μέσες διαφορές και τυπικές αποκλίσεις για τα δύο συστήματα θέρμανσης καθώς και οι σχετικά υπερτιμημένες τιμές της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα του μοντέλου σε σχέση με τις πειραματικές οφείλονται κυρίως στην χρήση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ως θερμοκρασία ουρανού και στην χρήση ανεμόμετρου με υψηλό κατώφλι λειτουργίας (0.75 ms^{-1}). Η γενική εντύπωση που απορρέει από τα στοιχεία είναι ότι οι εκτιμήσεις του μοντέλου προσεγγίζουν πολύ ικανοποιητικά τα πειραματικά αποτελέσματα.

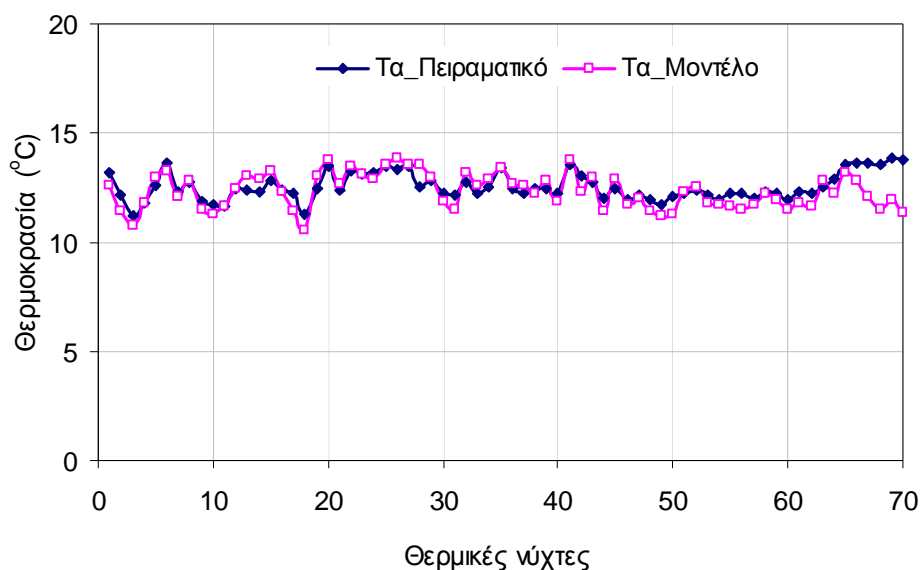


Σχήμα 5-25: Σύγκριση μέσω των θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας καλύμματος (T_c) με τις πειραματικές τιμές με χρήση θερμού αέρα.

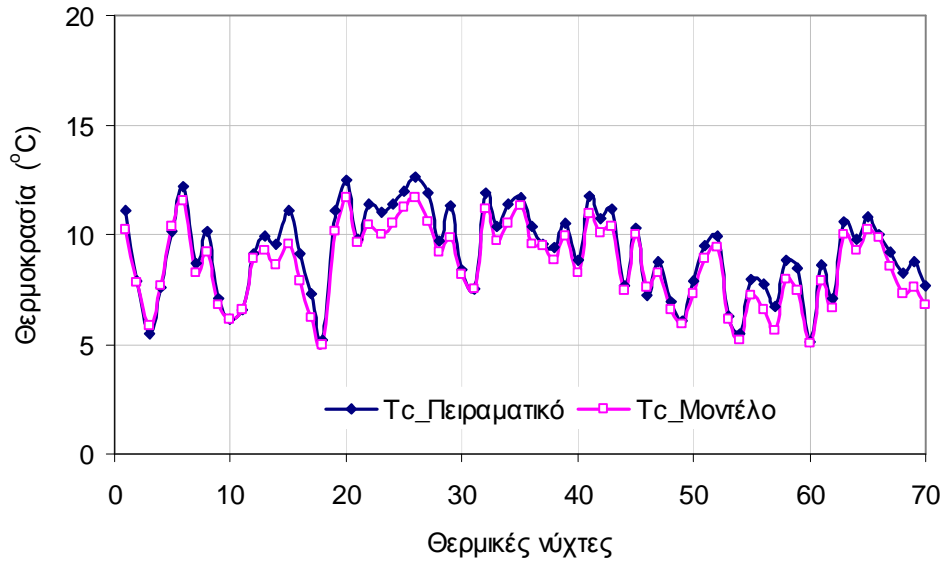
5.5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΕΥΤΕΡΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΣΩΝ ΤΙΜΩΝ

Στα παρακάτω διαγράμματα συγκρίνονται οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα και καλύμματος που προβλέπονται από το μοντέλο προσομοίωσης με τις αντίστοιχες μέσες πειραματικές νυχτερινές τιμές την δεύτερη θερμική περίοδο (2008/09). Για τις εξωτερικές συνθήκες που υπεισέρχονται στο μοντέλο (T_o , T_{sky} , WS) χρησιμοποιούνται επίσης οι μέσες τιμές και συγκρίνονται.

Στα σχήματα 5-26 και 5-27 αποτυπώνονται οι προβλέψεις του μοντέλου για τις θερμοκρασίες εσωτερικού αέρα και καλύμματος κατά την διάρκεια λειτουργίας του θερμοκηπίου με υπέρυθρη θέρμανση και συγκρίνονται με πειραματικές τιμές. Πιο συγκεκριμένα η μέση διαφορά πειραματικών δεδομένων και εκτιμήσεων μοντέλου όσον αφορά την θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}$ και η τυπική απόκλιση των διαφορών (STDEV) είναι $0.62\text{ }^{\circ}\text{C}$ και όσον αφορά την θερμοκρασία του καλύμματος είναι $0.59\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα. Σε αυτήν την περίοδο πειραμάτων παρατηρούμε ότι η προσέγγιση των εκτιμήσεων του μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα και όσο αφορά την θερμοκρασία εσωτερικού αέρα και καλύμματος είναι πολύ καλύτερη από την προσέγγιση της προηγούμενης περιόδου και οφείλεται στην χρήση αξιόπιστου ανεμόμετρου με κατώφλι λειτουργίας 0.15 m/sec και στην χρήση της θερμοκρασίας ουρανού. Κάποιες επιμέρους υποεκτιμήσεις των τιμών του μοντέλου που παρατηρούνται σε κάποιες θερμοκρασίες καλύμματος σε σχέση με τις πειραματικές, οφείλονται σε πολύ κρύες και καθαρές νύχτες συνεπώς και σε αντίστοιχες πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ουρανού που καταγράφονται αυτή τη περίοδο. Επίσης οι υψηλές πειραματικές τιμές θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα προς το τέλος της θερμικής, όπως έχει ήδη αναφερθεί, οφείλονται στην μερική κάλυψη του θερμοζεύγους αναφοράς από την καλλιέργεια με αποτέλεσμα το σύστημα θέρμανσης να λαμβάνει ψευδείς πληροφορίες και να λειτουργεί παραπάνω από το κανονικό.

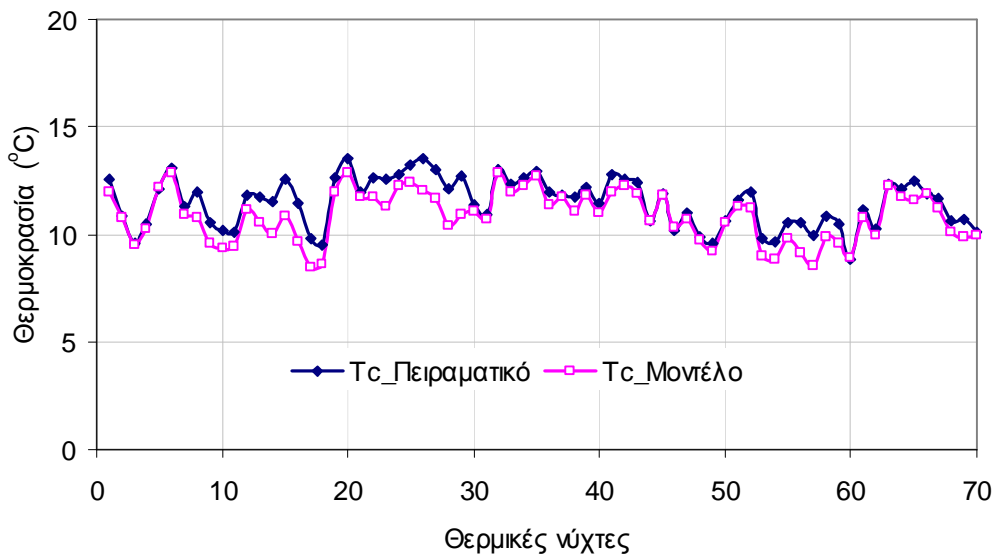


Σχήμα 5-26: Σύγκριση μέσων θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα (T_a) με τις πειραματικές τιμές με χρήση IR



Σχήμα 5-27: Σύγκριση μέσω των θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας καλύμματος (T_c) με τις μέσες πειραματικές τιμές με χρήση IR

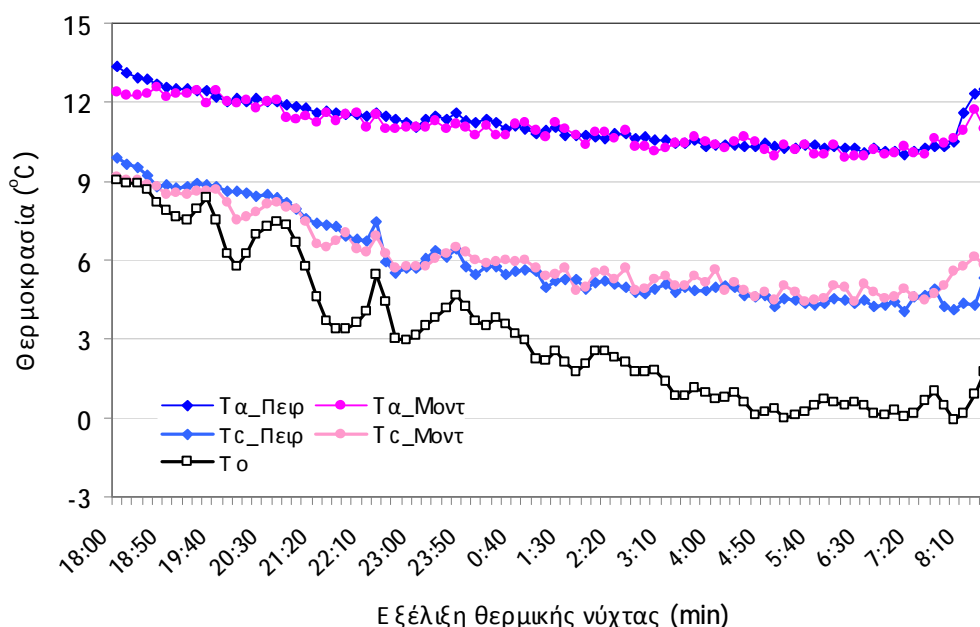
Στο σχήμα 5-28 αποτυπώνονται οι μέσες προβλεπόμενες και οι μέσες πειραματικές θερμοκρασίες καλύμματος του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια θέρμανσης με θερμό αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής, οι οποίες παρουσιάζουν μέση διαφορά τιμών 0.62°C και τυπική απόκλιση διαφορών (STDEV) 0.51°C . Και εδώ παρατηρείται μια καλή προσέγγιση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών εκτιμήσεων.



