



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

3^η Κατεύθυνση: «Γεωργική μηχανική- Διαχείριση φυσικών πόρων»

Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος

Ε.Γ. Ντούλα



«Διερεύνηση της κατανομής του μικροκλίματος θερμοκηπίου
εξοπλισμένο με αναμείκτες αέρα»

Βόλος, 2011

«Διερεύνηση της κατανομής του μικροκλίματος θερμοκηπίου εξοπλισμένο με αναμείκτες αέρα»

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

N. Κατσούλας (Επιβλέπων) Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Επίκουρος Καθηγητής Γεωργικές Κατασκευές με έμφαση στα θερμοκήπια
K. Κίττας (Μέλος) Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Καθηγητής Γεωργικές Κατασκευές
Σ. Φουντάς (Μέλος) Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Επίκουρος Καθηγητής Γεωργική Μηχανολογία

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη της κατανομής του μικροκλίματος του θερμοκηπίου, χρησιμοποιώντας διάφορα συστήματα κλιματισμού. Εξετάστηκε η επίδραση της συνδυασμένης χρήσης των δυο συνηθέστερων συστημάτων θέρμανσης, δηλαδή των επιδαπέδιων σωλήνων ζεστού νερού και του αερόθερμου, με την παράλληλη χρήση αναμείκτη αέρα, η επίδραση ενός νεφελοψεκαστήρα σε συνδυασμό με το φυσικό αερισμό και τέλος η δημιουργία κλιματικών προσομοιωμάτων, που να περιγράφουν τη συμπεριφορά της θερμοκρασίας και της υγρασίας, κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης.

Την περίοδο που χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα συστήματα θέρμανσης, υπήρχε ομοιομορφία στο χώρο του θερμοκηπίου, όσον αφορά στη θερμοκρασία, αλλά λιγότερη για την υγρασία. Αντιθέτως, με την λειτουργία του αναμείκτη αέρα, η ομοιομορφία στο χώρο του θερμοκηπίου αυξήθηκε αισθητά, με αποκορύφωμα τη μεταχείριση στην οποία ο αναμείκτης λειτουργούσε κάθε μισή ώρα, για δέκα λεπτά.

Την περίοδο που χρησιμοποιήθηκε ο νεφελοψεκαστήρας, επιτυγχάνθηκε ομοιομορφία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, αλλά κυρίως όταν ο νεφελοψεκαστήρας λειτουργούσε στο μέγιστο της παροχής του. Όταν λειτουργούσε με μικρότερη παροχή, τα αποτελέσματα ήταν πάλι ενθαρρυντικά, αλλά για να επιτευχθεί ομοιομορφία, απαιτούνταν περισσότερος χρόνος. Επίσης, στις μικρότερες παροχές, όταν άνοιγαν τα πλαϊνά παράθυρα, ο αέρας ανακτούσε τα φυσικά του χαρακτηριστικά σε λιγότερο χρόνο απ' ό,τι στο 100% της παροχής του νεφελοψεκαστήρα.

Τέλος, στην τελευταία φάση του πειράματος, εξετάστηκαν κλιματικά προσομοιώματα ικανά να περιγράψουν τη μεταβολή και τη συμπεριφορά του κλίματος, όταν λειτουργούσε η θέρμανση. Τα προσομοιώματα έδειξαν ότι στο θερμοκήπιο δεν επικρατούσαν υψηλές συνθήκες ομοιομορφίας, ενώ ο αέρας είχε εντελώς διαφορετική συμπεριφορά όταν άνοιγε το σύστημα θέρμανσης, απ' ό,τι όταν έκλεινε.

Γενικά, όταν λειτουργεί σύστημα αναμείκτη αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, η ομοιομορφία είναι μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα τα φυτά να αναπτύσσονται σε καλύτερες συνθήκες. Όταν η χρήση αναμείκτη συνδυάζεται και με τη χρήση προσομοιωμάτων, τότε μπορούν να επιτευχθούν ακριβέστερες συνθήκες και έλεγχος, για τη μέγιστη παραγωγή και την εξοικονόμηση ενέργειας στο θερμοκήπιο.

Πρόλογος - Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, κ. Ν. Κατσούλα, για την υπόδειξη του θέματος της μεταπτυχιακής διατριβής μου, τη βοήθεια και τη συμπαράσταση που μου προσέφερε κατά τη διάρκειά της.

Θερμές ευχαριστίες αποδίδονται στον Καθηγητή του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κ. Κ. Κίττα, για την επιστημονική καθοδήγηση, τη συνεργασία του και τη βοήθεια που μου πρόσφερε στη συγγραφή της εργασίας μου.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Επίκουρο Καθηγητή του εργαστηρίου Γεωργικής Μηχανολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κ. Σ. Φουντά, για τις διορθώσεις-υποδείξεις του ως μέλος της εξεταστικής επιτροπής.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου για την ηθική και υλική υποστήριξη που μου παρέχουν σε κάθε επιλογή μου, δίνοντάς μου δύναμη να επιτυγχάνω τους εκάστοτε στόχους μου.

*Στην οικογένεια μου
και στους νομούς μου*

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 Γενική Εισαγωγή	1
1.1. Το θερμοκήπιο.....	2
1.2. Ο κλάδος των θερμοκηπίων διεθνώς.....	4
1.3. Ο κλάδος των θερμοκηπίων στην Ελλάδα.....	6
1.4. Προβλήματα των Ελληνικών θερμοκηπίων.....	10
1.5. Κατάταξη των θερμοκηπίων ανάλογα με το σύστημα θέρμανσης.....	12
1.6. Ρύθμιση της υψηλής σχετικής υγρασίας.....	15
1.7. Μελέτη της χρήσης προσομοιωμάτων.....	18
1.8. Αντικείμενο και δομή της εργασίας.....	20
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	22
2.1. Γενικά.....	23
2.2. Το μικροκλίμα του θερμοκηπίου.....	25
2.3. Συστήματα θέρμανσης.....	30
2.4. Συστήματα αερισμού.....	40
2.5. Κλιματικά προσομοιώματα θερμοκηπίων.....	43
2.6. Συζήτηση- Συμπεράσματα.....	52
Κεφάλαιο 3 Υλικά και μέθοδοι.....	54
3.1. Υλικά.....	55
3.2. Μέθοδοι.....	67
Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα και συζήτηση.....	75
4.1. Ομοιομορφία θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας για διαφορετικούς συνδυασμούς συστημάτων θέρμανσης.....	76
4.2. Ομοιομορφία σχετικής υγρασίας με τη χρήση συστήματος δροσισμού	101
4.3. Ομοιομορφία και συμπεριφορά θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας με τη χρήση προσομοιωμάτων.....	115
Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα.....	126
5.1. Συμπεράσματα.....	127
Βιβλιογραφία.....	136

Κεφάλαιο 1 ΓΕΝΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Το θερμοκήπιο

Η γεωργική παραγωγή του ανοιχτού αγρού εξαρτάται από ασταθείς και αβέβαιης εξέλιξης μετεωρολογικούς παράγοντες. Για αυτό από πολλούς η γεωργία του ανοιχτού αγρού, θεωρείται μια οικονομική δραστηριότητα με σχετικά αβέβαιο οικονομικό αποτέλεσμα.

Γενικά η γεωργική παραγωγή εξαρτάται από παράγοντες που έχουν να σχέση με τα κληρονομικό δυναμικό του φυτού και από παράγοντες, όπως η ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η υγρασία, το διοξείδιο του άνθρακα κ.α. που αποτελούν το περιβάλλον της κόμης ή της ρίζας του φυτού. Για να επιτευχθεί αξιόπιστος χρονικός προγραμματισμός της παραγωγής, μεγιστοποίηση της, και βελτιστοποίηση της ποιότητας των προϊόντων μιας συγκεκριμένης καλλιέργειας απαιτείται η ρύθμιση των προαναφερθέντων παραγόντων προς τη σωστή κατεύθυνση.

Η τεχνολογία των θερμοκηπίων αναπτύχθηκε προκειμένου να δημιουργείται το κατάλληλο περιβάλλον για την εκάστοτε επιθυμητή καλλιέργεια. Το θερμοκήπιο παρέχει τη δυνατότητα καλλιέργειας των φυτών κατά τη διάρκεια όλου του έτους και είναι μια κατασκευή, η οποία επιτρέπει στη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία να εισέρχεται και παγιδεύει τη μεγάλου μήκους κύματος θερμική ακτινοβολία προκειμένου να δημιουργηθεί το επιθυμητό μικροκλίμα για υψηλότερη παραγωγή.

Τα θερμοκήπια είναι κλειστές, διαφανείς κατασκευές που ο σκελετός τους αποτελείται από σιδερένια ή ξύλινα δοκάρια, καλύπτεται από πλαστικά φύλλα ή γυαλί που έχουν σκοπό τη δημιουργία όσο το δυνατόν πιο ευνοϊκών συνθηκών περιβάλλοντος για την καλλιέργεια των φυτών, ιδιαίτερα σε εποχές που στην ύπαιθρο αυτό δεν συμβαίνει και σε περιοχές που δεν είναι ενδεδειγμένες για την καλλιέργεια κάποιου είδους στις επικρατούσες φυσικές οικολογικές συνθήκες. Σκοπός της χρησιμοποίησης των θερμοκηπίων στην παραγωγή γεωργικών προϊόντων είναι η τροποποίηση ή η ρύθμιση πολλών από τους παράγοντες του περιβάλλοντος που επιδρούν στην ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών. Στο εσωτερικό των θερμοκηπίων διατηρείται ένας συγκεκριμένος βαθμός θερμοκρασίας και υγρασίας, ο οποίος καθορίζεται από τον καλλιεργητή, αναλόγως με τις απαιτήσεις των φυτών ανά βλαστική περίοδο. Στη χώρα μας τα θερμοκήπια χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για παραγωγή οπωροκηπευτικών και δευτερευόντως για παραγωγή καλλωπιστικών.



Εικόνα 1.1. Εσωτερικό σύγχρονου θερμοκηπίου (<http://www.google.gr/search>)

Με το θερμοκήπιο γενικά:

- Αποφεύγονται ζημιές από αέρα, βροχή, χιόνι και χαλάζι.
- Ανάλογα με τον εξοπλισμό του, παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης των παραγόντων του περιβάλλοντος της κόμης των φυτών όπως της θερμοκρασίας, της υγρασίας και της ακτινοβολίας.
- Παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης των παραγόντων του περιβάλλοντος της ρίζας των φυτών π.χ. της υγρασίας, του οξυγόνου, των ανόργανων θρεπτικών στοιχείων και του pH, που με τη χρήση κατάλληλων εδαφικών υποστρωμάτων ή υδροπονικών καλλιεργειών, μπορούν να φθάσουν με ακρίβεια τις απαιτήσεις των φυτών.
- Λόγω περιορισμένου χώρου και εξειδικευμένου εξοπλισμού παρέχεται η δυνατότητα αποτελεσματικότερης φυτοπροστασίας από ασθένειες και έντομα.

Στα θερμοκήπια όπου γίνεται ακριβής ρύθμιση των παραγόντων του περιβάλλοντος των φυτών, μπορεί να επιτευχθεί:

- Χρονικός προγραμματισμός της παραγωγής ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες του εξωτερικού χώρου.

- Αύξηση της παραγωγής και βελτίωση ποιότητας λόγω της βελτίωσης των συνθηκών που επικρατούν μέσα στο θερμοκήπιο.
- Παραγωγή προϊόντων με μικρό κόστος (Μαυρογιαννόπουλος,, 2005).

Γι' αυτό άλλωστε και χαρακτηρίζεται το θερμοκήπιο ως βιομηχανική μονάδα, καθώς για να είναι βιώσιμο, ακολουθεί από την αρχή της λειτουργίας του ένα επιχειρηματικό σχέδιο.

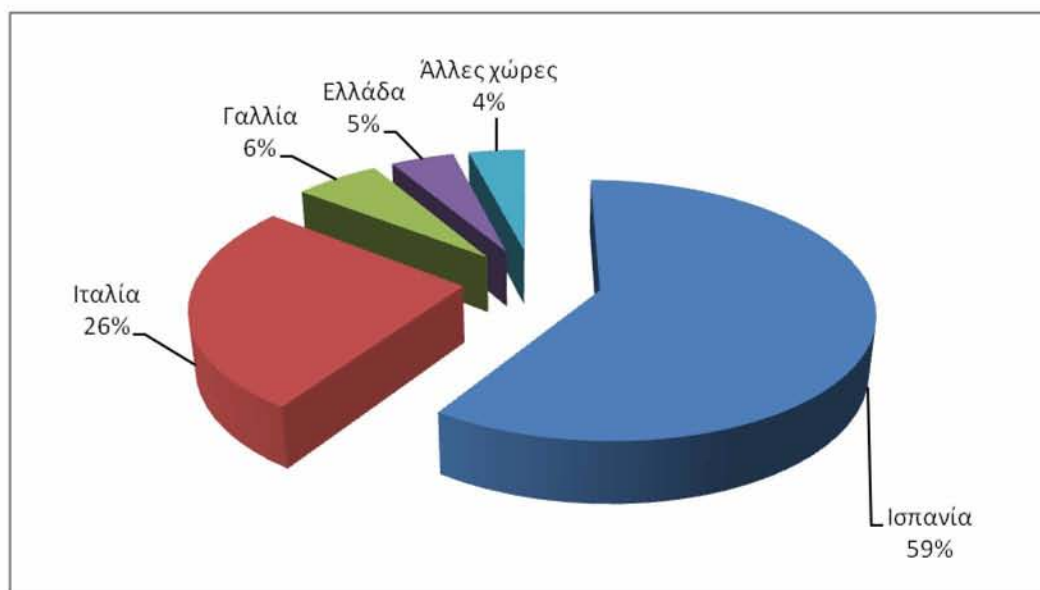
1.2. Ο κλάδος των θερμοκηπίων διεθνώς

Ο κλάδος των θερμοκηπίων παρουσιάζει ιδιαίτερη άνθηση στον διεθνή χώρο. Θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και ως δείκτης πολιτισμού για κάθε χώρα, καθώς τόσο ο εξοπλισμός και τρόπος παραγωγής των προϊόντων όσο και το ίδιο το προϊόν, μπορούν να καθρεφτίσουν την οικονομικο-κοινωνικο-πολιτική ανάπτυξη μιας χώρας. Η παραγωγή καλλωπιστικών σε αντίθεση με την παραγωγή οπωροκηπευτικών δηλώνει υψηλότερο βιοτικό επίπεδο του πληθυσμού της εκάστοτε χώρας. Η επιλογή των υλικών κάλυψης ποικίλει ανά γεωγραφικό πλάτος και επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες (π.χ. στην Ελλάδα αποφεύγεται το γυαλί λόγω έντονης ηλιοφάνειας και χαλαζοπτώσεων).

Οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες αποτελούν την πιο δυναμική μορφή της πρωτογενούς παραγωγής. Το 2002 η παγκόσμια έκταση των θερμοκηπίων ήταν 15.000.000 στρέμματα ή περίπου 2m²/κάτοικο της γης, εκ των οποίων τα 12.500.000 στρ. ή 83.3 % στην Κίνα. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση υπάρχουν 1.200.000 στρ. ή 8% των θερμοκηπιακών εκτάσεων παγκοσμίως (300.000 στρ. από αυτά είναι υαλόφρακτα). Η Ιαπωνία έχει 450.000 στρ. ή 3% των θερμοκηπιακών εκτάσεων παγκοσμίως (25.000 στρ. από αυτά είναι υαλόφρακτα). Παγκόσμια λοιπόν (πλην Κίνας, για την οποία οι πληροφορίες είναι συγκεχυμένες) υπάρχουν, σύμφωνα με τα τελευταία στοιχεία (2002) 2.500.000 στρ. θερμοκηπίων, από τα οποία τα 650.000 στρ. είναι υαλόφρακτα και τα 1.850.000 στρ. είναι με κάλυψη πλαστικού.

Σε σχέση με το συνολικό αριθμό θερμοκηπίων παγκόσμια (πλην Κίνας), τα θερμοκήπια της Ε.Ε. καλύπτουν το 48% από τα οποία τα υαλόφρακτα θερμοκήπια αποτελούν το 62% των υαλόφρακτων θερμοκηπίων του κόσμου και τα πλαστικά το 43% των πλαστικών του κόσμου.

Όσον αφορά στα υαλόφρακτα θερμοκήπια στην Ε.Ε. η Ολλανδία κατέχει την πρώτη θέση με 33% του συνόλου και ακολουθούν η Ιταλία με 17%, η Ισπανία με 13%, η Γερμανία με 10% και οι άλλες χώρες με μικρότερα ποσοστά. Στα καλυμμένα με πλαστικό θερμοκήπια, η Ισπανία κατέχει την πρώτη θέση με 59% του συνόλου και ακολουθεί η Ιταλία με 26%, η Γαλλία με 6%, η Ελλάδα με 4,5% και οι άλλες χώρες με μικρότερα ποσοστά.



Γράφημα 1.1. Καλυμμένα με πλαστικό Θερμοκήπια Ε.Ε. (Μαυρογιαννόπουλος 2005).

Στα καλυμμένα με πλαστικό θερμοκήπια, η Ισπανία κατέχει την πρώτη θέση με 59% του συνόλου και ακολουθεί η Ιταλία με 26%, η Γαλλία με 6%, η Ελλάδα με 4,5% ενώ έπονται οι άλλες χώρες με πολύ χαμηλά ποσοστά. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι ο τύπος θερμοκηπίων που χρησιμοποιείται στις διάφορες χώρες της Ε.Ε. εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες κάθε χώρας, την τεχνολογική της ανάπτυξη, τα χαρακτηριστικά της οικονομίας της και από τη φύση των προϊόντων που παράγονται εκεί. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η Ελλάδα στο γενικό σύνολο κατέχει μόλις την 7^η θέση ενώ έχει πολύ ευνοϊκές εδαφοκλιματικές συνθήκες για την παραγωγή θερμοκηπιακών προϊόντων.

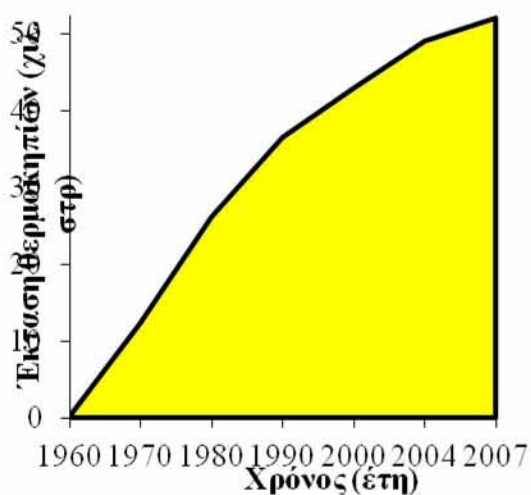
Σχετικά με την προσφορά θερμοκηπιακών προϊόντων στις χώρες της Ε.Ε. σημειώνουμε ότι, γενικά, το χειμώνα υπάρχει έλλειψη θερμοκηπιακών προϊόντων και

γίνονται σημαντικές εισαγωγές από άλλες χώρες (κυρίως Μεσογειακές) ενώ το καλοκαίρι πλεόνασμα, το οποίο εξάγεται (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

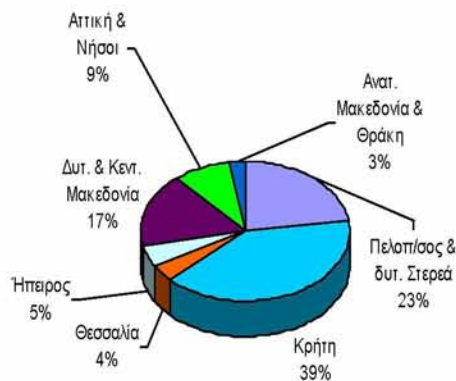
1.3. Ο κλάδος των θερμοκηπίων στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, οι πρώτες συστηματικές εγκαταστάσεις θερμοκηπίων ξεκίνησαν το 1955 και αποτελούνταν από υαλόφρακτα θερμοκήπια για παραγωγή καλλωπιστικών φυτών. Τα θερμοκήπια είναι συγκεντρωμένα σε περιοχές με υψηλές θερμοκρασίες και έντονη ηλιοφάνεια π.χ. Κρήτη, Πελοπόννησος και νησιά νοτίου Αιγαίου, σε ποσοστό 65% των συνολικών θερμοκηπιακών εκτάσεων της χώρας. Στη χώρα μας, η οποία καλύπτει το 1.4% της παγκόσμιας έκτασης σε θερμοκήπια, η αύξηση των θερμοκηπιακών εκτάσεων ήταν ιδιαίτερα εντυπωσιακή την εικοσαετία 1960-1980 (Σχήμα 1.1.α), με τη χρησιμοποίηση του πλαστικού φύλλου πολυαιθυλενίου ως υλικού κάλυψης των θερμοκηπίων, φθάνοντας τα 49.000 στρέμματα το 2004. Τα διάφορα διαρθρωτικά προβλήματα της ελληνικής γεωργίας όπως η ανάγκη εξασφάλισης υψηλότερου εισοδήματος από μικρής έκτασης γεωργικό έδαφος (εντατικοποίηση καλλιεργειών), ώθησαν αρκετούς αγρότες από άλλες περιοχές της Ελλάδας (π.χ. Θεσσαλία) στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες, αυξάνοντας έτσι το ποσοστό των θερμοκηπιακών εκτάσεων (Μαυρογιαννόπουλος, 2005). Η ευκολία προσαρμογής του πλαστικού σε οποιοδήποτε σχήμα σκελετού και η χαμηλή του τιμή, επέτρεψαν στους καλλιεργητές σε περιοχές με πρώιμες καλλιέργειες να κατασκευάσουν μόνοι τους θερμοκήπια για παραγωγή πρώιμων κηπευτικών χωρίς να χρειάζονται μεγάλα κεφάλαια. Κατά τη δεκαετία του '80 η αύξηση συνεχιζόταν αλλά με χαμηλότερους ρυθμούς ενώ κατά την τελευταία δεκαετία οι ρυθμοί ήταν ακόμη χαμηλότεροι. Εν τούτοις, σε απόλυτα μεγέθη, οι θερμοκηπιακές εκτάσεις στην Ελλάδα δεν έχουν γνωρίσει την ανάπτυξη εκείνη που θα δικαιολογούσαν οι ευνοϊκοί παράγοντες που επικρατούν στη χώρα μας π.χ. οι εδαφοκλιματικές συνθήκες και το ήπιο κλίμα που παρέχει τη δυνατότητα καλλιέργειας σε απλές κατασκευές χωρίς ακριβό εξοπλισμό. Κατά συνέπεια, η χώρα μας υστερεί σημαντικά στον τομέα αυτό έναντι άλλων χωρών με παρόμοιες κλιματολογικές συνθήκες, όπως είναι η Ισπανία και η Ιταλία.

Στην Ελλάδα, η Κρήτη κατέχει το μεγαλύτερο τμήμα της καλυμμένης έκτασης σε θερμοκήπια με ποσοστό περίπου 39% (Σχήμα 1.1.β).



(α)



(β)

Σχήμα 1.1. (α) Έκταση θερμοκηπιακών εκτάσεων στην Ελλάδα από το 1960 έως το 2007 (Πηγή: Υπουργείο Γεωργίας). (β) Γεωγραφική κατανομή των θερμοκηπιακών εκτάσεων στην Ελλάδα σε ποσοστό της συνολικής έκτασης (Πηγή: Υπουργείο Γεωργίας).

Τα προϊόντα που παράγονται στο θερμοκήπιο ανήκουν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Τρόφιμα, κυρίως κηπευτικά και φρούτα
- Καλλωπιστικά φυτά, γλαστρικά φυτά και δρεπτά (κομμένα) άνθη.