Σχήμα 5-28: Σύγκριση μέσω των θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας καλύμματος (T_c) με τις μέσες πειραματικές τιμές με χρήση θερμού αέρα

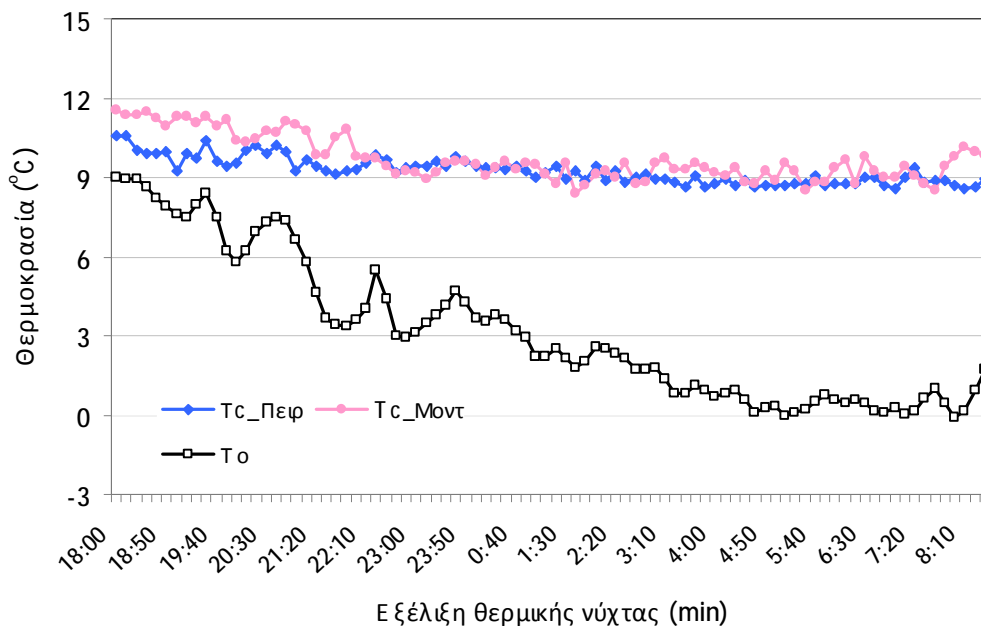
5.5.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΤ' ΑΤΗΝ ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΧΕΙΜΕΡΙΝΗΣ ΝΥΧΤΑΣ

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις πειραματικές τιμές για την θερμοκρασία εσωτερικού αέρα και καλύμματος στην διάρκεια της χρονικής εξέλιξης μιας πολύ κρύας νύχτας του Δεκεμβρίου (8-9/12) με μέση θερμοκρασία $\bar{T}_o = 3.17 \text{ }^\circ\text{C}$, χωρίς άνεμο $\overline{WS} = 0.38 \text{ ms}^{-1}$ και μέση θερμοκρασία ουρανού $T_{sky} = 260\text{K}$. Οι προβλεπόμενες τιμές από το μοντέλο και οι πειραματικές θερμοκρασίες εσωτερικού αέρα και καλύμματος του θερμοκηπίου με την υπέρυθρη θέρμανση παρουσιάζουν πολύ καλή προσέγγιση μεταξύ τους (σχήμα 5-29). Οι παραπάνω τιμές όσον αφορά την θερμοκρασία εσωτερικού αέρα παρουσιάζουν μέση διαφορά τιμών 0.18°C και τυπική απόκλιση διαφορών (STDEV) 0.31°C και όσον αφορά την θερμοκρασία καλύμματος 0.09°C και 0.49°C αντίστοιχα.



Σχήμα 5-29: Σύγκριση θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα (T_α) και καλύμματος (T_c) με τις πειραματικές τιμές στην χρονική εξέλιξη της νύχτας με χρήση **IR**

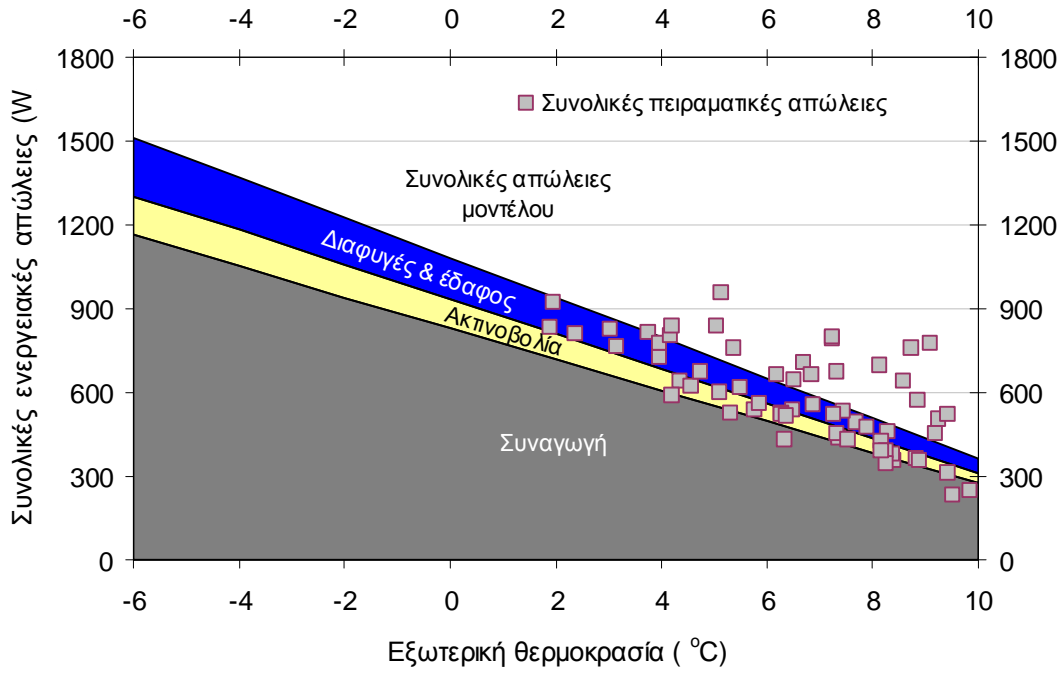
Στο σχήμα 5-30 αποτυπώνονται οι προβλεπόμενες τιμές από το μοντέλο και οι πειραματικές θερμοκρασίες καλύμματος του θερμοκηπίου με θέρμανση θερμού αέρα παρουσιάζοντας και αυτές οι τιμές πολύ καλή προσέγγιση μεταξύ τους με μέση διαφορά τιμών 0.45°C και τυπική απόκλιση διαφορών (STDEV) 0.21°C . παρατηρούμε ότι το μοντέλο προσομοίωσης μπορεί με εξίσου καλή προσέγγιση να παρακολουθήσει την χρονική εξέλιξη μιας νύχτας που οι μεταβολές των θερμοκρασιών των 10/λέπτων είναι πολύ πιο ευαίσθητες σε σχέση με τις μέσες τιμές.



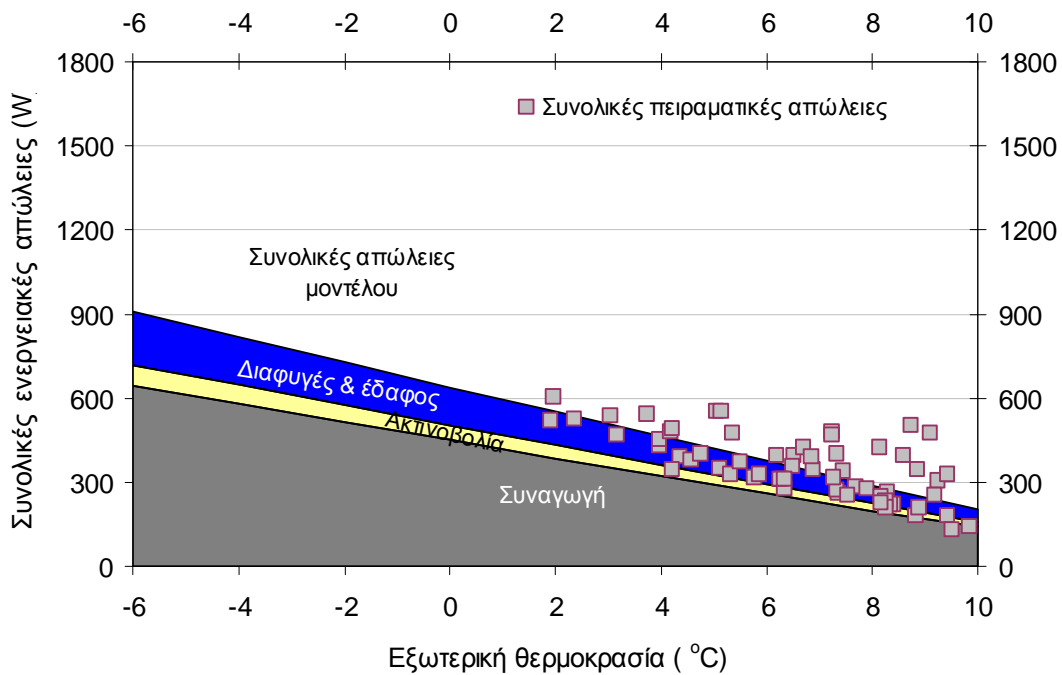
Σχήμα 5-30: Σύγκριση θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα (T_a) και καλύμματος (T_c) με τις πειραματικές τιμές στην χρονική εξέλιξη της νύχτας με χρήση θερμού αέρα

5.5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ

Το θεωρητικό μοντέλο χρησιμοποιείται για γενική πρόβλεψη των ενεργειακών απωλειών σε κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις συστημάτων θέρμανσης που χρησιμοποιούνται. Οι υπολογισμοί γίνονται για ένα εύρος θερμοκρασιών εξωτερικού περιβάλλοντος από $-6 - 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, μια αντιπροσωπευτική ταχύτητα ανέμου 1 ms^{-1} και για υλικό κάλυψης γυαλί **Low-E** ($\epsilon_c=0.2$). Η επιθυμητή θερμοκρασία των φυτών είναι $T_p=15^{\circ}\text{C}$. Οι προβλέψεις του μοντέλου απεικονίζονται στα σχήματα 5-31 και 5-32 και συγκεντρώνονται σε τρεις κατηγορίες: (i) ενεργειακές απώλειες λόγω διαφυγών και μέσω αγωγής προς το έδαφος (ii) λόγω συναγωγής από το κάλυμμα και (iii) λόγω ακτινοβολίας από το κάλυμμα. Στα ίδια σχήματα εμφανίζονται και οι μετρημένες ενεργειακές απώλειες οι οποίες βρίσκονται σε μια καλή συμφωνία με τις προβλέψεις. Με εξαίρεση τις απώλειες λόγω αγωγιμότητας διαμέσου του εδάφους (οι οποίες με βάση το μοντέλο παραμένουν ταυτόσημες) όλες οι άλλες απώλειες εκτιμάται ότι μειώνονται στην περίπτωση της υπέρυθρης θέρμανσης. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι **45-50%** μείωση της ενεργειακής απαίτησης στην περίπτωση της υπέρυθρης θέρμανσης σε σχέση με το σύστημα θέρμανσης με θερμό αέρα. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι ενεργειακές απώλειες από το κάλυμμα αν και εκτιμώνται ότι μειώνονται σε απόλυτες τιμές στην υπέρυθρη θέρμανση συγκρινόμενες με την συμβατική θέρμανση, εξακολουθούν να αντιπροσωπεύουν την πιο σημαντική συνεισφορά στην συνολική ενεργειακή απαίτηση του θερμοκηπίου και αντιπροσωπεύουν το **85%** των συνολικών ενεργειακών απωλειών.