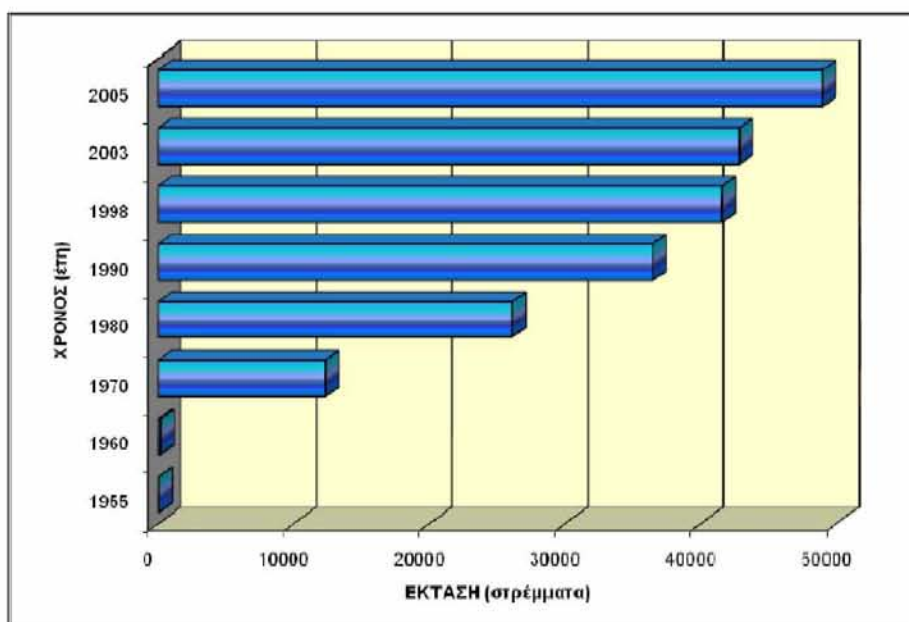
Τα προϊόντα αυτά συνιστούν σήμερα έναν από τους δυναμικότερους τομείς της ελληνικής γεωργίας, από πλευράς εξασφάλισης εισοδήματος και εξαγωγών. Η καλλιέργεια των κηπευτικών φυτών και των δρεπτών ανθέων, στη συντριπτική πλειονότητα των θερμοκηπίων, γίνεται στο φυσικό έδαφος ή σε βελτιωμένο με προσθήκη οργανικής ουσίας. Η καλλιεργούμενη σήμερα έκταση στην Ελλάδα είναι περίπου 1.500 στρέμματα και γίνεται με τη μέθοδο του ορυκτοβάμβακα, μεμβράνης θρεπτικού διαλύματος, σάκων περλίτη και οργανικών υποστρωμάτων.

Τα παραγόμενα θερμοκηπιακά προϊόντα, κηπευτικά όσο και ανθοκομικά, έχουν για την αγροτική οικονομία της χώρας μια ιδιαίτερη σημασία, συμμετέχοντας στο σύνολο

της ακαθάριστης αξίας της φυτικής παραγωγής κατά 8,7% περίπου, ενώ η έκταση στην οποία καλλιεργούνται αποτελεί το 0,12% του γεωγραφικού εδάφους.

Σύμφωνα με τα στοιχεία του Υπουργείου Γεωργίας για το 2003, η αξία των παραγόμενων κηπευτικών προϊόντων σε θερμοκήπια αντιπροσώπευε το 21,9% της συνολικής αξίας των κηπευτικών, ενώ η καλλιεργούμενη έκταση αποτελούσε μόνο το 3,4% της καλλιεργούμενης έκτασης με κηπευτικά.

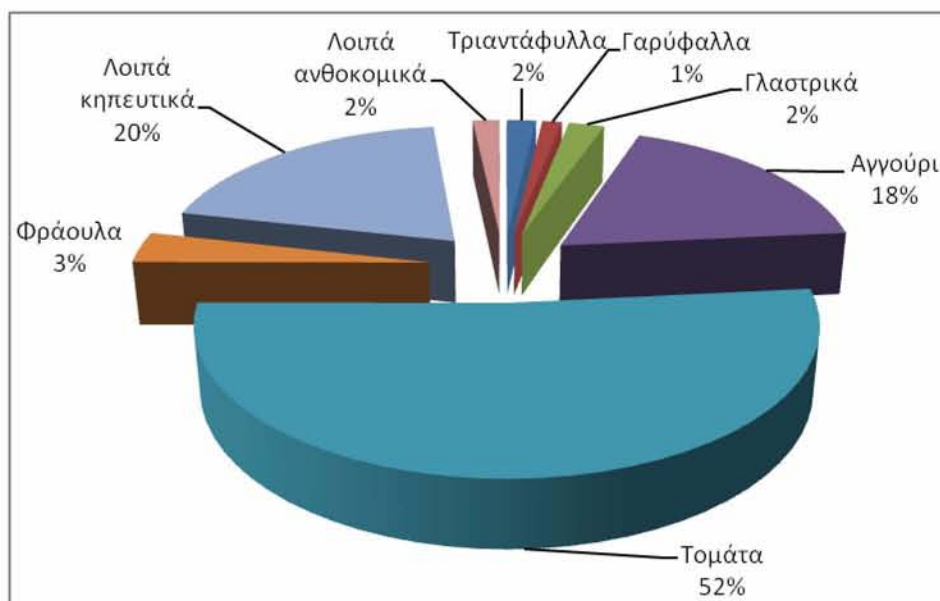
Η αξία των παραγόμενων ανθοκομικών σε θερμοκήπια αποτελούσε το 59,3% της συνολικής αξίας των ανθοκομικών, ενώ η καλλιεργούμενη έκταση αποτελούσε το 37,1% του συνόλου. Η έκταση των καλλιεργούμενων με κηπευτικά θερμοκηπίων είχε ένα μέσο ρυθμό αύξησης στην εικοσαετία 1983 – 2003, 1,41% ετησίως, ενώ την ίδια περίοδο η έκταση των καλλιεργούμενων με ανθοκομικά φυτά αυξήθηκε με μέσο ρυθμό 4,04% ετησίως. Τα θερμοκήπια με ανθοκομικά σήμερα αποτελούν μόνο το 8,1% του συνόλου των θερμοκηπίων (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).



Γράφημα 1.2. Εξέλιξη των Θερμοκηπίων στην Ελλάδα κατά την περίοδο 1955 – 2005 (Υπουργείο Γεωργίας, 2005).

Τα κυριότερα είδη που καλλιεργούνται στο θερμοκήπιο είναι η τομάτα και το αγγούρι από τα λαχανοκομικά, τα γλαστρικά φυτά, τα γαρίφαλα και τα τριαντάφυλλα από τα ανθοκομικά. Η μέση στρεμματική απόδοση των θερμοκηπιακών καλλιεργειών

είναι σαφώς μεγαλύτερη από την απόδοση της υπαίθριας παραγωγής. Ενδεικτικά αναφέρεται πως η απόδοση της τομάτας τομάτα φτάνει τους δέκα (10) τόνους ανά στρέμμα (απόδοση που είναι διπλάσια της υπαίθριας παραγωγής). Αξίζει εδώ να αναφερθεί ότι στην Ολλανδία η απόδοση της τομάτας φτάνει τους 60 τόνους ανά στρέμμα.



Γράφημα 1.3. Ποσοστό εκτάσεων επί του συνόλου που καταλάμβαναν διάφορες καλλιέργειες το 2003 (Πηγή: Υπουργείο Γεωργίας).

Γενικά, υπάρχει αύξηση των στρεμματικών αποδόσεων την τελευταία εικοσαετία, είναι όμως πολύ μικρότερη της αύξησης που παρατηρείται σε άλλες χώρες. Από δεδομένα του Υπουργείου Γεωργίας συνεπάγεται ότι η αύξηση των μέσων στρεμματικών αποδόσεων προέρχεται από τη χρησιμοποίηση βελτιωμένων θερμοκηπίων και τη χρησιμοποίηση αποδοτικότερων υβριδίων. Η βελτίωση της τεχνογνωσίας των παραγωγών συμμετέχει ελάχιστα.

Στη χώρα μας, το 2003, μόνο το 26,7% του συνόλου των θερμοκηπίων έχει τη δυνατότητα ικανοποιητικής ρύθμισης της θερμοκρασίας στο χώρο τους. Τα θερμοκήπια σύγχρονης τεχνολογίας με δυνατότητα πλήρους ελέγχους των συνθηκών του περιβάλλοντος είναι ελάχιστα. Τα αίτια είναι κυρίως τα προβλήματα της έλλειψης τεχνογνωσίας και τεχνικής υποστήριξης.

Ο κλάδος των θερμοκηπίων στην Ελλάδα αποτελεί έναν από τους δυναμικότερους κλάδους της γεωργίας, παρόλο που ο μεγαλύτερος όγκος των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων στην Ελλάδα δε βρίσκεται τεχνολογικά σε υψηλό επίπεδο. Η περαιτέρω ανάπτυξη των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων:

- παρέχει τη δυνατότητα συγκράτησης του πληθυσμού στην ύπαιθρο
- μειώνει την ανεργία αξιοποιώντας πολλά εργατικά χέρια
- συντελεί στην αύξηση των ελληνικών εξαγωγών γεωργικών προϊόντων και
- δίνει διέξοδο στον εκσυγχρονισμό της ελληνικής γεωργίας.

Για να γίνει όμως δυνατή η βελτίωση αυτής της παραγωγικής δραστηριότητας, υπάρχει μεγάλη ανάγκη τεχνικής υποστήριξης των θερμοκηπιακών μονάδων, διότι:

- Η παραγωγή τους βασίζεται σε ανεπτυγμένες τεχνολογικά μεθόδους
- Η ανάπτυξη και παραγωγή φυτών έξω από το φυσικό τους περιβάλλον δημιουργεί περισσότερα προβλήματα απ' ό,τι στις συνθήκες καλλιέργειας του ανοιχτού αγρού, που πρέπει να επιλυθούν από κατάλληλα εξοπλισμένα εργαστήρια
- Ο εντατικός ρυθμός καλλιέργειας απαιτεί άμεσες λύσεις που δεν επιδέχονται καθυστερήσεις.

Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την ορθολογική ρύθμιση του περιβάλλοντος στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, καθώς και την υιοθέτηση τεχνικών που βελτιώνουν την ενεργειακή συμπεριφορά του και περιορίζουν την κατανάλωση ενέργειας. (Μπαρτζάνας, 2004).

1.4. Προβλήματα των ελληνικών θερμοκηπίων

Σήμερα, η παραγωγή προϊόντων υπό κάλυψη εμφανίζεται ιδιαίτερα ενεργειοβόρα με ταυτόχρονη σημαντική χρήση χημικών για φυτοπροστασία, λίπανση και απολύμανση του εδάφους. Ο ανταγωνισμός, τόσο με τις χώρες της Βόρειας Ευρώπης, όσο και με τις χώρες της Μεσογειακής λεκάνης, είναι ιδιαίτερα οξύς, με αποτέλεσμα τη σχεδόν παντελή έλλειψη ελληνικών θερμοκηπιακών προϊόντων στις διεθνείς αγορές. Η θέρμανση των θερμοκηπίων στη χώρα μας καθώς επίσης και σε όλον τον μεσογειακό χώρο, παρουσιάζει μια ιδιομορφία εξαιτίας των κλιματολογικών συνθηκών που επικρατούν. Αυτή η ιδιομορφία συνίσταται στο ότι η χώρα μας έχει

μεν ήπιο κλίμα κατά τη διάρκεια του χειμώνα, δεν είναι όμως τόσο ευνοϊκές οι θερμοκρασίες ώστε να μπορούμε να παράγουμε ανθοκομικά ή λαχανοκομικά προϊόντα καλής ποιότητας σε μη θερμαινόμενα θερμοκήπια. Το ήπιο κλίμα που επικρατεί στη χώρα μας το χειμώνα είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα γιατί χρειάζονται πολύ μικρότερες ποσότητες καυσίμων (περίπου το 1/5 – 1/6) για τη θέρμανση των θερμοκηπίων σε σύγκριση με τις χώρες της Βόρειας Ευρώπης, δεν σημαίνει όμως ότι η θέρμανση δεν είναι απαραίτητη. Επίσης, η πλειοψηφία των καλλιεργητών αγνοούν τις ακριβείς ποσότητες των καυσίμων οι οποίες απαιτούνται στη διάρκεια ενός έτους για να μπορούν να υπολογίζουν το επιπλέον κόστος που θα έχουν να αντιμετωπίσουν ενώ παράλληλα δεν γνωρίζουν ακριβώς ποιος τύπος καυσίμων είναι ο πιο κατάλληλος και ο πιο οικονομικός για το θερμοκήπιο και την περιοχή τους.

Παρόλο που ο χειμώνας είναι ήπιος στη χώρα μας, το υψηλό θερμοκρασιακά καλοκαίρι αποτελεί έναν ανασταλτικό παράγοντα, καθώς σε πολλές περιοχές (π.χπ, Κρήτη) το καλοκαίρι σταματά η παραγωγή προϊόντων, λόγω των ακραίων θερμοκρασιών.

Για να γίνει η παραγωγή θερμοκηπιακών προϊόντων πιο φιλική στο περιβάλλον (με μείωση των εισροών ενέργειας και χημικών) και πιο ανταγωνιστική, δημιουργώντας έτσι προϋποθέσεις επέκτασης του κλάδου των θερμοκηπίων, θα πρέπει:

- Να υιοθετηθούν τεχνικές που βελτιώνουν την ενεργειακή συμπεριφορά του θερμοκηπίου και περιορίζουν την κατανάλωση ενέργειας. Τέτοιες τεχνικές είναι ο ορθολογικός σχεδιασμός της κατασκευής, η βελτίωση της χρήσης των συστημάτων θέρμανσης, η χρήση ήπιων μορφών ενέργειας και συστημάτων εξοικονόμησης ενέργειας. Η υιοθέτηση των ανωτέρω θα βελτιώσει τη συμπεριφορά των θερμοκηπίων στην εγχώρια αγορά και θα αυξήσει την ανταγωνιστικότητα των ελληνικών θερμοκηπίων, σε σχέση με τα ενεργειοβόρα θερμοκήπια της Βόρειας Ευρώπης.

- Να χρησιμοποιηθούν τεχνολογίες που παρατείνουν τη λειτουργία του θερμοκηπίου κατά τη θερμή περίοδο. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη χώρα μας, όπου, από τις πρώτες μέρες της άνοιξης, οι υψηλές θερμοκρασίες και οι υψηλές τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας δημιουργούν «δυσβάστακτες» υπερθερμάνσεις στο εσωτερικό των θερμοκηπίων. Τέτοιες τεχνικές είναι ο σωστός

φυσικός αερισμός, η χρήση συστημάτων δυναμικού αερισμού, δροσισμού και σκίασης. Οι τεχνολογίες αυτές θα καταστήσουν τα θερμοκήπιά μας ανταγωνιστικά, σε σχέση με τα θερμοκήπια των άλλων μεσογειακών χωρών, και θα μειώσουν τις εισαγωγές, ιδιαίτερα των ανθοκομικών προϊόντων (Μπαρτζάνας, 2004).

Στη σημερινή παραγωγή θερμοκηπιακών προϊόντων, η έμφαση δε δίνεται στην αύξηση της παραγωγής, αλλά κυρίως στην ορθολογική χρησιμοποίηση των συντελεστών της παραγωγής που θα επιτρέψει την παραγωγή ποιοτικών προϊόντων με όσο το δυνατόν λιγότερες εισροές. Το κλειδί για την επίτευξη του ανωτέρου στόχου στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες μπορεί να είναι η ορθολογική ρύθμιση του περιβάλλοντος στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

Στα θερμοκήπια ειδικότερα, οι κλιματικοί παράγοντες που επηρεάζονται και τροποποιούνται σύμφωνα με τις απαιτήσεις των φυτών είναι κυρίως η θερμοκρασία (μέσω θέρμανσης, εξαερισμού, σκίασης, κλπ.) και δευτερευόντως η ατμοσφαιρική υγρασία και η διάρκεια του φωτισμού (φωτοπερίοδος). Παράλληλα, μέσα στο χώρο των θερμοκηπίων καθίσταται επιπλέον δυνατή και η τροποποίηση της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα καθώς και η ένταση του φωτισμού. Η ρύθμιση αυτών των εσωτερικών συνθηκών λειτουργίας του θερμοκηπίου απαιτεί τον κατάλληλο εξοπλισμό. Στον απαραίτητο εξοπλισμό ενός σύγχρονου θερμοκηπίου περιλαμβάνονται το σύστημα θέρμανσης, το σύστημα αερισμού και ένα σύστημα ρύθμισης της σχετικής υγρασίας του χώρου.

1.5. Κατάταξη των θερμοκηπίων ανάλογα με το σύστημα θέρμανσης

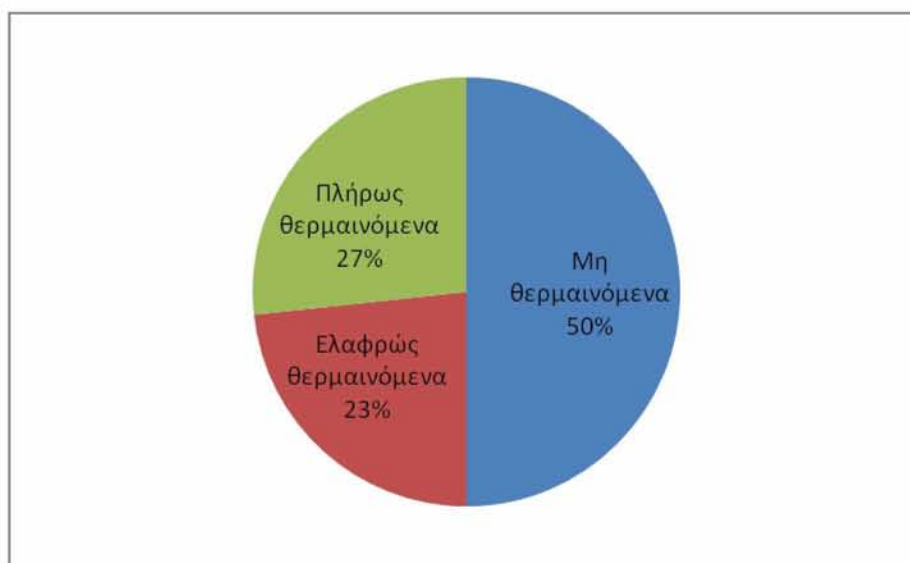
Τα θερμοκήπια με βάση τη θέρμανση που διαθέτουν χωρίζονται σε μη θερμαινόμενα, ελαφρώς θερμαινόμενα και πλήρως θερμαινόμενα.

Μη θερμαινόμενα είναι τα περισσότερα θερμοκήπια της νοτίου Ελλάδος, δηλαδή σε περιοχές χωρίς χαμηλές θερμοκρασίες και έντονη ηλιοφάνεια, τα οποία δε χρησιμοποιούν κανένα σύστημα θέρμανσης.

Στα ελαφρώς θερμαινόμενα θερμοκήπια, η τεχνητή θέρμανση χρησιμοποιείται για να προστατεύσει συνήθως την καλλιέργεια από τον παγετό αλλά και να διατηρήσει τη θερμοκρασία του χώρου σε ένα επίπεδο που να περιορίσει τη συμπύκνωση της

υγρασίας πάνω στα φυτά. Τα θερμοκήπια αυτά δεν εξοπλίζονται με πολυσύνθετο και ακριβό σύστημα θέρμανσης. Ένα απλό αερόθερμο σχετικά μικρής ισχύος συνήθως είναι αρκετό.

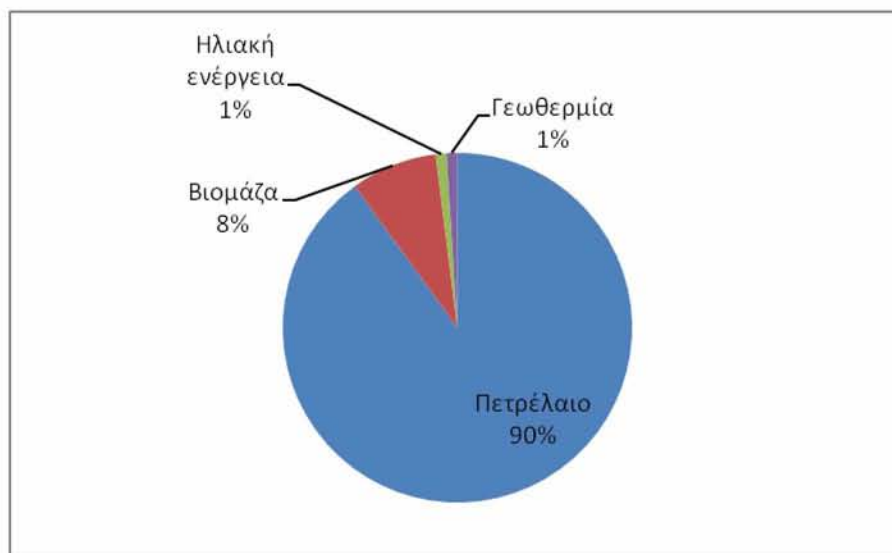
Τα πλήρως θερμαινόμενα θερμοκήπια έχουν πιο σύνθετο και περισσότερο ακριβό σύστημα θέρμανσης που επιτρέπει τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του χώρου στο άριστο επίπεδο. Πιο συχνά χρησιμοποιείται κεντρική θέρμανση με ζεστό νερό ή αερόθερμα κατάλληλης ισχύος, που συνοδεύονται με αεραγωγό για ομοιόμορφη κατανομή του ζεστού αέρα.



Γράφημα 1.4. Ποσοστιαία κατανομή της έκτασης των ελληνικών θερμοκηπίων σε σχέση με τον τρόπο θέρμανσης (Υπουργείο Γεωργίας, 2003).

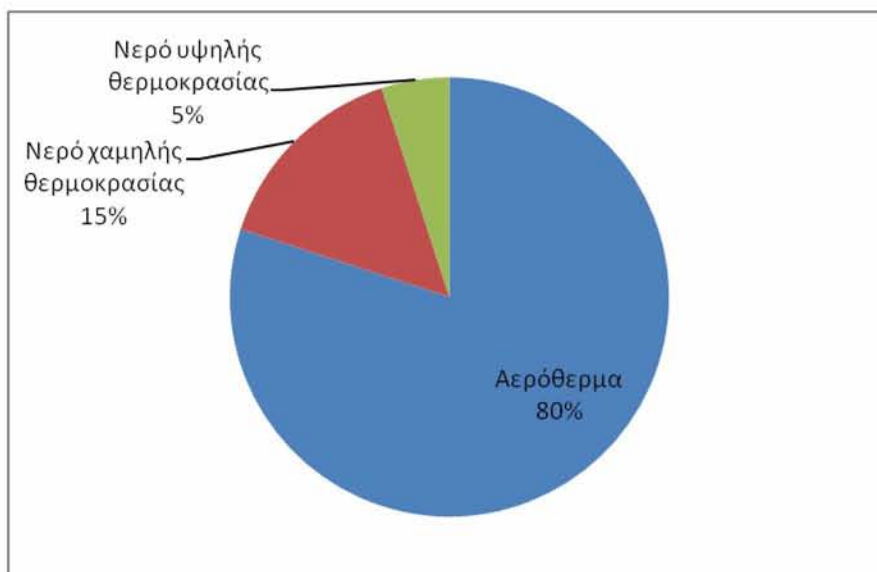
Σχετικά με τη θέρμανση το 1982, το 15% των θερμοκηπίων (υαλόφρακτων και πλαστικών) είχαν τη δυνατότητα έστω και υποτυπώδους θέρμανσης. Το 2003, αντίστοιχα, το ποσοστό είναι 50%. Θα πρέπει να σημειώσουμε, όμως, ότι μόνο το 26,7% έχει τη δυνατότητα ρύθμισης του περιβάλλοντος στα επιθυμητά επίπεδα ενώ τα υπόλοιπα χρησιμοποιούν τη θέρμανση για αντιπαγετική προστασία ή για τη μείωση της σχετικής υγρασίας.

Υπολογίζεται ότι το 2003, 11.170 στρέμματα ή το 90% του συνόλου των θερμαινόμενων θερμοκηπίων της χώρας θερμαίνονται με μαζούτ ή πετρέλαιο, 990 στρέμματα ή το 8% θερμαίνεται με βιομάζα (κυρίως με πυρήνα ελιάς), 120 στρέμματα ή το 1% με ηλιακή ενέργεια και 120 στρέμματα ή το 1% με γεωθερμική ενέργεια, όπως απεικονίζεται στο επόμενο διάγραμμα:



Γράφημα 1.5. Ποσοστιαία σχηματική παράσταση της έκτασης των θερμαινόμενων θερμοκηπίων σε σχέση με το καύσιμο που χρησιμοποιείται (Υπουργείο Γεωργίας, 2003).