Σχήμα 5-31: Σύγκριση συνολικά προβλεπόμενων και μετρούμενων ενεργειακών απωλειών κατά την διάρκεια θερμικής περιόδου με χρήση θερμού αέρα



Σχήμα 5-32: Σύγκριση συνολικών προβλεπόμενων και μετρούμενων ενεργειακών απωλειών κατά την διάρκεια θερμικής περιόδου με χρήση IR

5.6 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ

Η παραγωγή βιομάζας (νωπό βάρος) και οι φυσιολογικοί χαρακτήρες ανάπτυξης της καλλιεργούμενης ποικιλίας (**Lactuca sativa L. var. Toledo, cv. Romana**) εντός των πειραματικών θερμοκηπίων μετρήθηκαν στο στάδιο της πλήρους ωρίμανσης μετά από 40 ημέρες καλλιέργειας προς το τέλος του χειμώνα

Οι φυσιολογικοί παράμετροι ανάπτυξης είναι ο ρυθμός φωτοσύνθεσης (**photosynthetic rate**), ο ρυθμός διαπνοής (**transpiration rate**) και η στοματική αγωγιμότητα των φύλλων (**CO₂ conductivity**) και μετρήθηκαν με το φορητό σύστημα "Μέτρησης Φωτοσύνθεσης, Διαπνοής και Στοματικής Αγωγιμότητας" **LCi** του Οίκου **ADC** Αγγλίας. Το σύστημα διαθέτει θάλαμο ανοιχτού τύπου και μετρά το **CO₂** με αναλυτές **IRGA (Infra Red Gas Analyzer)**, ενώ το νερό με αναλυτές **LASER** παρέχοντας μέγιστη ακρίβεια. Διαθέτει περιοχή μέτρησης της συγκέντρωσης του **CO₂**, από **0 -2000 ppm**, περιοχή μέτρησης του **H₂O**, από **0-75 mBar**, περιοχή μέτρησης της θερμοκρασίας των φύλλων, από **0 έως +50 °C** και περιοχή μέτρησης της **PAR** από **0 -3000 μmols m⁻² sec⁻¹**.

Όπως φαίνεται στον πίνακα 5-1, η παραγωγή βιομάζας των φυτών (νωπό βάρος) στο θερμοκήπιο με υπέρυθρη θέρμανση αυξήθηκε περίπου **15%** σε σχέση με την παραγωγή βιομάζας που μετρήθηκε στο θερμοκήπιο με θερμό αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής. Επιπλέον οι φυσιολογικές παράμετροι ανάπτυξης έχουν παρουσιάσει στατιστικά σημαντικά αυξανόμενα ποσοστά όταν χρησιμοποιείται η υπέρυθρη θέρμανση έναντι του συμβατικού συστήματος θέρμανσης.

Η εφαρμογή υπέρυθρης θέρμανσης στα φυτά έχει σαν αποτέλεσμα να μην υπάρχουν ορατές βλάβες στην φυλλική επιφάνεια (κηλίδες λόγω συμπύκνωσης) που υποβαθμίζουν την ποιότητα του προϊόντος και να μην υπάρχει αυξημένη ευαισθησία στις ασθένειες η εξάπλωση των οποίων ευνοείται λόγω της αυξημένης υγρασίας εντός των θερμοκηπίων. Αυτό οφείλεται στο ότι όλα τα φυτικά μέρη είναι πάντα σε υψηλότερη θερμοκρασία από τον εσωτερικό αέρα του θερμοκηπίου που τα περιβάλλει, ελαχιστοποιώντας έτσι την πιθανότητα συμπύκνωσης επάνω στα φύλλα η οποία συμβάλλει στην ταχεία εξάπλωση ασθενειών.

Πίνακας 5-1: Παραγωγή βιομάζας και φυσιολογικοί χαρακτήρες ανάπτυξης της καλλιέργειας μαρουλιού στα πειραματικά θερμοκήπια με εφαρμογή διαφορετικών συστημάτων θέρμανσης

Σύστημα θέρμανσης	Νωπό βάρος/φυτό (gr)	Ρυθμός Φωτοσύνθεσης (μmol m ⁻² s ⁻¹)	Ρυθμός Διαπνοής (mmol m ⁻² s ⁻¹)	Στοματική αγωγιμότητα CO ₂ (mol m ⁻² s ⁻¹)	Θερμοκρασία φύλλου (°C)
Υπέρυθρη θέρμανση	382.8 ± 4.1	16.8 ± 2.3	3.54 ± 0.1	0.37 ± 0.02	15
Θερμός αέρας	334.5 ± 3.8	12.6 ± 1.2	2.91 ± 0.3	0.26 ± 0.03	15

5.7 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Η Ελλάδα διαθέτει σήμερα **48.000** στρέμματα θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων κατέχοντας την 7^η θέση στην Ευρωπαϊκή Ένωση (πίνακας 5-2). Όσον αφορά την θέρμανση το **55-60%** των εγκαταστάσεων (δηλαδή περίπου **30.000**) έχει την δυνατότητα ρύθμισης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στα επιθυμητά επίπεδα, ενώ τα υπόλοιπα χρησιμοποιούν την θέρμανση για αντιπαγετική προστασία ή για μείωση της σχετικής υγρασίας. Το **92%** του συνόλου των θερμαινόμενων θερμοκηπίων της χώρας θερμαίνονται με πετρέλαιο και μόνο το **8%** από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κυρίως βιομάζα (πυρήνα ελιάς) και πολύ λιγότερο ηλιακή ενέργεια και γεωθερμία. Για ένα τυπικό θερμοκήπιο εκτάσεως **1 στρ**, που αποτελείται από **3** κατασκευαστικές μονάδες και έχει ένα μέσο ύψος **5 m**, σχετικά νέας κατασκευής ή καλοσυντηρημένης κατασκευής (καλή και στεγανή τοποθέτηση), η απαίτηση σε ενέργεια είναι περίπου **833.099 MJ** το οποίο μεταφράζεται σε **18 έως 19 tn** πετρέλαιο ετησίως. Το υψηλό κόστος θέρμανσης γίνεται αποτρεπτικός παράγοντας στην ανάπτυξη του κλάδου και στην χρησιμοποίηση ρυθμιζόμενης θερμοκρασίας. Με μια σημαντική μείωση του κόστους θέρμανσης που είναι εφικτή μέσω της μείωσης της απαιτούμενης ενέργειας, η κατασκευή σύγχρονου θερμοκηπίου γίνεται μια ελκυστική επένδυση ακόμη και από μικρούς ιδιοκτήτες γης, δεδομένου ότι δεν απαιτείται μεγάλης έκτασης γης.

Πίνακας 5-2: Γεωγραφική κατανομή των εγκατεστημένων θερμοκηπίων και καλλιιεργειών. Στοιχεία Υπουργείου Γεωργίας (2004).

Περιοχές χώρας	Έκταση θερμοκηπίων (στρ)				Είδος καλλιιεργειών (στρ)		
	Πλαστικά	Υαλ/κτα	Σύνολο	%	Κηπευτικά	Ανθ/κά	Σύνολο
Κρήτη	20.100	600	20.700	43.4	19.800	1.000	20.800
Πελ/νησος	6.450	700	7.150	15.0	6.400	700	7.100
Κεντρική Μακεδονία	6.500	950	7.450	15.6	6.600	800	7.400
Λοιπές περιοχές	10.700	1.700	12.400	26.0	10.100	2.300	12.400
Σύνολο χώρας	43.750	3.700	47.700	100	42.900	4.800	47.700

Ταυτόχρονα με την μείωση της εισερχόμενης ενέργειας στα θερμοκήπια θα υπάρξουν και σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη. Σύμφωνα με την παραπάνω ενεργειακή απαίτηση ενός στρέμματος θερμοκηπιακής εγκατάστασης και με δεδομένο ότι **114 gr** πετρελαίου που προέρχονται από καυστήρα ενεργειακής απόδοσης **85%** εκπέμπουν **340 gr CO₂** (*Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*), οι συνολικές εκπομπές σε **CO₂** από όλα τα θερμαινόμενα στρέμματα θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων ανέρχονται ετησίως σε **18.6 tn**.

Η τελική συνολική κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα, έτσι όπως παρουσιάζεται από το *"Εθνικό πρόγραμμα για τον περιορισμό των εκπομπών αερίων*

του θερμοκηπίου στην Ελλάδα” φαίνεται να αυξάνει συνεχώς από **16.2 Mtoe** το **1995** σε **23.7 Mtoe** το **2010** και σε **27.6 Mtoe** το **2020**, με ένα μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης της τάξης του **2.2%**. Τα υγρά καύσιμα έχουν το υψηλότερο μερίδιο στην τελική κατανάλωση ενέργειας, παρουσιάζοντας ωστόσο μια μικρή μείωση του μεριδίου τους από **70%** το **1995** σε **64%** το **2010** και σε **61%** το **2020** (πίνακας 5-3). Οι προβλέψεις αυτές γίνονται μέσω του “Σεναρίου Αναμενόμενης Εξέλιξης” (ΣΑΕ), το οποίο απεικονίζει τη μελλοντική εξέλιξη των εκπομπών υπό τις παρούσες πολιτικές και πρακτικές συμπεριφοράς των καταναλωτών, καθώς και τις διαφαινόμενες μελλοντικές τάσεις. Έτσι, στο σενάριο αυτό λαμβάνονται υπόψη οι ήδη δρομολογημένες πολιτικές στους διάφορους τομείς οικονομικής δραστηριότητας (μεταφορές, βιομηχανία, αγροτικός τομέας κλπ.) και διαμορφώνονται εκτιμήσεις για την εξέλιξη των εκπομπών.

Πίνακας 5-3: Τελική κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα ανά ενεργειακό τομέα και καύσιμο (ktoe).

	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Σύνολο	16171	19417	21600	23719	25665	27588
<i>Τελική κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα</i>						
Αγροτικός	1013	1131	1218	1310	1408	1513
Βιομηχανία	5252	5821	6177	6564	6821	7094
Οικιακός	3324	4362	4569	4782	5040	5290
Τριτογενής	869	1289	1702	2180	2684	3236
Μεταφορές	5713	6816	7933	8883	9711	10455
<i>Τελική κατανάλωση ενέργειας ανά καύσιμο</i>						
Στερεά	1029	863	898	935	952	970
Υγρά	11246	13463	14295	15141	15919	16770
Ηλεκτρισμός	3030	3711	4351	5023	5713	6454
ΑΠΕ	825	896	778	733	729	769
Φυσικό αέριο	43	408	1138	1680	2097	2334

Σύμφωνα με τα παραπάνω ο ενεργειακός τομέας της Ελλάδας (ηλεκτροπαραγωγή, βιομηχανία, μεταφορές, αγροτικός τομέας, οικιακός και τριτογενής τομέας) αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και ιδιαίτερα CO₂. Μέσω των μοντέλων ENPEP και PRIMES εκτιμάται ότι οι εκπομπές CO₂ από τον ενεργειακό τομέα θα αυξηθούν το **2010** από **44.9%** -**52.1%** σε σχέση με το **1990**. Όσον αφορά τις συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε όρους ισοδύναμων τόνων CO₂ (*kt CO₂eq*), οι εκπομπές αυξάνουν από **79.9 Mt** το **1990** σε **115.7 Mt** το **2010** και σε **132 Mt** το **2020** με έναν ετήσιο ρυθμό της τάξης του **1.7%** (πίνακας 5-4).

Ειδικότερα, στον αγροτικό τομέα η ενεργειακή ζήτηση αναμένεται να αυξηθεί με μέσο ετήσιο ρυθμό της τάξης του 1.5% κατά τα επόμενα 20 χρόνια. Ο ρυθμός αυτός ανάπτυξης είναι υψηλότερος σε σύγκριση με τις αντίστοιχες των άλλων Δυτικοευρωπαϊκών χωρών και αποδίδεται κυρίως στο γεγονός ότι η γεωργία στην Ελλάδα μετασχηματίζεται στην εξεταζόμενη περίοδο (2000-2020) από μια δραστηριότητα εντάσεως εργασίας σε δραστηριότητα εντάσεως κεφαλαίου και ενέργειας, με την εκτεταμένη χρήση μηχανικού εξοπλισμού, τεχνολογίας κλπ. Το πετρέλαιο και ο ηλεκτρισμός είναι τα σημαντικότερα χρησιμοποιούμενα καύσιμα στον αγροτικό τομέα για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.