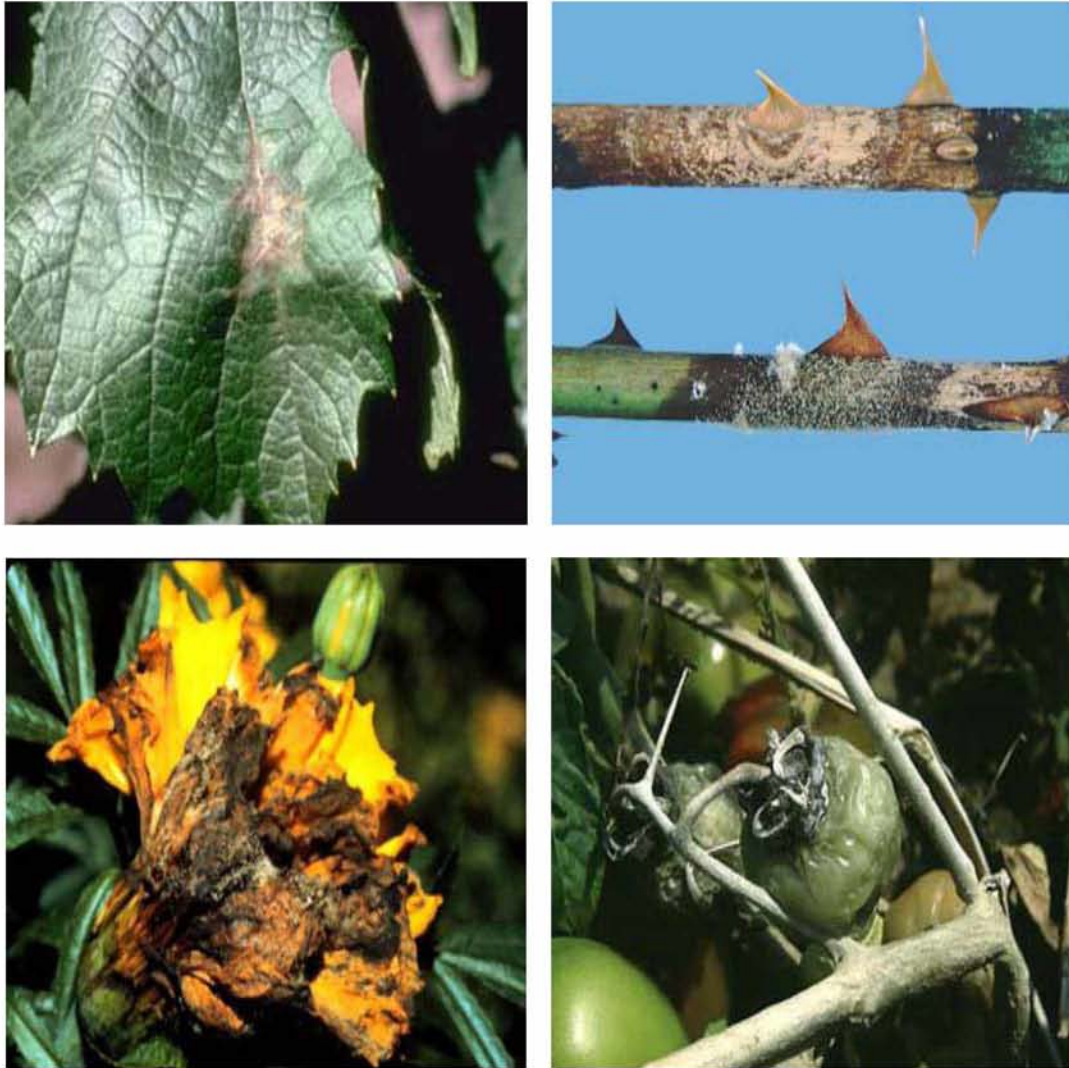
Στο 80% των θερμοκηπίων που θερμαίνονται με μαζούτ ή πετρέλαιο, για την κατανομή της θερμότητας μέσα στο εσωτερικό τους χρησιμοποιείται το αερόθερμο, στο 5% χρησιμοποιείται κεντρικό σύστημα θέρμανσης με νερό 85°C που κυκλοφορεί σε μεταλλικούς σωλήνες και στο 15% χρησιμοποιείται κεντρικό σύστημα θέρμανσης με ζεστό νερό 45°C που κυκλοφορεί σε πλαστικούς σωλήνες.



Γράφημα 1.6. Ποσοστιαία σχηματική παράσταση των διάφορων συστημάτων θέρμανσης που χρησιμοποιούνται στα θερμαινόμενα θερμοκήπια (Υπουργείο Γεωργίας, 2003).

1.6. Ρύθμιση της υψηλής σχετικής υγρασίας

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα των θερμοκηπίων, κατά τη διάρκεια του χειμώνα, είναι η διαχείριση της υγρασίας στο εσωτερικό τους και κυρίως η μείωση των υψηλών επιπέδων υγρασίας. Το πρόβλημα έγινε ιδιαίτερα έντονο από το 1980, όταν λόγω της ενεργειακής κρίσης υιοθετήθηκαν τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας (θερμοκουρτίνες εξοικονόμησης ενέργειας, διπλή κάλυψη της οροφής, μόνωση βορινής πλευράς) που οδήγησαν σε αύξηση της υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου. Αυτό συμβαίνει διότι, λόγω της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας, δημιουργείται στο εσωτερικό των θερμοκηπίων μία συνεχής ροή υδρατμών, που κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι μικρή αλλά όχι μηδενική, αφού για την κανονική λειτουργία του φυτού πρέπει να εξασφαλίζεται ένας ελάχιστος ρυθμός εξατμισοδιαπνοής της τάξης των 10 W/m^2 ή 0.015 mm/h . Οι παραγόμενοι υδρατμοί, αν δε διοχετευθούν προς το περιβάλλον με τον αερισμό του θερμοκηπίου, θα υγροποιηθούν στην επιφάνεια των φύλλων ή του τοιχώματος, κάτι που ευνοεί την ανάπτυξη κρυπτογαμικών ασθενειών και ιδιαίτερα της φαιάς σήψης, που προκαλείται από το μύκητα *Botrytis cinerea*.



Εικόνα 1.2. Προσβολή διαφόρων μερών θερμοκηπιακών καλλιεργειών από το μύκητα Botrytis cinerea. Από αριστερά προς δεξιά: προσβολή σε φύλλο, σε μίσχο, σε άνθος και σε καρπό (Μπαρτζάνας, 2004).

Η ύπαρξη αυξημένης υγρασίας οδηγεί στη δημιουργία συμπυκνώσεων στην επιφάνεια των φύλλων και στο εσωτερικό του καλύμματος του θερμοκηπίου με αποτέλεσμα οι μύκητες να βρίσκουν πρόσφορο έδαφος και να αναπτύσσονται ταχύτατα.

Μερικές ακόμη συνήθεις μυκητολογικές ασθένειες στο εσωτερικό των θερμοκηπίων είναι ο περονόσπορος (*Phytophthora infestans*), το ωίδιο (*Leveillula taurica*-τομάτα) και η κλαδοσπορίωση (*Fulvia fulva*-τομάτα).

Το πρόβλημα της πολύ υψηλής σχετικής υγρασίας παρουσιάζεται κυρίως τη νύχτα. Στα μη θερμαινόμενα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της νύχτας και τις πρωινές ώρες η υψηλή σχετική υγρασία που επικρατεί δημιουργεί πολύ δυσμενείς συνθήκες για την παραγωγή των κηπευτικών φυτών, καθώς και των περισσότερων δρεπτών ανθέων. Η αποτελεσματική ρύθμιση της σχετικής υγρασίας βελτιώνει σημαντικά την υγιεινή κατάσταση των φυτών στο θερμοκήπιο και μειώνει σημαντικά την χρήση χημικών ουσιών για φυτοπροστασία. Οι συνθήκες που ευνοούν την υπερβολική υγρασία ενεργούν ταυτόχρονα μέσα στο θερμοκήπιο. Κατά την διάρκεια της νύχτας, οπότε ψύχεται ο αέρας, η σχετική υγρασία αυξάνεται και επειδή δεν υπάρχει σημαντικός εξαερισμός (τα παράθυρα κατά την νύχτα είναι κλειστά), η σχετική υγρασία στο χώρο του θερμοκηπίου αυξάνεται συνεχώς, παρόλο που η διαπνοή τη νύχτα προσθέτει ελάχιστη μόνο υγρασία στο χώρο του θερμοκηπίου, συγκριτικά με την μέρα.

Οι γενικοί κανόνες μείωσης της σχετικής υγρασίας είναι :

- 1) Κατά τη διάρκεια του χειμώνα θα πρέπει το νερό να χρησιμοποιείται με φειδώ, ώστε να μην υπάρχει υπερβολική υγρασία στην επιφάνεια του εδάφους ή στην επιφάνεια των φυτών.
- 2) Να μη γίνεται ψεκασμός του εδάφους ή των φυτών τις ώρες που η εξωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλή. Γενικά, καλό είναι (ιδιαίτερα στα μη θερμαινόμενα θερμοκήπια) να μη γίνονται το χειμώνα ψεκασμοί το βράδυ, διότι τη νύχτα η σχετική υγρασία θα αυξηθεί υπερβολικά.
- 3) Να γίνεται εξαερισμός, όταν επικρατεί πολύ υψηλή σχετική υγρασία μέσα στο θερμοκήπιο. Στα θερμαινόμενα θερμοκήπια, ακόμα και με κρύο καιρό, όταν η σχετική υγρασία είναι υπερβολικά υψηλή μέσα στο θερμοκήπιο, είναι αναγκαίο να ανοιχτούν λίγο τα παράθυρα για μικρό χρονικό διάστημα. Έτσι θα βγει ο υγρός αέρας και θα αντικατασταθεί με τον εξωτερικό που λόγω της χαμηλότερης του θερμοκρασίας έχει μικρότερη απόλυτη υγρασία. Όταν ο εξωτερικός αέρας ανακατευτεί με το θερμότερο εσωτερικό, θα αυξήσει τη χωρητικότητά του σε υδρατμούς και θα μειωθεί στο σύνολο η σχετική υγρασία, έστω κι αν χαθεί ένα ποσό θερμότητας, που όμως θα συμπληρώσει το σύστημα θέρμανσης.

Προκειμένου να μειωθούν τα υψηλά επίπεδα σχετικής υγρασίας συνίσταται η αφύγρανση των θερμοκηπίων με μία ή συνδυασμό των παρακάτω μεθόδων:

- α) χρήση υγροσκοπικών υλικών
- β) συμπύκνωση πάνω σε μία κρύα επιφάνεια, με τη χρήση συνήθως μιας αντλίας θερμότητας
- γ) εξαναγκασμένη εναλλαγή του αέρα του θερμοκηπίου, με τη χρήση εναλλάκτη θερμότητας
- δ) συνδυασμένη χρήση των συστημάτων θέρμανσης και αερισμού (Μανωλαράκη, 2008).

Στόχος της σημερινής παραγωγής θερμοκηπιακών προϊόντων δεν είναι τόσο η αύξηση της παραγωγής, όσο η παραγωγή ποιοτικών προϊόντων με ταυτόχρονη μείωση όλων των εισροών (ενεργειακών και χημικών). Αν το κλίμα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου μπορούσε να ελεγχθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε μια πιο ομοιόμορφη κατανομή των κλιματικών παραμέτρων του, τότε εκτός από την εξοικονόμηση ενέργειας θα μειωνόταν και η ένταση προσβολής από εχθρούς και ασθένειες επιτρέποντας έτσι μια πιο φιλική προς το περιβάλλον αντιμετώπισή τους (χρήση φυσικών εχθρών).

1.7. Μελέτη της χρήσης προσομοιωμάτων

Τα θερμοκήπια βρίσκονται κατανεμημένα σε όλο τον κόσμο, σε πληθώρα κλιματικών συνθηκών. Ποικίλουν σε σχήμα, μέγεθος, υλικά κάλυψης και διάφορους τύπους εξοπλισμού, έτσι ώστε να ξεπεράσουν τις ακατάλληλες κλιματικές συνθήκες και να καλύψουν τις εξειδικευμένες περιβαλλοντικές απαιτήσεις των διάφορων καλλιεργειών που προμηθεύουν τις απαιτήσεις της αγοράς (Fitz-Rodriguez *et al.*, 2010). Οι κυριότερες περιβαλλοντικές παράμετροι που χρίζουν ελέγχου σε ένα θερμοκήπιο είναι: (1) η θερμοκρασία του αέρα, (2) η περιεκτικότητα του αέρα σε υδρατμούς, (3) η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα και (4) η ηλιακή ακτινοβολία για φωτοσύνθεση (PPF) (von Zabeltitz, 1999).

Το κλίμα του θερμοκηπίου είναι ένα δυναμικό σύστημα, του οποίου οι μεταβλητές είναι άμεσα εξαρτώμενες από τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες και από το σχήμα του θερμοκηπίου, αλλά και από την αλληλεπίδρασή τους μέσω των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Η πρόβλεψη του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου απαιτείται για την παροχή σταθερών περιβαλλοντικών συνθηκών και για μείωση της ενεργειακής δαπάνης, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη διαχείριση της καλλιέργειας (Bakker 2006, Lopez *et al.* 2008). Η εσωτερική θερμοκρασία και σχετική υγρασία του αέρα είναι δύο από τους πιο σημαντικούς παράγοντες του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου και είναι αποτέλεσμα της δυναμικής και συμμετοχής μεταφοράς μάζας και θερμότητας μεταξύ του εσωτερικού αέρα και των διαφόρων στοιχείων του θερμοκηπίου (κατασκευή, καλλιέργεια, έδαφος, κ.ά.) και των εξωτερικών συνθηκών (εξωτερικός αέρας, ηλιακή ακτινοβολία, κ.ά.) (Uchida and Pieters, 2004).