Σύμφωνα με τον ίδιο πίνακα η συνεισφορά των θερμαινόμενων θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων στην Ελλάδα σε εκπομπές CO₂ για το 2005 αντιπροσωπεύει ποσοστό της τάξεως του 70%. Εάν στο μέλλον η συμβατική θέρμανση αντικατασταθεί από την υπέρυθρη οι εκπομπές του CO₂ θα μειωθούν δραστικά για δύο λόγους:

- οι ενεργειακές απώλειες των θερμοκηπίων με την βελτίωση που αναμένεται να επιτευχθεί μέσα από το παρόν έργο των υπαρχόντων συστημάτων θέρμανσης αναμένεται να φτάσει το 40%. Αυτό θα επιφέρει μια πρώτη αντίστοιχα μείωση των εκπομπών CO₂ και
- η χρήση φυσικού αερίου ή υγραερίου από τα σύγχρονα συστήματα υπέρυθρης θέρμανσης. Το φυσικό αέριο είναι η καθαρότερη πηγή πρωτογενούς ενέργειας, μετά τις ανανεώσιμες μορφές. Τα μεγέθη των εκπομπών του CO₂ είναι σαφώς πολύ μικρότερα σε σχέση με το πετρέλαιο (μείωση κατά 40%), ενώ η βελτίωση του βαθμού ενεργειακής απόδοσης μειώνει τη συνολική κατανάλωση καυσίμου και συνεπώς περιορίζει την ατμοσφαιρική ρύπανση.

Πίνακας 5-4: Εξέλιξη εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από το σύνολο του ενεργειακού τομέα της Ελλάδας (kt CO₂ eq).

Ρύποι	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Σύνολο (ktCO ₂ eq)	79859	83354	99890	106636	115677	123930	131951
CO ₂	76474	79778	95682	102083	110838	118866	126647
CH ₄	316	342	457	403	395	393	400
N ₂ O	3069	3233	3751	4150	4445	4671	4904
Αγροτικός τομέας (ktCO ₂ eq)	3148	2948	2972	3068	3199	3350	3514
CO ₂ (kt)	2815	2639	2659	2758	2871	3004	3149
CH ₄	8	9	9	5	5	5	6
N ₂ O	326	301	304	305	322	341	360

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Σήμερα στη βιομηχανία θερμοκηπίων, η θέρμανση με υπέρυθρη ακτινοβολία είναι ευρέως άγνωστη ή παρανοημένη. Ο σκοπός αυτής της διατριβής είναι να διευκολύνει καλύτερα την κατανόηση της λειτουργίας της θέρμανσης με υπέρυθρη ακτινοβολία και να βοηθήσει στην εφαρμογή της στα θερμοκηπιακά συστήματα. Η εργασία παρέχει σαφείς ενδείξεις ότι το κύριο πλεονέκτημα της μικρού μήκους κύματος υπέρυθρης ακτινοβολίας (NIR), η θερμότητα να μεταδίδεται απευθείας από το σύστημα IR στα φυτά και το έδαφος χωρίς να παρεμβάλλεται ο αέρας του εσωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου, οδηγεί σε ομοιομορφία θέρμανσης και σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Με κατάλληλη εγκατάσταση και εφαρμογή υπέρυθρης θέρμανσης, οι παραγωγοί θερμοκηπιακών προϊόντων θα μπορούν να απολαμβάνουν ένα βελτιωμένο περιβάλλον ανάπτυξης των φυτών με σημαντική εξοικονόμηση καυσίμων σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης.

Οι κύριοι άξονες της διδακτορικής διατριβής είναι:

- I. Η ανάπτυξη ενός θερμοκινητικού μοντέλου προσομοίωσης του ενεργειακού ισοζυγίου του θερμοκηπίου, ικανού να ενσωματώνει στο απλούστερο δυνατό επίπεδο την πολυπλοκότητα της θερμοκινητικής συμπεριφοράς του θερμοκηπίου λαμβάνοντας υπόψη τα ουσιαστικά φαινόμενα που συμβαίνουν κατά την διάρκεια της θέρμανσης με οποιοδήποτε σύστημα θέρμανσης και παρουσία καλλιέργειας. Το μοντέλο επικυρώθηκε έναντι πειραματικών δεδομένων.
- II. Η ανάπτυξη πειραμάτων πεδίου που λαμβάνουν χώρα σε δύο πειραματικά θερμοκήπια συζευγμένα με αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό, γεγονός που διασφαλίζει την απόλυτη σύγκριση και ποσοτικοποίηση της θερμοκινητικής βελτιστοποίησης που επιτυγχάνεται με την χρήση μικρού μήκους κύματος υπέρυθρης ακτινοβολίας σε σχέση με το συμβατικό σύστημα θέρμανσης.

Τα επιμέρους συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται στα παρακάτω:

- § Με το μοντέλο προσομοίωσης προσδιορίζονται οι κύριες παράμετροι - η θερμοκρασία εσωτερικού αέρα και η θερμοκρασία καλύμματος - που επηρεάζουν την θερμοκινητική συμπεριφορά και τις συνολικές ενεργειακές απώλειες του θερμοκηπίου. Οι προβλέψεις του μοντέλου είναι σε ικανοποιητική συμφωνία με τις μετρήσεις, τόσο όσον αφορά τις μέσες τιμές νύχτας, όσο και τις χρονομεταβαλλόμενες μέσες τιμές δεκαλέπτου. Η τελευταία συμφωνία επιβεβαιώνει την εγκυρότητα της παραδοχής ψευδομόνιμης κατάστασης που επιτρέπει την χρήση του μοντέλου ως δυναμικού.
- § Η χρησιμοποίηση του μοντέλου με τα συνθετικά μετεωρολογικά στοιχεία μιας οποιαδήποτε γεωγραφικής περιοχής εγκατάστασης ενός θερμοκηπίου υπέρυθρης θέρμανσης, θα επιτρέπει την αξιόπιστη πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διάρκεια όλης της θερμοκινητικής περιόδου, προκειμένου να διατηρηθούν οι απαραίτητοι εσωτερικοί όροι θερμοκρασίας εσωτερικού περιβάλλοντος για την ποσοτική και ποιοτική ανάπτυξη των θερμοκηπιακών καλλιεργειών.
- § Η λειτουργία συμβατικού συστήματος θέρμανσης (θερμός αέρας εξαναγκασμένης συναγωγής) στο πρώτο πειραματικό θερμοκήπιο οδήγησε τις εσωτερικές θερμοκρασίες αέρα ίσες με ή υψηλότερες από την καθορισμένη θερμοκρασία των φυτών. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού αέρα και εξωτερικού περιβάλλοντος $T_a - T_o$ η οποία καθορίζει και τις συνολικές θερμοκινητικές απώλειες

αυξάνει αναλογικά με την πτώση της εξωτερικής θερμοκρασίας.

- § Η λειτουργία υπέρυθρης θέρμανσης (**IR**) στο δεύτερο πειραματικό θερμοκήπιο επέτρεψε την εσωτερική θερμοκρασία αέρα να είναι αρκετούς βαθμούς χαμηλότερη χωρίς πτώση της θερμοκρασίας φυτών. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού αέρα και εξωτερικού περιβάλλοντος T_a-T_o σε αυτή την περίπτωση θέρμανσης αυξάνει επίσης αναλογικά με την πτώση της εξωτερικής θερμοκρασίας. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού αέρα και των φυτών T_a-T_p αυξάνει γραμμικά με την πτώση της θερμοκρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος, γεγονός που αναδεικνύει το ενδιαφέρον της υπέρυθρης (εναλλακτικού τύπου) θέρμανσης για τα πιο κρύα κλίματα και τις βορειότερες χώρες.
- § Η κατανομή της θερμικής ροής είναι ομοιόμορφη σε μία ευρεία περιοχή γύρω από το κέντρο του θερμοκηπίου, ενώ οι τιμές μειώνονται σε μια μικρή περιοχή κοντά στα τοιχώματα. Αυτή η κατανομή αποδείχτηκε επαρκώς ομοιόμορφη για την καλλιέργεια των φυτών, τα οποία παρουσίασαν παρόμοια ανάπτυξη σε όλες τις περιοχές μέσα στο θερμοκήπιο. Αναμένεται ότι σε μεγαλύτερα παραγωγικά θερμοκήπια, όπου υπάρχουν περισσότερες σχεδιαστικές επιλογές για το πλήθος, την θέση και τον προσανατολισμό των πηγών θέρμανσης, μπορούν να επιτευχθούν καλύτερες κατανομές της θερμικής ροής στον χώρο καλλιέργειας.
- § Το ενεργειακό όφελος που εκτιμάται από τις παραμετρικές μελέτες του μοντέλου προσομοίωσης είναι της τάξεως **40-50%**. Το ενεργειακό όφελος που ποσοτικοποιείται μέσω των πειραμάτων είναι της τάξεως του **42-45%** φτάνοντας την υψηλότερη τιμή όταν επικρατούν υψηλές ταχύτητες ανέμου και οι θερμικές απώλειες λόγω συναγωγής του καλύμματος και λόγω διαφυγών είναι αυξημένες. Αυτή η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται κάνει την μικρού μήκους κύματος υπέρυθρη ακτινοβολία ελκυστικό εναλλακτικό τρόπο θέρμανσης.
- § Η συνεισφορά των θερμαινόμενων θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων στην Ελλάδα σε εκπομπές **CO₂** αντιπροσωπεύει ποσοστό της τάξεως περίπου **70%**. Με μελλοντική αντικατάσταση της συμβατική θέρμανση από την υπέρυθρη οι εκπομπές του **CO₂** θα μειωθούν δραστικά έως και **50%**.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο - ΘΕΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Η μικρού μήκους κύματος υπέρυθρη ακτινοβολία (**NIR**) εμφανίζεται να είναι αποτελεσματική επιλογή για την θέρμανση θερμοκηπίου όταν καλλιεργούνται δισδιάστατες και σχετικά χαμηλού ύψους καλλιέργειες. Η παρούσα εργασία εστιάζει σε θερμοκήπια με φυτικούς θόλους που μπορούν να προσεγγιστούν ως δισδιάστατοι όπως είναι η καλλιέργεια μαρουλιού που χρησιμοποιείται στα πειράματα. Στα σύγχρονα θερμοκήπια όμως καλλιεργούνται και αναρριχώμενες ποικιλίες και υβρίδια. Για τις μη επίπεδες καλλιέργειες δηλ. για φυτά σύνθετης ανάπτυξης (υψηλότερο και/η πυκνότερο θόλο) η ομαλή κατανομή της θερμικής ροής και η επίτευξη ομοιόμορφης θέρμανσης είναι βασική πρόκληση της μηχανολογίας.

Ένα σοβαρό πρόβλημα που παρατηρήθηκε σε προηγούμενες περιπτώσεις χρησιμοποίησης συστημάτων θέρμανσης με υπέρυθρη ακτινοβολία που μεγάλου μήκους κύματος (μακρινό υπέρυθρο) σε παραγωγικά θερμοκήπια, ήταν η ανομοιόμορφη κατανομή της ακτινοβολίας με συνέπεια την ανομοιόμορφη αύξηση των φυτών. Με τα σύγχρονα συστήματα υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπουν στο κοντινό υπέρυθρο δημιουργούνται συνθήκες διάχυσης και πιο ομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας στον χώρο του θερμοκηπίου. Επίσης χρησιμοποιούν βελτιωμένα υλικά ελαχιστοποιώντας τις απώλειες θερμότητας από την πηγή και είναι εξοπλισμένα με αποδοτικούς ανακλαστήρες που παρέχουν έλεγχο προς την κατεύθυνση ομοιόμορφης κατανομής θερμότητας. Παρά ταύτα ο αποδοτικός σχεδιασμός ενός συστήματος υπέρυθρης θέρμανσης όσον αφορά την ομοιόμορφη κατανομή της ροής θερμότητας και τον προσανατολισμό του συστήματος είναι θέμα που πρέπει να διερευνηθεί σε κανονικής κλίμακας παραγωγικό θερμοκήπιο. Προς αυτή την κατεύθυνση μπορούν να βοηθήσουν οι πρακτικές που εφαρμόζονται σήμερα στον τεχνητό φωτισμό των θερμοκηπίων. Αυτό θα βοηθήσει επίσης και στην αποδοτική εφαρμογή της υπέρυθρης θέρμανσης σε σύνθετες περιπτώσεις φυτικών θόλων που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Η εφαρμογή της υπέρυθρης θέρμανσης κανονικής κλίμακας παραγωγικό θερμοκήπιο με χρήση ισχυρότερων συστημάτων, θα οδηγήσει σε αύξηση της θερμικής ροής πάνω στον φυτικό θόλο. Αυτό δεν αναμένεται να έχει αρνητική επίδραση στα φυτά, που κατά τη διάρκεια της ημέρας λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας δέχονται πολύ υψηλότερες ροές θερμότητας σε σχέση με αυτές που δέχονται την νύχτα από την υπέρυθρη θέρμανση. Ο περιοριστικός παράγοντας σε αυτές τις περιπτώσεις είναι εάν αυτή η αύξηση θα οδηγήσει σε μια αντίστοιχη αύξηση των απωλειών θερμότητας και επομένως σε αυξημένο κόστος θέρμανσης, που θα καθιστά την απόδοση της υπέρυθρης θέρμανσης λιγότερο συμφέρουσα σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα. Έτσι σε ένα πρώτο στάδιο διερεύνησης η υπέρυθρη θέρμανση πρέπει να δοκιμαστεί σε κανονικό θερμοκήπιο και να αποτιμηθεί οικονομικά σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης.

Σε ένα επόμενο στάδιο διερεύνησης η ανάπτυξη αποδοτικότερων πηγών υπέρυθρης θέρμανσης μπορεί να είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την ευρεία χρήση της υπέρυθρης θέρμανσης. Εναλλακτικά αναφέρεται ότι η χρήση συστημάτων που θα συνδυάζουν υπέρυθρη ακτινοβολία για θέρμανση και τεχνητό φωτισμό για αύξηση της φωτοσύνθεσης και της παραγωγής θα μπορούσε να οδηγήσει σε πολλαπλά ενεργειακά οφέλη.

Οι απώλειες θερμότητας από το υλικό κάλυψης κατά τη διάρκεια της υπέρυθρης θέρμανσης αν και μειώνονται σημαντικά σε απόλυτες τιμές σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα θέρμανσης, συνεχίζουν να αντιπροσωπεύουν τη σημαντικότερη

συμβολή στις συνολικές ενεργειακές απώλειες και αποτελούν το 85% του συνόλου. Ως εκ τούτου, η έρευνα για τα νέα υλικά κάλυψης με βελτιωμένες ιδιότητες μόνωσης θα παραμείνει ένας βασικός ερευνητικός στόχος ακόμα κι αν υιοθετηθεί η υπέρυθρη θέρμανση.

Οι μελλοντικές τροποποιήσεις του μοντέλου προσομοίωσης, θα πρέπει να περιλαμβάνουν το σύνθετο πρόβλημα της παρουσίας φυτών μη επίπεδης ανάπτυξης, επιτρέποντας τον προγραμματισμό του θερμοκηπιακού συστήματος για όλες τις θερμοκηπιακές καλλιέργειες με απώτερο στόχο την βελτίωση του κόστους παραγωγής.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abak K. A, Bascetincelik N, Baytorun O, Alluntas HH, Ozlurk KE, Cockshulled Y, Tuzel Gul A.1994. Influence of double plastic cover and thermal screens on greenhouse temperature, yield and quality of tomato. *Acta Horticulturae*, 366:149–54.
- Abdel-Ghany A. M., and Kozai T. 2006. Dynamic modeling of the environment in a naturally ventilated, fog-cooled greenhouse. *Renewable Energy*, 31:1521–1539
- Abdel-Ghany A. M. and Kozai T. 2006. On the determination of the overall heat transmission coefficient and soil heat flux for a fog cooled, naturally ventilated greenhouse: Analysis of radiation and convection heat transfer. *Energy Conversion and Management*, 47:2612-2628
- Abhat, A., 1983. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. *Solar Energy*, 30 (4): 313–332.
- Adelard L., Pignolet-Tardan F., Mara T., Lauret P., Garde F., and Boyer H. 1998. Sky temperature modelisation and applications in building simulation. *Renewable Energy*, 15: 418-430
- Albright LD, Seginer I, Marsh LS, Oko A. 1985. In situ thermal calibration of unventilated greenhouses. *J Agric Engineering Res.*, 31(3):265–81.
- American Society of Agriculture Engineers. 1995. Heating, ventilating and cooling greenhouses: ASAE EP406.2 February 1995. In: American Society of Agriculture Engineers Standards 1995, 42nd ed., pp.559-566. St. Joseph, MI: Amer. Soc. of Agr. Engineers
- Aubinet K. 1994. Long wave sky radiation parameterization, *Solar Energy*. 53 (2): 147-154
- Bakker J.C., Adams S.R., Boulard T., and Montero J.I. 2007. Innovatine technologies for an efficient use of energy. *Acta Horticulturae*, 801: 49-62
- Barrel, J.R., Galimberti, P.D., Barone, A., Lara, M.A., 1999. Integrated thermal improvements for greenhouse cultivation in the central part of Argentina. *Solar Energy*, 67 (1–3): 111–118.
- Baudoin W.O. 1999. Protected cultivations in the Mediterranean region. *Acta Horticulturae*, 491: 23-30
- Berger X., Buriot D.and Garnier F. 1984. About the equivalent radiative temperature for clear skies. *Solar Energy* 32 (6): 725-733.
- Blom, J. T. H., and J. F. Ingratta. 1981. The use of low infrared for greenhouse heating in Southern Ontario. *Acta Horticulturae* 115: 205-216
- Blom, J.T., J.F. Ingratta, and J. Hughes. 1982. Energy conservation in Ontario greenhouses. Pub. 65. Ministry of Agric. and Food, Parliament Bldgs., Toronto.
- Bot, G.P.A. 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model, Ph.D. thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Bot G.P.A. 2001. Developments in indoor sustainable plant production with emphasis on energy saving. *Computers and Electronics in Agriculture*. 30:151–165
- Bot, G.P.A. and van de Braak, N.J. 1995. Physics of Greenhouse Climate, In: Bakker, J.C., Bot, G.P.A., Challa, H. and van de Braak, N.J. (eds), *Greenhouse Climate Control – An Integrated Approach*, Wageningen Pers., Wageningen, The Netherlands, pp. 125–159.

- Boulard T. and Baille A. 1995. Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61:37–48.
- Boulard T. and Wang S. 2000. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions, *Agricultural and Forest Meteorology*, 100:25–34.
- Boulard T., Haxaire R., Lamrani M.A., Roy J.C. and Jaffrin A. 1999. Characterizing and modeling of the air fluxes induced by naturally ventilation in a greenhouse, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 174: pp. 135–144.
- Boulard T., Papadakis G., Kittas C. and Mermier M. 1997. Air flow and associated sensible heat exchanges in a naturally ventilated greenhouse, *Agricultural and Forest Meteorology* 88: 111–119.
- Boulard, T., Razafinjohany, E., Baille, A., Jaffrin, A., Fabre, B., 1990. Performance of a greenhouse heating system with a phase change material. *Agricultural and Forest Meteorology*, 52: 303–318.
- Campbell, G. S. 1977. *An Introduction to Environmental Biophysics*. New York, N.Y.: Springer-Verlag, Chapter 6: 70-74
- Carslaw and Jaeger, 1959. *Conduction of Heat in Solids*. 2d ed. Oxford University Press, N.Y
- Cemek B, Yusuf D, Uzun S, Ceyhan V. 2006. The effects of different greenhouse covering materials on energy requirement, growth and yield of aubergine. *Energy*, 31:1780-1788.
- Cengel A. Yunus. 2005. *Heat transfer, a practical approach*. McGraw-Hill Companies Inc.
- Chalabi Z.S. and Fernandez J.E. 1994. Estimation of net photosynthesis of a greenhouse canopy using a mass balance method and mechanistic models, *Agricultural and Forest Meteorology*, 71:165–182.
- Chandra P, Albright LD, Scott NR. 1981. A time dependent model of the greenhouse thermal environment. *Trans. of Amer. Soc. Agric. Eng.*, 24 (2):442–9.
- Chandra P; Albright L D. 1980. Analytical determination of the Effect on Greenhouse Heating Requirements of using night curtains. *Trans ASAE*, 23(4): 994-1000.
- Chapman, A. J. 1984. *Heat Transfer*. New York: Macmillan Publishing Company.
- Chou S.K., Chau K.J., Ho J.C and Ooi C.L. 2004. On the study of an energy-efficient greenhouse for heating and dehumidification application, *Applied Energy*, 77: 355–373.
- Critten DL, Bailey BJ. 2002. A review of greenhouse engineering developments during the 1990s. *Agricultural and Forest Meteorology*, 112:1-22
- Cui, Q., Wang, J., 2002. Temperature and energy-saving effects of applying the mobile double layers thermal screen in a greenhouse. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 18 (6): 111–114.
- Daguenet M. 1985. *Les sechoirs solaires, theorie et pratique*, Unesco.
- De Pascale S., and Maggio A. 2004. Sustainable protected cultivation at Mediterranean climate, perspectives and challenges. *Acta Horticulturae*, 691: 29-42
- De Zwart, H.F. 1996. Analyzing energy-saving potentials in greenhouse cultivation using a simulation model. Thesis, Wageningen University. 236p.
- Dieleman A. and Kempkes F. 2006. Energy screens in tomato: determining the optimal opening strategy. *Acta Horticulturae*, 718: 599-606

- Dimokas, G., Katsoulas, N., Kittas, C., 2008. Calibration of a climate simulator (SimGreC) in Mediterranean greenhouses during winter period. 4th International Conference on Information and Communication Technologies in Bio and Earth Sciences (HAICTA 2008). Agricultural University of Athens, September 18-20, 2008, Athens, Greece.
- Dimokas, G., Katsoulas, N., Tchamitchian, M., Kittas, C., 2008. Validation of a climate simulator (SimGreC) in mediterranean greenhouses during winter period. 4th International Conference on Information and Communication Technologies in Bio and Earth Sciences (HAICTA 2008). Agricultural University of Athens, September 18-20, 2008, Athens, Greece.
- Duffie, J. A., and W. A. Beckman. 1991. Solar engineering of thermal processes. New York: John Wiley and Sons.
- Duncan G. A. and Walker N. 1973. Poly-tube heating –ventilation systems and equipment. AEN-9. Department of Agricultural Engineering, University of Kentucky, Lexington, KY
- Fernandez J.E., and Baille A. 1995. Measurement and prediction of greenhouse ventilation rates. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58: 229-245.
- Feuilloley P. and Issanchou G. 1996. Greenhouse covering materials measurement and modeling of thermal properties using the hot box method, and condensation effects. *J Agric Engng Res.*, 65:129–142.
- Gary C., Tchamitchian M., Bertin N., Boulard T., Baille A., Charasse L., Rebillard A., Cardi J.P. and Marcelis L.F.M. 1998. SIMULSERRE: an education software simulating the greenhouse-crop systems, *Acta Horticulturae*, 456: 451–458.
- Garznoli, K. V. and Blackwell. 1981. An analysis of the nocturnal heat loss from a single skin plastic greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 26:204–214.
- Gauthier, C., Lacroix, M., Bernier, H., 1997. Numerical simulation of soil heat exchanger storage systems for greenhouses. *Solar Energy*, 60 (6): 333–346.
- Ghosal M.K., Tiwari G.N. and Srivastava N.S.L. 2003. Modeling and experimental validation of a greenhouse with evaporative cooling by moving water film over external shade cloth. *Energy and Building*. 35:843–850.
- Ghosal M K., Tiwari G. N., and Srivastava N. S. L. 2004. Thermal modeling of a greenhouse with an integrated earth to air heat exchanger: an experimental validation. *Energy and Buildings*. 36:219-227.
- Ghosal MK., Tiwari GN. 2006. Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger integrated with a greenhouse. *Energy conversion and management* 47(13):1779-1798.
- Ghosal, M.K., Tiwari, G.N., 2004. Mathematical modeling for greenhouse heating by using thermal curtain and geothermal energy. *Solar Energy*, 76: 603–613.
- Ghosal, M.K., Tiwari, G.N., Das, D.K., Pandey, K.P., 2005. Modeling and comparative thermal performance of ground air collector and earth air heat exchanger for heating of greenhouse. *Energy and Buildings* 37 (6): 613–621.
- Giacomelli G., Castilla N., Van Henten E.J., Mears D., and Sase S. 2007. Innovation in greenhouse engineering. *Acta Horticulturae*, 801: 75-88
- Giacomelli, Gene A., 2002. Considerations for Energy Management of Greenhouse Heating and Cooling. Southern Greenhouse Vegetable Growers Association Conference, Shreveport, LA