Στις μέρες μας, η παρακολούθηση και τα συστήματα ελέγχου του θερμοκηπίου είναι εξελιγμένα και υψηλής τεχνολογίας, αν και σε γενικές γραμμές δεν έχουν επιτευχθεί η μέγιστη παραγωγή και τα αποτελέσματα σωστής διαχείρισης που είχαν προβλεφθεί με τα συστήματα αυτά (Hashimoto *et al.* 1982, Ceulemans 1985, Day 1998). Τα σημεία αναφοράς της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και άλλων μεταβλητών επιλέγονται ακόμη και τώρα με πρωτόγονο τρόπο και η επιλογή τους βασίζεται κυρίως στη μακροχρόνια εμπειρία του παραγωγού του θερμοκηπίου. Τροφοδοτούνται στο σύστημα ελέγχου, βάσει μόνο μιας μέτρησης ανά κατασκευαστική μονάδα, με αποτέλεσμα το σύστημα ελέγχου του κλίματος του θερμοκηπίου να λειτουργεί σύμφωνα με την υπόθεση της τέλει ανάμειξης του αέρα.

Ωστόσο, με την ανάπτυξη των τεχνολογιών των ηλεκτρονικών υπολογιστών, έχει γίνει δυνατή η παρακολούθηση και ο έλεγχος αρκετών παραμέτρων και η διαχείριση περισσότερων εξελιγμένων στρατηγικών ελέγχου που βασίζονται σε σύγχρονες θεωρίες ελέγχου. Αυτές οι διαδικασίες ελέγχου εξαρτώνται από μαθηματικά προσομοιώματα, που περιγράφουν τις δυναμικές του συστήματος καλλιέργειας-θερμοκηπίου, και ρυθμίζουν τα σημεία αναφοράς των μεταβλητών δυναμικά ώστε να μεγιστοποιηθεί η ανάπτυξη των φυτών σύμφωνα με συγκεκριμένα κριτήρια (Seginer 1993, van Straten *et al.* 2000).

Το εσωτερικό περιβάλλον των θερμοκηπίων έχει προσομοιωθεί με τη βοήθεια της ανάπτυξης διαφόρων μηχανιστικών προσομοιωμάτων (Takakura *et al.* 1971, Kindelan 1980, Pita *et al.* 1998, Kittas *et al.* 2001, Dimokas *et al.* 2008). Τα σύγχρονα μηχανιστικά προσομοιώματα επιτρέπουν την λεπτομερή μελέτη της δυναμικής του κλίματος του θερμοκηπίου. Ωστόσο, η βαθμονόμηση και η επικύρωση τέτοιων προσομοιωμάτων απαιτεί τον πειραματικό προσδιορισμό πολλών παραμέτρων. Για σκοπούς κλιματικού ελέγχου, η εφαρμογή τέτοιων προσομοιωμάτων είναι αρκετά δύσκολη και χρονοβόρα (Udink ten Cate, 1987).

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλά προσομοιώματα τύπου «black box» και «grey box» (Challa 1981, Tantau 1985). Σε αντίθεση με τα μηχανιστικά («white box») προσομοιώματα, τα «black box» προσομοιώματα που βασίζονται σε μια βάση δεδομένων, δεν απαιτούν τον προσδιορισμό πολλών παραμέτρων. Τα «black box» προσομοιώματα ωστόσο δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην λεπτομερή μηχανιστική εξέταση του συστήματος, αλλά μπορούν να φανούν χρήσιμα σε σκοπούς ελέγχου του κλίματος.

Η επανάσταση στη σύγχρονη τεχνολογία πληροφοριών των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχει προωθήσει τη χρήση ανώτερων μαθηματικών τεχνικών ταυτοποίησης (Young 1984, Ljung 1987). Αυτές οι τεχνικές προσομοίωσης εκτιμούν τις άγνωστες παραμέτρους ενός θεωρητικού μαθηματικού προσομοιώματος, βάσει πραγματικών πειραματικών δεδομένων και σε πραγματικό χρόνο μετρήσεων, ως εισερχόμενα και εξερχόμενα (αποτελέσματα) δεδομένα της διαδικασίας. Οι παράμετροι των προσομοιωμάτων μπορούν να υπολογιστούν σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας λειτουργίας του προσομοιώματος, με αποτέλεσμα ένα συνεχώς προσαρμοσμένο προσομοίωμα που να εκτιμά τις δυναμικές και την ποικιλομορφία σε βάθος χρόνου του χαρακτήρα της διαδικασίας αυτής.

1.8. Αντικείμενο και δομή της εργασίας

Η παρούσα διατριβή αποτελεί μια πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της χρήσης αναμεικτών αέρα στην κατανομή της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας σε ένα πλαστικό, τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο. Μέσα από πειραματικές μετρήσεις μελετάται η επίδραση των αναμεικτών αέρα με την

ταυτόχρονη χρήση του συστήματος θέρμανσης στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και στην καλλιέργεια, στην κατανάλωση ενέργειας και στην μείωση των μυκητολογικών ασθενειών. Επίσης, διερευνάται η δημιουργία μαθηματικών προσομοιωμάτων που να εκφράζουν και να εξηγούν τη συμπεριφορά του αέρα όταν ανάβει και όταν σβήνει το σύστημα θέρμανσης.

Μετά τη γενική εισαγωγή που προηγήθηκε, στη συνέχεια (*Κεφάλαιο 2*) γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των συστημάτων και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της υψηλής υγρασίας των θερμοκηπίων, τονίζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους και προσδιορίζεται η αποτελεσματικότητά τους. Έπειτα, αναλύεται η ανάγκη διερεύνησης της κατανομής των κλιματικών παραμέτρων στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

Το ειδικό μέρος της εργασίας ξεκινάει με την αναφορά στην τοποθεσία του πειράματος, την περιγραφή του πειραματικού θερμοκηπίου, των πειραματικών διατάξεων και οργάνων μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν, την περιγραφή των μετρήσεων και μεταχειρίσεων που πραγματοποιήθηκαν καθώς και την περιγραφή της επεξεργασίας τους (*Κεφάλαιο 3*).

Η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων ξεκινάει με την επίδραση του ανεμομίκτη κατά τη λειτουργία διαφόρων συνδυασμών των συστημάτων θέρμανσης στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου (*Κεφάλαιο 4*). Έπειτα παρουσιάζονται τα προσομοιώματα που περιγράφουν τη συμπεριφορά της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας, όταν λειτουργεί το σύστημα θέρμανσης και γίνεται σχολιασμός της ομοιόμορφης κατανομής του μικροκλίματος με βάση τα προσομοιώματα αυτά. Ταυτόχρονα γίνεται αναφορά στη βιβλιογραφία και σύγκριση με αποτελέσματα παρόμοιων ή παραπλήσιων εργασιών.

Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας (*Κεφάλαιο 5*) παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και η θετική ή αρνητική επίδραση των μεταχειρίσεων που μελετήθηκαν.

Κεφάλαιο 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1. Γενικά

Οι παράγοντες του περιβάλλοντος που επηρεάζουν καθοριστικά την ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών στο θερμοκήπιο, μπορεί να χωριστούν σε δυο ομάδες:

A) Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις λειτουργίες του φυτού, που επιτελούνται στο υπέργειο μέρος του και είναι κυρίως η ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η υγρασία και το διοξείδιο του άνθρακα.

B) Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις λειτουργίες του φυτού που επιτελούνται στη ρίζα και είναι κυρίως η θερμοκρασία, το νερό, το οξυγόνο, τα ανόργανα θρεπτικά στοιχεία και το pH (Μαυρογιανόπουλος, 2005).

Η παρουσία ενός πλαστικού, συνήθως, καλύμματος, χαρακτηριστική σε κάθε θερμοκήπιο, προκαλεί αλλαγές στις κλιματικές συνθήκες στο εσωτερικό των θερμοκηπίων σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον. Η ακτινοβολία και η ταχύτητα του αέρα μειώνονται, η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα αυξάνονται και οι διακυμάνσεις των υδροποιήσεων των υδρατμών και της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) είναι πολύ πιο έντονες. Καθεμιά από αυτές τις αλλαγές έχει τη δικιά της επίδραση στην αύξηση, την παραγωγή και την ποιότητα της θερμοκηπιακής καλλιέργειας (Bakker *et al.*, 1995). Στόχος του ελέγχου του περιβάλλοντος μέσα στο θερμοκήπιο είναι η βελτιστοποίηση της παραγωγής της καλλιέργειας. Οι περισσότερες ενέργειες ελέγχου που πραγματοποιούνται στο θερμοκήπιο αφορούν τη θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα, οι μετρήσεις των οποίων πραγματοποιούνται σε αντιπροσωπευτικό ύψος, σε σταθερά σημεία ή σε σημεία κοντά στη καλλιέργεια.

Για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής δεν αρκεί η ρύθμιση καθενός από τους παράγοντες του περιβάλλοντος σ' ένα συγκεκριμένο άριστο σημείο, αλλά απαιτείται η ρύθμιση καθενός σε συνδυασμό με το επίπεδο όλων των άλλων παραγόντων. Στη ρύθμιση της θερμοκρασίας της κόμης κατά τη διάρκεια της ημέρας, π.χ., θα πρέπει να ληφθούν υπόψη η επικρατούσα ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η σχετική υγρασία, η συγκέντρωση του CO_2 , αλλά και η θερμοκρασία εδάφους, η διαθεσιμότητα του νερού στο έδαφος κ.ά., αλλιώς το αποτέλεσμα μπορεί να είναι πολύ δυσμενές για την παραγωγή (Μαυρογιανόπουλος, 2005).

Η ρύθμιση των περιβαλλοντικών παραγόντων που περιβάλλουν τα φυτά στο θερμοκήπιο ορίζεται ως 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 εγκλωβισμένος. 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 (καλλιέργεια, έδαφος, κάλυμμα, σύστημα θέρμανσης). Ο δεύτερος είναι ο μηχανισμός της ακτινοβολίας κατά τον οποίο η μικρού μήκους κύματος 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 τη 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.

Τα φυτά πρέπει να αναπνέουν για να φέρουν εις πέρας τις διαδικασίες αναπνοής, διαπνοής και φωτοσύνθεσης. Τα φυτά του αγρού πραγματοποιούν αυτές λειτουργίες με τη βοήθεια του φυσικού ανέμου. Αλλά κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όταν ένα θερμοκήπιο δεν αερίζεται φυσικά, δεν υπάρχει επαρκής κίνηση του αέρα μεταξύ των φυτών ώστε να επιτραπεί το μέγιστο της ανάπτυξής τους. Επίσης, με τη χρήση διαφόρων συστημάτων κλιματισμού, έχει αποδειχθεί (Bohanon, 1962) ότι στο εσωτερικό του θερμοκηπίου δημιουργούνταν κατά τόπους ζεστές και κρύες «κηλίδες» αέρα, με αποτέλεσμα την ανομοιόμορφη κατανομή του στο χώρο. Έτσι, λοιπόν, έχουν γίνει πολλές μελέτες για τη χρήση συστημάτων ανάδευσης του αέρα του θερμοκηπίου, όπως είναι οι αναμεικτές αέρα.

2.2. Το μικροκλίμα του θερμοκηπίου

2.2.1. Ακτινοβολία

Κατά τη διάρκεια της ημέρας η κύρια πηγή ενέργειας του θερμοκηπίου είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί την πηγή ενέργειας για τη φωτοσύνθεση των φυτών, καθώς και τη φυσική πηγή θερμότητας στο χώρο του θερμοκηπίου. Επηρεάζει δε σημαντικά τη διάρκεια ζωής των διαφανών πλαστικών υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή πολλών θερμοκηπίων.

Όταν όλοι οι παράγοντες που συμμετέχουν στη φωτοσύνθεση, όπως η φωτεινή ακτινοβολία, το διοξείδιο του άνθρακα, η θερμοκρασία, το νερό κ.ά. βρίσκονται στο άριστο επίπεδο, τότε και η φωτοσυνθετική δραστηριότητα (άρα και η ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών) βρίσκεται στο ανώτερο δυνατό επίπεδο. Αν ένας από αυτούς τους παράγοντες μειωθεί, όπως π.χ. η ένταση του φωτισμού, τότε η φωτοσυνθετική δραστηριότητα (και ανάπτυξη των φυτών) μειώνεται. Αν ένας από αυτούς τους παράγοντες αυξηθεί πάνω από το άριστο, επομένως και η ένταση του φωτισμού, πάλι μειώνεται η φωτοσυνθετική δραστηριότητα (στην περίπτωση της υψηλής έντασης φωτισμού, επειδή βλάπτονται οι χλωροπλάστες) (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

Η ποσότητα και η ποιότητα του φωτός που περνάει στο χώρο των φυτών επηρεάζεται πολύ από τις ιδιότητες του διαφανούς υλικού κάλυψης του θερμοκηπίου. Ένα καλής ποιότητας υλικό κάλυψης πρέπει να επιτρέπει να διέλθει μέσα από το υλικό όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ποσότητα από τον προσπίπτοντα σε αυτό φωτισμό και να ευνοεί τη διάχυση του στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, ώστε να υπάρχει ομοιογένεια φωτισμού σε όλο τον καλυπτόμενο χώρο επιπλέον να επιτρέπει από το φυσικό φώς να διέρχονται όλα τα μήκη κύματος τα οποία είναι αναγκαία για την ανάπτυξη των φυτών.