- Gijzen H. 1992. Simulation of photosynthesis and dry matter production of greenhouse crops. Simulation Report No. 28, CABO-DLO, Wageningen.
- Greenhouse heating efficiency design consideration, copyright pending, report of National Greenhouse Manufacturers Association NGMA 1998; website: <http://www.ngma.com/standardpdf/heatingsys.pdf>
- Gupta MJ, Chandra P. 2002. Effect of greenhouse design parameters on conservation of energy for greenhouse environmental control. *Energy*. 27:777-794.
- Gupta MJ. 2000. An energy efficient solar greenhouse for cold climatic conditions of Northern India. Ph.D.Thesis, Indian Agricultural Research Institute, New Delhi.
- Gupta, A., Tiwari, G.N., 2002. Computer model and its validation for prediction of storage effect of water mass in a greenhouse: a transient analysis. *Energy Conversion and Management* (43): 95–101.
- Huang, B.J. Lin T.H. Hung W.C. and Sun F.S. 2001. Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems. *Solar Energy* 70: 443-448.
- Huang, B.K., Toksoy, M., Cengel, Y.A., 1986. Transient response of latent heat storage in greenhouse solar system. *Solar Energy* 37 (4): 279–292.
- Itagi T., and M. Takahashi.1978. Studies on the practical use of infrared heater in greenhouse. *Kanagawa Hort. Exp. Station Bull* 25: 45-51
- Jain, D., Tiwari, G.N., 2003. Modeling and optimal design of ground air collector for heating in controlled environment greenhouse. *Energy Conversion and Management* 44: 1357–1372.
- Jensen T., 1994. Hybrid Systems on an Isolated Island in Northern Norway. Research Council of Norway, Hydroenergia, Munchen.
- Jolliet O, Danloy L, Gay JB, Munday GL, Reist A. 1999. Horticorn: an improved static model for predicting the energy consumption of a greenhouse. *Agric For Meteorology*.55:265–94.
- Jolliet O. and Munday G. 1989. A 2nd generation static model of greenhouse energy requirements (Horticorn): a comparison with dynamic models. *Acta Horticulturae*, 245:346-355
- Jolliet, O., Danloy L., Gay J. B., Munday G. L., and Reist A.. 1991. HORTICERN: An improved static model for predicting the energy consumption of a greenhouse. *Agric. and Forest Meteorology* 55(3–4): 265–294.
- Kelly, H. and Weinberg C. J., “Utility strategies for using renewables” in Johansson T., Kelly H., Reddy A., Williams R., (eds), *Rewearable Energy: Source for Fuels and Electricity*, Island Press, 1993
- Kempkes F.L.K., Bakker J.C., and van de Braak N.J. 1998. Control and modelling of vertical temperature distribution in greenhouse crops. *Acta Horticulturae*, 456:313-323
- Kempkes F.L.K., Van de Braak J.K., Bakker C. J. 2000. Effect of Heating System Position on Vertical Distribution of Crop Temperature and Transpiration in Greenhouse Tomatoes. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 75: 57-64
- Kindelan M. 1980. Dynamic modeling of greenhouse environment. *Transactions of the ASAE*, 23(5): 1232-1236
- Kittas, C. 1986. Greenhouse cover conductances. *Boundary-Layer Meteorology*. 36: 213-225

- Kittas C. 1994. Determination of the overall heat transfer coefficient of a greenhouse cover, *Agric Forest Meteorol.* 69: 205–221.
- Kittas C, Katsoulas N, Baille A, Fernandez JA, Martinez PF, Castilla N. 2001. Transpiration and energy balance of a greenhouse rose crop in Mediterranean summer conditions. *Acta Hort* 559:395–400.
- Kittas, C., N. Katsoulas, and A. Baile. 2003. Influence of an aluminized thermal screen on greenhouse microclimate and canopy energy balance. *Trans. ASAE* 46(6): 1653-1663.
- Kupraska S., Slipek Z. 2000. Optimization of Greenhouse Substrate Heating. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 76:129-139
- Kupraska S., Slipek Z., Bozek B., Fraczek J. 2004. Simulation of Heat and moisture transfer in a greenhouse Substrate due to a Heating system by buried pipes. *Biosystems Engineering*, 90(1): 63-74
- Kurata K., Quan Z. and Nunomura O. 1991. Optimal shapes of parallel E–W oriented single span tunnels with respect to direct light transmissivity. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 48: 89–100.
- Kurata, K. and Takamura T., 1991. Underground Storage of Solar Energy for Greenhouse Heating. I. Analysis of Seasonal Storage System by Scale and Numerical Models. *Transactions of ASAE*, 34(2):563-569
- Kyritsis, S., Mavrogianopoulos, G., 1987. Passive system for heating greenhouses. In: von Zabeltitz, C. (Ed.), *Energy Conservation and Renewable Energies for Greenhouse Heating*. REU Technical Series 3. FAO, ENEA, Roma, pp. 111–117.
- Lane, G.A., 1980. Low temperature heat storage with phase change materials. *International Journal of Energy Research*, 5:155–160.
- Lane, G.A., 1983. In: *Solar Heat Storage: Latent Heat Materials*, vol. I. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 234–246.
- Mavrogianopoulos, G. and Kyritsis S., 1986. The performance of a greenhouse heated by an earth-air heat exchanger. *Agriculture and Forest Meteorology*, 36:263-268.
- Mavrogianopoulos, G. and Kyritsis S., 1993. Analysis and performance of a greenhouse with water filled passive solar sleeves. *Agriculture and Forest Meteorology*, 65:47-61.
- Melchior Centeno V. 1982. New formulae for the equivalent night sky emissivity, *Solar Energy*.
- Mihalakakou, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., 1994a. Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers. *Solar Energy*, 53 (2–3): 301–305.
- Morris LG. 1958. Some aspect of the control of plant environment. greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1:156–66.
- Navas LM, De-la Plaza S, Garcia JL, Bonavonto R, Duran JM, Rotamal N, De-la-Plaza S, Mariolis LFM. 1998. Formulation and sensitivity analysis of a dynamic model of the greenhouse. *Acta Horticulturae*, 456:305–12.
- Nederhoff E.M. and Vegter J.G. 1994. Canopy photosynthesis of tomatoes, cucumber, and sweet pepper in greenhouses: measurements compared to models. *Annals of Botany*, 73: 421–427.
- Nelson, P.V. 2003. *Greenhouse operation and management*. 6rd ed. New Jersey: Upper Saddle River, Chapter 3: 93-94, 116-118.
- Nijsken J, Deltour J, Coutisse S, Nisen A. 1984. Heat transfer through covering materials of greenhouses. *Agric forest Meteorology*, 33:193–214.

- Olofsson T., Majabacka A. and Engblom S. 2006. Evaluation of energy performance for greenhouses based on multivariate analysis methology. *Acta Horticulturae*, 718: 211-218
- Ozturk, H.H., 2005. Experimental evaluation of energy and exergy efficiency of a seasonal latent heat storage system for greenhouse heating. *Energy Conversion and Management*, 46: 1523–1542.
- Ozturk, H.H., Bascetincelik, A., 2003a. Energy and exergy efficiency of a packed-bed heat storage unit for greenhouse heating. *Biosystems Engineering*, 86 (2): 231–245.
- Ozturk, H.H., Bascetincelik, A., 2003b. Effect of thermal screens on the microclimate and overall heat loss coefficient in plastic tunnel greenhouse. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 27 (3): 123–134.
- Papadakis G, Briassoulis D, Scarascia Mygnozza G, Vox G, Feuilleley P, Stoffers JA. Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials. 2000. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 77(1):7-38.
- Papadakis, G., A. Frangoudakis, and S. Kyritsis. 1992. Mixed, forced and free convection heat transfer at the greenhouse cover. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 51: 91-97.
- Perdigones A., García J. L., Pastor M., Benavente R. M., Luna L., Chaya C., de la Plaza S. 2006. Effect of Heating Control Strategies On Greenhouse Energy Efficiency: Experimental Results and Modelling. *Transactions of the ASABE*, 49:143-155
- Pieters, J.G., Deltour, J.M. 1997. Performances of greenhouses with the presence of condensation on cladding materials. *Journal of Agr. Engineering Research*, 68(2): 125–137.
- Pucheta J.A., Schugurensky C., Fullana R., Patino H., Kuchen B. 2006. Optimal Greenhouse control of tomato-seedling crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 50:70-82
- Rozakis, S., Soldatos P., Papadakis G., Kyritsis S., Papantonis D., 1997. Evaluation of an Integrated Renewable energy System for Electricity Generation in Rural Areas. *Energy Policy*, 25 (3):337-347
- Santamouris M.I., 1993. Active Solar Agricultural Greenhouse. The State of Art. *International Journal Solar Energy*, 14: 19-32
- Santamouris, M., Balaras, C.A., Dascalaki, E., Vallindras, M., 1994b. Passive solar agricultural greenhouses: a worldwide classification and evaluation of technologies and systems used for heating purposes. *Solar Energy*, 53 (5): 411–426.
- Santamouris, M., Mihalakakou, G., Balaras, C.A., Lewis, J.O., Vallindras, M., Argiriou, A., 1996. Energy conservation in greenhouses with buried pipes. *Energy*, 21 (5): 353–360.
- Sarkka L.E., Hovi-Pekkanen T., Kaukoranta T., Tahvonon R. and Huttunen J. 2006. Greenhouse cooling in summer in Filand – Preliminary results of climate control ana plant response. *Acta Horticulturae*, 719: 439- 445
- Sethi, V.P., Lal, T., Gupta, Y.P., 2003. Effect of greenhouse microclimate on the selected summer vegetables. *Journal of Research, Punjab Agricultural University* 40 (3–4): 415–419.
- Sharan, G., Prakash, H., Jadhav, R., 2003. Performance of greenhouse coupled to earth tube heat exchanger in closed-loop mode. In: XXX CIOSTA-CIGR V Congress, vol. 2, Proceedings on Management and Technology Applications to Empower Agriculture and Agro-food Systems, Turin, Italy, pp. 865–873.

- Sharma P.K., Tiwari G.N. and Sorayan V.P.S. 1999. Temperature distribution in different zones of the microclimate of a greenhouse: a dynamic model. *Energy Convers Manage*, 40: 335–348.
- Sharma P k.and Tiwari GN.1999. Parametric study of a greenhouse by using Runge-Kutta methods, *Energy Convers Manage*, 40: 901–912.
- Shukla, A., Tiwari, G.N., Sodha, M.S., 2006. Thermal modeling for greenhouse heating by using thermal curtain and an earth–air heat exchanger. *Building and Environment*, 41 (7): 843–850.
- Singh G, Singh PP, Lubana PPS, Singh KG. 2006. Formulation and validation of a mathematical model of the microclimate of a greenhouse. *Renewable Energy*, 31(10):1541-1560
- Singh, R.D., Tiwari, G.N., 2000. Thermal heating of a controlled environment greenhouse: a transient analysis. *Energy Conversion and Management*, 41: 505–507.
- Soriano T., Montero J.I., Sanchez-Guerrero M.C., Medrano E., Anón A.J., Hernandez J., Morales M. I. and N. Castilla. 2004. A Study of Direct Solar Radiation Transmission in Asymmetrical Multi-span Greenhouses using Scale Models and Simulation Models. *Biosystems Engineering*, 88(2): 243-253
- Spanomitsios K. G. 2001. Temperature control and energy conservation in a plastic greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80 (3):pp. 251–259.
- Stanghellini C. 1987. Transpiration of greenhouse crops, an aid to climate management. PhD Thesis, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Stanghellini C., van Meurs W. TH. 1992. Environmental control of crop transpiration. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 51: 297-311
- Swinbank, W.C. 1963. Longwave radiation from clear skies. *Quart J Roy. Meteorol. Soc.*, 89: 339-348.
- Swinkels G.L.A., Sonneveld P.J., Bot G.P.A., 2001. Improvement of greenhouse insulation with restricted transmission loss through zigzag covering material. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 79: 91-97
- Swinkels, G.L.A.M. 2006. Software for calculating the effect of energy saving investments on greenhouses. *Acta Horticulturae*, 718:227-231.
- Takakura T; Jordan K A; Boyd L L 1971.Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse. *Transactions of the ASAE*, 14(5): 964 – 971
- Tavares C., Goncalves A., Castro P., Loureiro D. and A. Joyce 2001. Modelling an agriculture production greenhouse, *Renewable Energy*, 22:15–20.
- Tei F., Scaife A. and Aikman P. D. 1996. Growth of Lettuce, Onion, and Red Beet. 1. Growth Analysis, Light Interception, and Radiation Use Efficiency. *Annals of Botany*, 78: 633-643
- Teitel M., and Tanny J. 1998. Radiative heat transfer from heating tubes in a greenhouse. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 69:185-188
- Teitel, M., A. Shklyar, Y. Elad, V. Dikhtyar, and E. Jerby. 2000. Development of a microwave system for greenhouse heating. *Acta Horticulturae*, 534: 189-195.
- Tiwari G. N. 2003. Greenhouses technology for controlled environment. New Delhi: Narosa Publishing House.
- Tiwari GN, Sharma PK, Goyal PK, Sutar RF. 1998. Estimation of efficiency factor of a greenhouse: A numerical study, *Energy Building*, 28(3):241-250

- Tiwari, G.N., Akhtar, M.A., Shukla, A., Emran, K.M., 2006. Annual thermal performance of greenhouse with an earth–air heat exchanger: an experimental validation. *Renewable Energy*, 31 (15):2432–2446.
- Tonui J. K. and Tripanagnostopoulos Y. 2007. Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. *Renewable Energy*, 32 (4): 623-637.
- Tripanagnostopoulos Y. and Yianoulis Y. 1992. Integrated collector-storage systems with suppressed thermal losses. *Solar Energy* 48 (1): 31-43.
- Tripanagnostopoulos Y., Yianoulis P., Papaefthimiou S. and Zafeiratos S. 2000. CPC solar collectors with flat bifacial absorbers. *Solar energy*, 69 (3):191-203.
- Tripanagnostopoulos Y., Souliotis M. and Nousia Th. 2002a. CPC Type Integrated Collectors Storage Systems. *Solar Energy* 72 (4): 327–350.
- Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th., Souliotis M. and Yianoulis P. 2002b. Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar Systems. *Solar Energy*, 72 (3):217–234.
- Tripanagnostopoulos Y., Souliotis M., Battisti R. and Corrado A. 2005. Energy, Cost and LCA Results of PV and Hybrid PV/T Solar Systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 13:235–250.
- Udink ten Cate A J 1983. Modeling and (adaptive) control of greenhouse climates. PhD Thesis, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Van de Knijff A., Benninga J., Reijnders C. And Nienhuis J. 2004. Energy in greenhouse horticulture in the Netherlands. Developments in the sector and individual enterprises until 2004. Report, LEI, Den Haag, 77p.
- Van Henten E.J., Bakker J.C., Marcelis L.F.M., Ooster A., Van Dekker E., Stanghellini E., and Vanthoor B. 2006. The adaptive greenhouse – an integrated systems approach to developing protected cultivation systems. *Acta Horticulturae*, 718: 399-406
- Walker JN. 1965. Predicting temperatures in ventilated greenhouse. *Trans. Amer. Soc. of Agric. Eng.*, 8(3):445–8.
- Wang S. 1988. Measurement and modeling of natural ventilation in a large Venlo-type greenhouse. PhD Thesis, Faculte Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Belgium.
- Wang, S., Zhu, S., Deltour, J., 1997. Simulation and measurement of tunnel greenhouse climate. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 13 (4):139–144.
- Whillier A. 1967. Design factors influencing solar collectors, Low temperature engineering applications of solar energy. *ASHRAE*.
- Willits D.H. 2003. Cooling fan – ventilated greenhouses: a modeling study. *Biosystems Engineering*, 84(3):315-329.
- Zhang, Y., Gauthier L., de Halleux D., Dansereau B., and Gosselin A.. 1996. Effect of covering materials on greenhouse microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology* 82: 227-244.
- Zhang Y., Mahrer Y. and Margolin M. 1996. Prediction the microclimate inside a greenhouse: an application of a one-dimensional numerical model in an unheated greenhouse, *Agric and Forest Meteorology*, 86: 291–297.
- Kurata K. 1989. Simulation of inside air temperature, humidity and crop production in an energy conservation greenhouse. *Acta Horticulture*, 245:339–345.
- Μαυρογιαννόπουλος Ν. Γ., Θερμοκήπια, Περιβάλλον-Υλικά-Κατασκευή-Εξοπλισμός, Δ΄ έκδοση, Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε, Αθήνα 2005

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

A_c	επιφάνεια καλύμματος, m^2
A_p	επιφάνεια φυτικού θόλου, m^2
A_s	επιφάνεια εδάφους θερμοκηπίου, m^2
C_{pa}	ειδική θερμότητα αέρα, $J Kg^{-1}K^{-1}$
	πυκνότητα αέρα, $Kg m^{-3}$
h_{ac}	συντελεστής συναγωγής μεταξύ εσωτερικού αέρα και καλύμματος, $Wm^{-2}K^{-1}$
h_{ap}	συντελεστής συναγωγής μεταξύ εσωτερικού αέρα και φυτικού θόλου, $Wm^{-2}K^{-1}$
h_{co}	συντελεστής συναγωγής μεταξύ καλύμματος και εξωτερικού αέρα, $Wm^{-2}K^{-1}$
K_p	ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από το έδαφος του θερμοκηπίου, $Wm^{-2}K^{-1}$
k_c	συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας καλύμματος, $Wm^{-1}K^{-1}$
k_{soil}	συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εδάφους, $Wm^{-1}K^{-1}$
L_c	πάχος καλύμματος, m
n	βαθμός απόδοσης του συστήματος ακτινοβολίας σε υπέρυθρη ακτινοβολία
N	αριθμός εναλλαγών του αέρα, h^{-1}
$Q_{lamps,conv}$	απώλειες συναγωγής των λαμπτήρων υπέρυθρης ακτινοβολίας, W
Q_{total}	συνολικές ενεργειακές απώλειες, W
Q_1	απώλειες λόγω διαφυγών του αέρα του θερμοκηπίου, W
Q_2	συνδυασμένες απώλειες συναγωγής/ακτινοβολίας από το κάλυμμα του θερμοκηπίου, W
Q_3	απώλειες αγωγής από το έδαφος του θερμοκηπίου προς το υπέδαφος, W
$Solrad_{in}$	εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, $W m^{-2}$
$Solrad_{out}$	συνολικά προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, $W m^{-2}$
PAR	φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία, $\mu mol m^{-2}s^{-1}$
IR	μεγάλου μήκους ακτινοβολία, $W m^{-2}$
RH	σχετική υγρασία, (%)

T_a	θερμοκρασία εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου, °C
T_c	θερμοκρασία καλύμματος, °C
T_o	θερμοκρασία εξωτερικού αέρα, °C
T_p	θερμοκρασία φυτικού θόλου, °C
T_{sky}	θερμοκρασία ουρανού, K
V	όγκος θερμοκηπίου, m ³
WS	ταχύτητα ανέμου, ms ⁻¹
U	ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, Wm ⁻² K ⁻¹
e_c	συντελεστής εκπομπής του καλύμματος
e_p	συντελεστής εκπομπής του φυτικού θόλου
r_a	πυκνότητα του αέρα, Kg m ⁻³
S	σταθερά Stefan - Boltzmann, Wm ⁻² K ⁻⁴

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1-1: Παγκόσμια έκταση θερμοκηπίων (Giacomelli et al, 2007)

Πίνακας 1-2: Εξέλιξη των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων στην Ευρώπη

Πίνακας 2-1: Βέλτιστες ημερήσιες και νυχτερινές θερμοκρασίες για διάφορες θερμοκηπιακές καλλιέργειες

Πίνακας 3-1: Τυπικές τιμές ικανότητας εκπομπής για διάφορα υλικά (Cengel, 2005)

Πίνακας 3-2: Αλλαγές του αέρα του θερμοκηπίου σε σχέση με τον τύπο του θερμοκηπίου (American Society of Agriculture Engineers (1995)

Πίνακας 3-3: Απώλειες ακτινοβολίας διαφόρων υλικών κάλυψης (Nelson, 2003).

Πίνακας 4-1: Διαστασιολόγηση πειραματικών θερμοκηπίων

Πίνακας 4-2: Ραδιομετρικές ιδιότητες διαφόρων τύπων γυαλιού

Πίνακας 5-1: Παραγωγή βιομάζας και φυσιολογικοί χαρακτήρες ανάπτυξης της καλλιέργειας μαρουλιού στα πειραματικά θερμοκήπια με εφαρμογή διαφορετικών συστημάτων θέρμανσης

Πίνακας 5-2: Γεωγραφική κατανομή των εγκατεστημένων θερμοκηπίων και καλλιεργιών. Στοιχεία Υπουργείου Γεωργίας (2004).

Πίνακας 5-3: Τελική κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα ανά ενεργειακό τομέα και καύσιμο (ktoe).

Πίνακας 5-4: Εξέλιξη εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τον αγροτικό τομέα της Ελλάδας (kt).

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2-1: Επίδραση της θερμοκρασίας στον ρυθμό της φωτοσύνθεσης και αναπνοής (Mavrogianopoulos, 2005)

Σχήμα 2-2α: Αξονομετρικό σχήμα ICS

Σχήμα 2-2b: Κατά πλάτος τομή ICS

Σχήμα 2-3: Παθητικά συστήματα θέρμανσης που χρησιμοποιούνται στα θερμοκήπια.

Σχήμα 2-4: Παθητικό σύστημα θέρμανσης με αποθήκευση νερού (α) σε διαφανείς σωλήνες και (b) σε δεξαμενές νερού (Sethi & Sharma, 2008).

Σχήμα 2-5: Αποθήκευση αισθητής θερμότητας σε στρώμα πετρωμάτων μέσα στο θερμοκήπιο (Sethi & Sharma, 2008).

Σχήμα 2-6: Εναλλάκτης εδάφους- αέρα για μετάδοση θερμότητας από ή προς το έδαφος εξαρτώμενη από την διαφορά θερμοκρασίας (Sethi & Sharma, 2008).

Σχήμα 2-7: Ολοκληρωμένο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με βορινό τοίχωμα και συλλέκτη εδάφους- αέρα (Sethi & Sharma, 2008).

Σχήμα 2-8. Απορρόφηση και ανάκλαση της υπέρυθρης ακτινοβολίας (NIR) από τα φυτά (Μαυρογιαννόπουλος 2009, Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών).