Ο κυριότερος παράγοντας που καθορίζει το θερμικό περιβάλλον του θερμοκηπίου είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Το κάλυμμα απορροφά ένα μικρό μέρος της ακτινοβολίας αυτής, ένα άλλο μέρος ανακλάται, ενώ το υπόλοιπο περνά στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, όπου ένα μέρος του απορροφάται από τις επιφάνειες όπου προσπίπτει (έδαφος, φυτά, σκελετικά υλικά κτλ.) και ένα άλλο αντανακλάται για να ξαναπέσει σε άλλες επιφάνειες ή να βγει εκτός θερμοκηπίου. (Μαυρογιαννόπουλος, 2005). Για τη θέρμανση των θερμοκηπίων προτιμώνται

συστήματα θέρμανσης κοντά στο σημείο ανάπτυξης της καλλιέργεια. Το γεγονός αυτό οδηγεί, γενικά, σε μια αύξηση της ενεργειακής απώλειας από το θερμοκήπιο λόγω της αυξανόμενης θερμικής ανταλλαγής με ακτινοβολία μεταξύ του συστήματος θέρμανσης και της οροφής του θερμοκηπίου (Bot & Van de Braak, 1995).

Όταν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία των επιφανειών μέσα στο θερμοκήπιο αυξάνει περισσότερο από αυτή των αντίστοιχων επιφανειών εκτός του θερμοκηπίου, γιατί ακριβώς ο αέρας γύρω τους είναι σχεδόν ακίνητος, οπότε ο ρυθμός ψύξης τους με συναγωγή είναι συγκριτικά μικρότερος. Άμεση συνέπεια είναι να αυξάνει και η θερμοκρασία του εγκλωβισμένου αέρα του θερμοκηπίου, αφού έρχεται σε επαφή με τις επιφάνειες αυτές. Σε αυτή την αιτία που δημιουργείται από το φαινόμενο του κλειστού χώρου, οφείλεται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό η ανύψωση θερμοκρασίας του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο (Μαυρογιαννόπουλος, 2005). Η ταχύτητα ανάπτυξης σε πολλές καλλιέργειες, πέρα από ένα ευρύ φάσμα των θερμοκρασιών, έχει γραμμική σχέση με τη θερμοκρασία. Συνεπώς η τοπική θέρμανση της καλλιέργειας χρησιμοποιείται για να ενισχύσει την ανάπτυξή της (De Koning 1994, Karlsson *et al.* 1991). Μικρές θερμοκρασιακές διαφορές επηρεάζουν το χρόνο της αρχικής άνθισης σε φυτά τομάτας. Η παρουσία ανεξάρτητων ελεγχόμενων συστημάτων θέρμανσης επιτρέπουν τη τοπική θέρμανση της καλλιέργειας επηρεάζοντας την ανάπτυξη μεμονωμένων οργάνων των φυτών (De Koning, 1994).

Η συμμετοχή των φυτών στο ενεργειακό ισοζύγιο του θερμοκηπίου είναι πολύ σημαντική μέσω της διαπνοής τους. Η διαπνοή των φυτών εξαρτάται κυρίως από το ισοζύγιο ακτινοβολίας (μικρού και μεγάλου μήκους κύματος) και από το έλλειμμα κορεσμού υδρατμών, όπως αυτό καθορίζεται από τις θερμοκρασίες των φύλλων και του αέρα.

Στην κλιματική περιοχή που βρίσκεται η χώρα μας το ευνοϊκό περιβάλλον θερμοκρασιών στο θερμοκήπιο για την ανάπτυξη των διάφορων φυτών δεν είναι πάντα δυνατόν να δημιουργηθεί με μόνη την παθητική λειτουργία του θερμοκηπίου.

Συνήθως είναι απαραίτητη η προσθήκη ενέργειας που σήμερα γίνεται με κατανάλωση συμβατικών καυσίμων.

2.2.2. Σχετική υγρασία

Η διατήρηση ενός κατάλληλου περιβάλλοντος υγρασίας στο χώρο του θερμοκηπίου είναι απαραίτητη όχι μόνο για τη διατήρηση της υδρικής ισορροπίας των φυτών μέσω της διαπνοής, αλλά και για λόγους θρέψεως (πχ. Μεταφοράς ασβεστίου) και για την αποφυγή εκτεταμένης ανάπτυξης παθογόνων μικροοργανισμών, εντόμων και ακάρεων. Μερικά φυτά παράγουν καλύτερα σε υψηλή θερμοκρασία και υψηλή σχετικά υγρασία ημέρας, όπως το αγγούρι, ενώ άλλα σε χαμηλότερη σχετική υγρασία. (Μαυρογιανώπουλος, 2005). Η επιθυμητή υγρασία της ατμόσφαιρας του θερμοκηπίου πρέπει να κυμαίνεται γύρω στο 60-70% (Ολύμπιος, 2001).

Πίνακας 2.1. Άριστα επίπεδα σχετικής υγρασίας για την ανάπτυξη των κορυότερων θερμοκηπιακών καλλιεργειών (Γραφιαδέλλης, 1987; Ντόγρας, 2001)

Καλλιέργεια	Σχ. Υγρασία%	Παρατηρήσεις
Αγγούρι	75 – 80	65 – 70% για την περίοδο της καρποφορίας
Μαρούλι	65 – 80	
Μελιτζάνα	70 – 80	
Πιπεριά	70 – 80	
Τομάτα	60 - 75	70% για τη γονιμοποίηση των ανθέων

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου είναι η αυξημένη υγρασία ειδικά τους χειμερινούς μήνες. Πιο συγκεκριμένα, θερμοκήπια τα οποία έχουν καλή μόνωση έχουν αυξημένη υγρασία τις βραδινές και πρώτες πρωινές ώρες γιατί, ο εξωτερικός αέρας με την χαμηλή υγρασία δεν μπορεί να εισέλθει στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και να ελαττώσει την υγρασία. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι για την ελάττωση της υγρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου είναι η μέθοδος της θέρμανσης και του αερισμού. Το ενεργειακό κόστος για τον έλεγχο της υγρασίας στο περιβάλλον του θερμοκηπίου με αυτές τις δύο μεθόδους κυμαίνεται από 100-200 Mj.m⁻².yr⁻¹ (Baille, 1995).

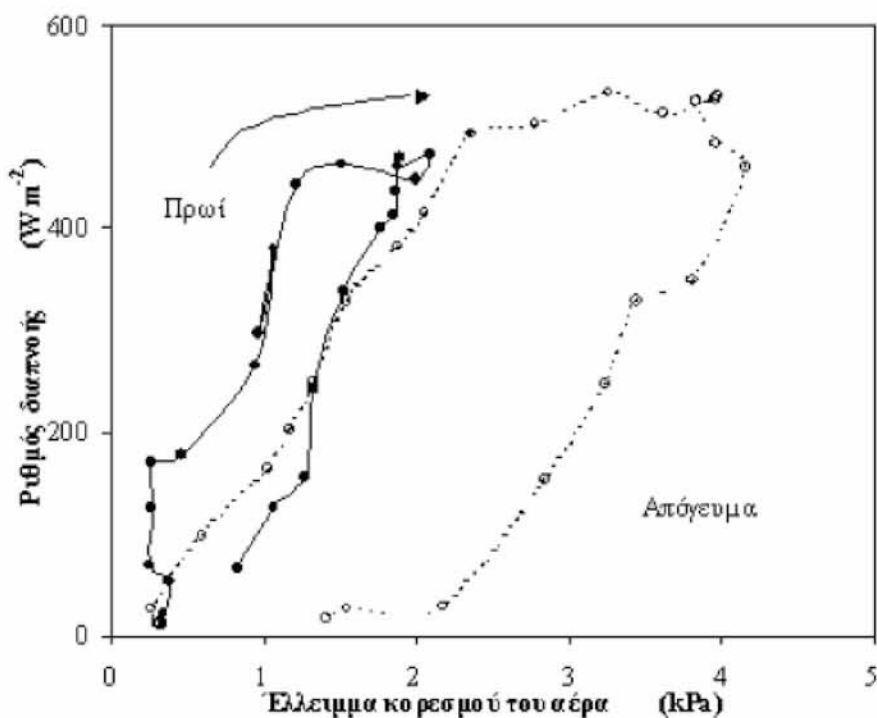
Γενικά, η σχετική υγρασία δημιουργεί επιπτώσεις στις φυσιολογικές λειτουργίες, στην αύξηση και την ανάπτυξη, στην παραγωγή των φυτών και δημιουργεί ευνοϊκούς παράγοντες για ανάπτυξη ασθενειών.

Όπως έχει ήδη αναλυθεί από αρκετούς ερευνητές (Monteith 1973, Stanghellini 1983, Yang *et al.* 1990, Κατσούλας 2002), υπάρχει σημαντική συσχέτιση ανάμεσα στη διαπνοή μιας θερμοκηπιακής καλλιέργειας και στην ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο της καλλιέργειας. Η υγρασία του αέρα επηρεάζει, σε μικρότερο βαθμό αλλά εξίσου σημαντικά, τη διαπνοή μιας καλλιέργειας. Οι Lake *et al.* (1966) διαπίστωσαν πως ακόμη και η υγρασία του εξωτερικού αέρα επιδρά στη διαπνοή. Οι Okuya & Okuya (1988) συσχέτισαν τη διαπνοή μιας θερμοκηπιακής καλλιέργειας τομάτας με την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Οι Jolliet & Bailey (1992) επιβεβαίωσαν την παραπάνω συσχέτιση για καλλιέργεια τομάτας και πάλι.

Καθώς το έλλειμμα κορεσμού του αέρα συσχετίζεται από μόνο του με την ηλιακή ακτινοβολία, στις περισσότερες περιπτώσεις, η ηλιακή ακτινοβολία από μόνη της είναι αρκετή για να ερμηνεύσει οποιαδήποτε μεταβολή της διαπνοής, «κρύβοντας» έτσι την επίδραση του ελλείμματος κορεσμού. Εντούτοις, το έλλειμμα κορεσμού του αέρα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στις περιπτώσεις εκείνες, στις οποίες λειτουργεί κάποιο σύστημα θέρμανσης ή σύστημα δροσισμού στο εσωτερικό του θερμοκηπίου (Μπαρτζάνας, 2004).

Ο Cockshull *et al.* (1987) μέτρησαν τη νυχτερινή διαπνοή σε καλλιέργεια τομάτας για δύο διαφορετικές περιεκτικότητες του αέρα σε υγρασία. Η διαπνοή της καλλιέργειας ήταν $3 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ σε πολύ υγρό περιβάλλον (95% σχετική υγρασία), ενώ αυξανόταν περίπου στο διπλάσιο $5.4 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ σε πιο ξηρό περιβάλλον (61% σχετική υγρασία). Παρόμοια ήταν και τα αποτελέσματα του Van de Sanden (1985), σε καλλιέργεια αγγουριού ο οποίος παρατήρησε επίσης μια αύξηση της διαπνοής με την ελάττωση της περιεκτικότητας του αέρα σε υγρασία. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η ημερησία πορεία της διαπνοής καλλιέργειας τριαντάφυλλου για δύο διαφορετικές περιεκτικότητες του αέρα σε υγρασία (Κατσούλας 2002). Στη μία περίπτωση λειτουργούσε σύστημα υδρονέφωσης, στο θερμοκήπιο αυξάνοντας έτσι την περιεκτικότητα του αέρα σε υγρασία, ενώ στην άλλη όχι.

Από το σχήμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η διαπνοή ήταν μικρότερη όταν λειτουργούσε το σύστημα δροσισμού, αλλά η διαφορά ήταν σχετικά μικρή, φθάνοντας περίπου το 10 έως 15% σε ημερήσια βάση, με τις μεγαλύτερες διαφορές να παρουσιάζονται τις πρωινές ώρες.



Γράφημα 2.1. Επίδραση της περιεκτικότητας του αέρα σε υγρασία στην διαπνοή (Κατσούλας, 2002) ■ με υδρονέφωση, □ χωρίς υδρονέφωση.