Σχήμα 2-9: Ανταλλαγές ενέργειας του θερμοκηπίου με το περιβάλλον

Σχήμα 3-1: Ανάλυση του καλύμματος του θερμοκηπίου σε επιμέρους αντιστάσεις

Σχήμα 3-2: Μεταβολή της ισχύος εκπεμπόμενης ακτινοβολίας του μέλανος σώματος, σε σχέση με το μήκος κύματος για συγκεκριμένες θερμοκρασίες (Cengel, 2005)

Σχήμα 3-3: Μεταβλητές που υπεισέρχονται στο μοντέλο προσομοίωσης. Τα μπλε σύμβολα αντιστοιχούν στις εισερχόμενες γνωστές μεταβλητές και τα κόκκινα (με το ερωτηματικό) στις εξερχόμενες άγνωστες μεταβλητές του μοντέλου.

Σχήμα 3-4: Ενεργειακό ισοζύγιο καλύμματος θερμοκηπίου. Τα μπλε σύμβολα αντιστοιχούν στην προστιθέμενη ενέργεια και τα κόκκινα στην ενέργεια που χάνεται.

Σχήμα 3-5: Ενεργειακό ισοζύγιο εσωτερικού αέρα θερμοκηπίου. Τα μπλε σύμβολα αντιστοιχούν στην προστιθέμενη ενέργεια και τα κόκκινα στην ενέργεια που χάνεται.

Σχήμα 3-6: Συνολικές ενεργειακές απώλειες θερμότητας που εκφράζονται με τον ολικό συντελεστή απωλειών U , ανάλογες με την διαφορά θερμοκρασίας $T_a - T_o$ (Perdigones et al, 2006).

Σχήμα 3-7: Περιοχές φυσικής, μικτής και εξαναγκασμένης συναγωγής. Το σύμβολο (+) αναφέρεται στην εξωτερική περιοχή του καλύμματος του θερμοκηπίου ενώ το σύμβολο (*) στην εσωτερική περιοχή.

Σχήμα 3-8: Διακύμανση ταχύτητας ανέμου (WS) στην περιοχή των πιλοτικών θερμοκηπίων για δύο συνεχείς θερμικές περιόδους

Σχήμα 3-9: Επίδραση της εξωτερικής θερμοκρασίας στις προβλεπόμενες ενεργειακές απώλειες και στο εκτιμώμενο ενεργειακό όφελος με χρήση συμβατικού συστήματος θέρμανσης.

Σχήμα 3-10: Επίδραση της εξωτερικής θερμοκρασίας στις προβλεπόμενες ενεργειακές απώλειες και στο εκτιμώμενο ενεργειακό όφελος με χρήση υπέρυθρης θέρμανσης.

Σχήμα 3-11: Επίδραση της διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου στα ενεργειακά οφέλη με χρήση υπέρυθρης θέρμανσης

Σχήμα 3-12: Συνολικές απώλειες θερμοκηπίου και απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας καλύμματος.

Σχήμα 3-13: Συνολικές απώλειες θερμοκηπίου και απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας καλύμματος.

Σχήμα 3-14: Επίδραση της θερμοκρασίας ουρανού στα προβλεπόμενα ενεργειακά οφέλη από την χρήση υπέρυθρης θέρμανσης.

Σχήμα 3-15: Συνολικές απώλειες θερμοκηπίου και απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας καλύμματος

Σχήμα 3-16: Συνολικές απώλειες θερμοκηπίου και απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας καλύμματος

Σχήμα 3-17: Επίδραση του συντελεστή απόδοσης των πηγών υπέρυθρης θέρμανσης στα προβλεπόμενα ενεργειακά οφέλη από την χρήση υπέρυθρης θέρμανσης.

Σχήμα 3-18: Προβλεπόμενες ενεργειακές απώλειες σε επιχειρηματικό θερμοκήπιο με χρήση υπέρυθρης θέρμανσης και θερμού αέρα αντίστοιχα

Σχήμα 3-19: Προβλεπόμενες θερμοκρασίες εσωτερικού αέρα και καλύμματος στο πειραματικό και επιχειρηματικό θερμοκήπιο αντίστοιχα με χρήση υπέρυθρης θέρμανσης.

Σχήμα 3-20: Προβλεπόμενες θερμοκρασίες εσωτερικού καλύμματος στο πειραματικό και επιχειρηματικό θερμοκήπιο αντίστοιχα με χρήση θερμού αέρα .

Σχήμα 3-21: Εκτιμώμενα επιμέρους ενεργειακά οφέλη και συνολικό ενεργειακό όφελος σε επιχειρηματικό θερμοκήπιο με χρήση υπέρυθρης θέρμανσης.

Σχήμα 4-1: Κατασκευαστική μονάδα θερμοκηπίου.

Σχήμα 4-2: Μέγιστες ενεργειακές απώλειες (**W**) σε θερμότητα των θερμοκηπίων.

Σχήμα 4-3: Ομοιομορφία κατανομής θερμοκρασιών φυτικού θόλου με χρήση λαμπτήρων υπέρυθρης ακτινοβολίας

Σχήμα 4-4: Ομοιομορφία κατανομής θερμοκρασιών φυτικού θόλου με χρήση αερόθερμου θερμού αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής.

Σχήμα 4-5: Φασματική κατανομή του συστήματος υπέρυθρης ακτινοβολίας

Σχήμα 4-6: Κατανομή έντασης υπέρυθρης ακτινοβολίας

Σχήμα 4-7: Κατανομή της θερμικής ροής των λαμπτήρων (W/m^2) στο επίπεδο του φυτικού θόλου

Σχήμα 4-8: Συστήματα φυσικού και δυναμικού εξαερισμού θερμοκηπίων

Σχήμα 4-9: Δείκτης ανάπτυξης φυλλικής επιφάνειας (LAI) της πειραματικής καλλιέργειας ως συνάρτηση των ημερών μετά την φύτευση (Tei et al, 1996).

Σχήμα 4-10: Πειραματικό θερμοκήπιο και μετεωρολογικός σταθμός με σύστημα θέρμανσης υπέρυθρη ακτινοβολία

Σχήμα 4-11: Πειραματικό θερμοκήπιο και μετεωρολογικός σταθμός με σύστημα θέρμανσης θερμού αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής

Σχήμα 5-1: Χρονική εξέλιξη της μεταβολής της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα (T_a) με χρήση θερμού αέρα και απουσία ανεμιστήρα

Σχήμα 5-2: Χρονική εξέλιξη της μεταβολής της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα (T_a) με χρήση θερμού αέρα και παρουσία ανεμιστήρα

Σχήμα 5-3: Χρονική εξέλιξη της μεταβολής της T_a με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας

Σχήμα 5-4: Διακύμανση μέσω πειραματικών τιμών εσωτερικού αέρα και καλύμματος με χρήση θερμού αέρα

Σχήμα 5-5: Διακύμανση μέσω πειραματικών τιμών εσωτερικού αέρα και καλύμματος με χρήση IR.

Σχήμα 5-6: Χρονική εξέλιξη της μεταβολής της T_a κατά την διάρκεια κρύας χειμερινής νύχτας με χρήση θερμού αέρα

Σχήμα 5-7: Χρονική εξέλιξη της μεταβολής της T_a κατά την διάρκεια κρύας χειμερινής νύχτας με υπέρυθρη θέρμανση

Σχήμα 5-8: Διακύμανση μέσω πειραματικών τιμών εσωτερικού αέρα και καλύμματος με χρήση θερμού αέρα

Σχήμα 5-9: Διακύμανση μέσω πειραματικών τιμών θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα και καλύμματος με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας

Σχήμα 5-10: Μέση συνολική ενεργειακή κατανάλωση κάθε νύχτας κατά την διάρκεια της δεύτερης θερμικής περιόδου

Σχήμα 5-11: Μέση συνολική ενεργειακή κατανάλωση των συστημάτων θέρμανσης την δεύτερη θερμική περίοδο

Σχήμα 5-12: Ενεργειακό όφελος της υπέρυθρης ακτινοβολίας ως ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας με χρήση συμβατικού συστήματος θέρμανσης

Σχήμα 5-13: Διακύμανση ελάχιστων πειραματικών τιμών θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα και καλύμματος με χρήση θερμού αέρα

Σχήμα 5-14: Διακύμανση ελάχιστων πειραματικών τιμών θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα και καλύμματος με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας

Σχήμα 5-15: Μέγιστη ενεργειακή κατανάλωση των συστημάτων θέρμανσης στην ελάχιστη τιμή της κάθε νύχτας

Σχήμα 5-16: Μεταβολής της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα και του καλύμματος στην διάρκεια της μέσης νύχτας με χρήση θερμού αέρα

Σχήμα 5-17: Μεταβολής της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα και του καλύμματος στην διάρκεια της μέσης νύχτας με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας

Σχήμα 5-18: Διαφορά θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα σε σχέση με την θερμοκρασία αναφοράς και για τα δύο συστήματα θέρμανσης

Σχήμα 5-19: Διαφορά θερμοκρασίας καλύμματος σε σχέση με την θερμοκρασία αναφοράς και για τα δύο συστήματα θέρμανσης

Σχήμα 5-20: Επιτυγχανόμενο ενεργειακό όφελος με βάση τις θερμοκρασιακές διαφορές των παραμέτρων με χρήση μέσων τιμών **10**/λεπτών της θερμικής περιόδου.

Σχήμα 5-21: θερμοκρασιακές διαφορές παραμέτρων με χρήση μέσων τιμών θερμοκρασίας και τιμών μέσης νύχτας θερμικής περιόδου και ενεργειακό όφελος.

Σχήμα 5-22: Βαθμώρες θέρμανσης και κατανάλωση ενέργειας

Σχήμα 5-23: Σύγκριση μέσων θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα (T_a) με τις πειραματικές τιμές με χρήση **IR**

Σχήμα 5-24: Σύγκριση μέσων θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας καλύμματος (T_c) με τις πειραματικές τιμές με χρήση **IR**

Σχήμα 5-25: Σύγκριση μέσων θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας καλύμματος (T_c) με τις πειραματικές τιμές με χρήση θερμού αέρα.

Σχήμα 5-26: Σύγκριση μέσων θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα (T_a) με τις πειραματικές τιμές με χρήση **IR**

Σχήμα 5-27: Σύγκριση μέσων θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας καλύμματος (T_c) με τις μέσες πειραματικές τιμές με χρήση **IR**

Σχήμα 5-28: Σύγκριση μέσων θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας καλύμματος (T_c) με τις μέσες πειραματικές τιμές με χρήση θερμού αέρα

Σχήμα 5-29: Σύγκριση θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα (T_a) και καλύμματος (T_c) με τις πειραματικές τιμές στην χρονική εξέλιξη της νύχτας με χρήση **IR**

Σχήμα 5-30: Σύγκριση θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα (T_a) και καλύμματος (T_c) με τις πειραματικές τιμές στην χρονική εξέλιξη της νύχτας με χρήση θερμού αέρα

Σχήμα 5-31: Σύγκριση συνολικά προβλεπόμενων και μετρούμενων ενεργειακών απωλειών κατά την διάρκεια θερμικής περιόδου με χρήση θερμού αέρα

Σχήμα 5-32: Σύγκριση συνολικών προβλεπόμενων και μετρούμενων ενεργειακών απωλειών κατά την διάρκεια θερμικής περιόδου με χρήση **IR**

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-α: Σύστημα υπέρυθρης θέρμανσης χωρίς ανακλαστήρα

Εικόνα 2-β: Σύστημα υπέρυθρης θέρμανσης με ανακλαστήρα

Εικόνα 2-γ: **Gas-Fired Infrared Heating system**

Εικόνα 2-δ: Υπέρυθρα συστήματα τύπου **Blackheats** (πάνελ και διπλού σωληνωτού)

Εικόνα 4-α: Τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων θέρμανσης