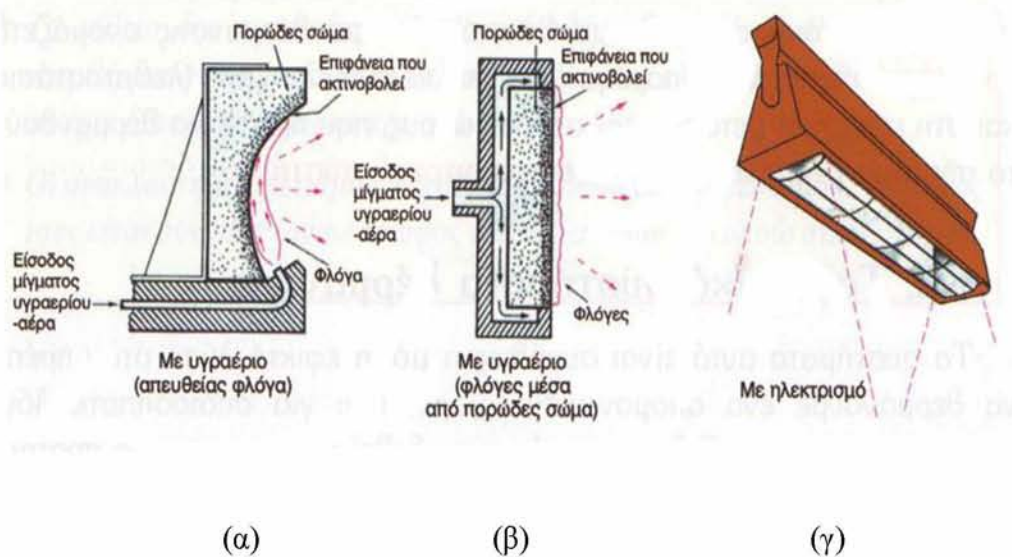
Τα φυτά δείχνουν γενικά μια θετική απόκριση στο ρυθμό φωτοσύνθεσης με τη μεταβολή της υγρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, αφού η όλη διαδικασία συνδέεται με τη λειτουργία των στομάτων. Η επίδραση δηλαδή της υγρασίας στη φωτοσύνθεση είναι μάλλον έμμεση μέσω της επίδρασης που θα έχει η υγρασία στη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας. Καθώς το έλλειμμα κορεσμού του αέρα αυξάνεται (η σχετική υγρασία του αέρα μειώνεται), τα στομάτια του φυτού προοδευτικά κλείνουν (η στοματική αγωγιμότητα ελαττώνεται) προσπαθώντας να περιορίσουν την υδατική καταπόνηση (stress). Καθώς τα στομάτια είναι τα όργανα του φυτού μέσω των οποίων γίνονται οι ανταλλαγές νερού και διοξειδίου του άνθρακα με την ατμόσφαιρα, η φωτοσυνθετική ικανότητα του φυτού ελαττώνεται. Η απόκριση των στομάτων στην υγρασία έχει παρατηρηθεί για τα περισσότερα καλλιεργήσιμα είδη (Kaufmann 1982, Schulze 1986, Munro 1989) και ο ρόλος τους στον έλεγχο του ρυθμού της φωτοσύνθεσης έχει επιβεβαιωθεί για διάφορα

καλλιεργήσιμα είδη, όπως τομάτες (Acock *et al.*, 1976) και πιπεριές (Hall & Milthorpe, 1978).

2.3. Συστήματα θέρμανσης

Γενικότερα, τα συστήματα κεντρικής θέρμανσης θερμοκηπίων με την κυκλοφορία ζεστού νερού είναι αξιόπιστα, ρυθμίζονται αυτόματα, δεν αφήνουν καυσαέρια στο χώρο ανάπτυξης των φυτών και δίνουν μεγάλα ποσά θερμότητας. 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 στο εσωτερικό του. Γι' αυτό, σήμερα είναι τα πλέον διαδεδομένα συστήματα θέρμανσης των σύγχρονων θερμοκηπίων. Παρουσιάζουν, όμως, το μειονέκτημα της μεγάλης θερμικής αδράνειας σε σχέση με το σύστημα θερμού αέρα καθώς και το υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας τους.

Τα **αερόθερμα** αποτελούνται από τον καυστήρα (καυστήρας μαζούτ, πετρελαίου, αερίου), το χώρο καύσης, το σώμα του αερόθερμου μέσα στο οποίο κυκλοφορεί ο αέρας, τις σωληνώσεις διανομής του θερμού αέρα, τους σωλήνες καυσαερίων και τη δεξαμενή καυσίμου. Τα πιο απλά είναι τα αερόθερμα που για καύσιμο χρησιμοποιούν το φυσικό αέριο. Το σύστημα θέρμανσης με αερόθερμα είναι πιο απλό και έχει χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης από το σύστημα θέρμανσης με κυκλοφορία ζεστού νερού σε σωλήνες. Με το σύστημα αυτό παρέχεται το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας με αγωγή και ένα πολύ μικρό μέρος με ακτινοβολία. Έχει υψηλή αποδοτικότητα, αυτοματοποιείται εύκολα, έχει γρήγορη ανταπόκριση στην ενέργεια του ελέγχου, δηλαδή δεν παρουσιάζει αδράνεια στη 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.



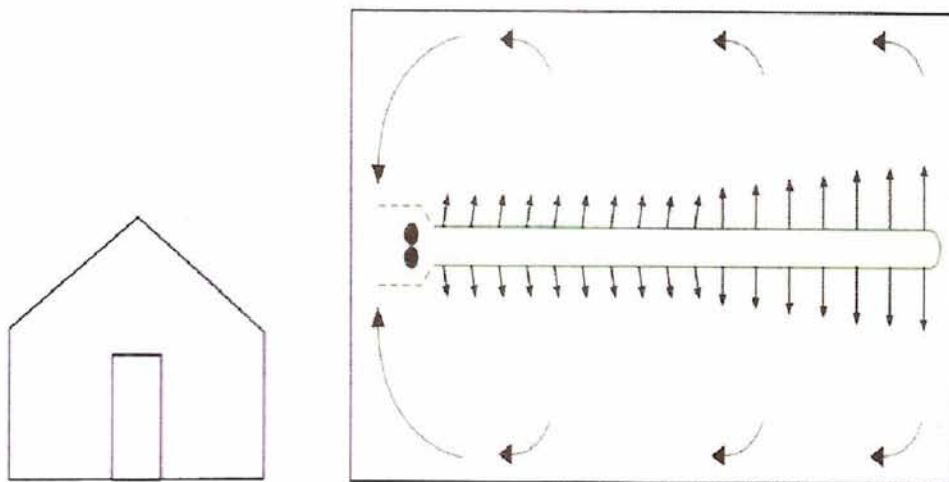
(δ)

Εικόνα 2.1. Διαφορετικά είδη αερόθερμων: (α) με απευθείας φλόγα, (β) με φλόγες μέσα από πορώδες σώμα (γ) με ηλεκτρισμό και (δ) ζεστού νερού (<http://www.ekk.aua.gr/seminar/seminar09.pdf>)

Το αερόθερμο, όπως αναφέρθηκε, αποτελείται από έναν εναλλάκτη θερμότητας και έναν ανεμιστήρα. Ο ανεμιστήρας απορροφά τον κρύο αέρα από το χώρο του θερμοκηπίου, τον περνά από τον εναλλάκτη θερμότητας όπου ο αέρας θερμαίνεται και στη συνέχεια κατευθύνεται προς το χώρο που βρίσκονται τα φυτά. Η θερμοκρασία του αέρα που εξέρχεται από το αερόθερμο πρέπει να κυμαίνεται από 35-45°C, έτσι ώστε όταν μεταβιβάζεται πάνω από τα φυτά, να μην τους προκαλεί ζημιές.

Για να υπάρχει αποτελεσματική θέρμανση και καλή ανακύκλωση του αέρα στο θερμοκήπιο, θα πρέπει ο αέρας του θερμοκηπίου να διέρχεται 7 φορές την ώρα από το αερόθερμο. Η ταχύτητα του αέρα που εξέρχεται από το αερόθερμο είναι περιορισμένη και κυμαίνεται από 5 έως 20 m/s. Αν η ταχύτητα του αέρα είναι χαμηλή τότε ο ζεστός αέρας δε διασκορπίζεται σε όλο το χώρο που βρίσκονται τα φυτά, με αποτέλεσμα να μην έχουμε καλή κατανομή της θερμοκρασίας μέσα στο θερμοκήπιο.

Για καλύτερη κατανομή του ζεστού αέρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αερόθερμα που διανέμουν τον αέρα με τη βοήθεια διάτρητων πλαστικών αγωγών. Το σύστημα αυτό αποτελείται από το αερόθερμο και από έναν ή περισσότερους αγωγούς με διάμετρο 60-120 εκ., οι οποίοι είτε κρέμονται από την οροφή του θερμοκηπίου είτε βρίσκονται στο έδαφος. Για ομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας υπάρχουν οπές στους αγωγούς, με διάμετρο και αποστάσεις μεταξύ τους, που εξαρτώνται από την ισχύ του αερόθερμου.



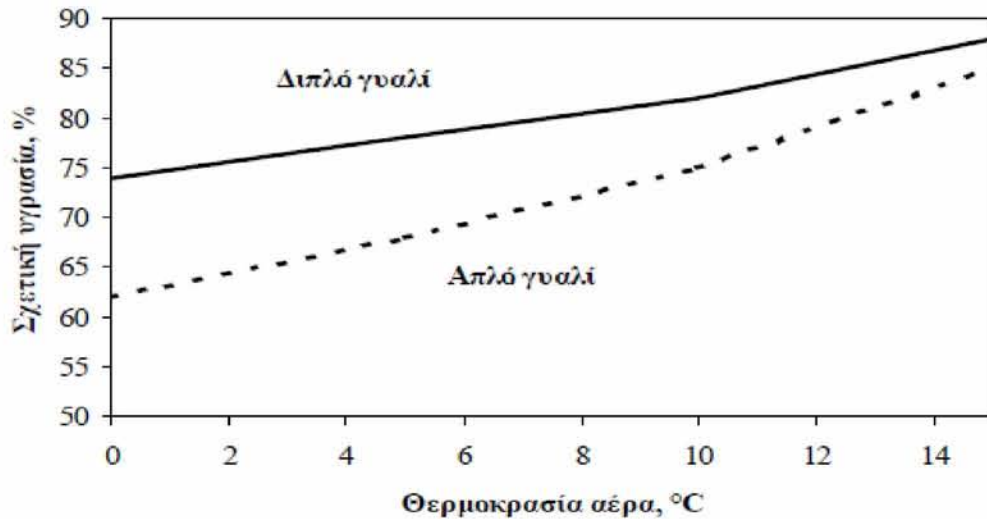
Σχήμα 2.1. Κατανομή του αέρα μέσα σε ένα θερμοκήπιο από διάτρητο σωλήνα με οπές ίσης διαμέτρου, σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους (Μπαρτζάνας, 2004).

Η μέθοδος αφύγρανσης του θερμοκηπίου με τη συνδυασμένη χρήση των συστημάτων θέρμανσης και αερισμού αποτελεί την πιο κλασική μέθοδο αφύγρανσης των θερμοκηπίων και χρησιμοποιείται σήμερα στην πλειονότητα των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων. Η μέθοδος συνίσταται στην αντικατάσταση του

θερμού και υγρού εσωτερικού αέρα με τον εξωτερικό, που είναι πιο ψυχρός και θα έχει συνεπώς και μικρότερη περιεκτικότητα υδρατμών. Όταν ο εξωτερικός αέρας αναμειχθεί με το θερμότερο εσωτερικό θα αυξήσει τη χωρητικότητα του σε υδρατμούς και θα μειωθεί στο σύνολο της η σχετική υγρασία, ακόμα και αν χαθεί μια ποσότητα θερμότητας, αφού αυτή θα αναπληρωθεί από το σύστημα θέρμανσης. Ο εξαερισμός θα πρέπει να γίνεται όταν υπάρχει μια ικανοποιητική διαφορά της υγρασίας μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού αέρα, αφού δεν έχει νόημα να εισάγουμε στο θερμοκήπιο αέρα που να έχει την ίδια υγρασία με τον ήδη υπάρχοντα. Απαραίτητη βέβαια προϋπόθεση αποτελεί το σύστημα θέρμανσης το οποίο θα αναπληρώσει τη χαμένη θερμότητα.

Κατά τη διαδικασία της αφύγρανσης χάνεται μια ποσότητα αισθητής θερμότητας και μια ποσότητα θερμότητας μέσω υδρατμών που απομακρύνονται (λανθάνουσα θερμότητα). Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος της λανθάνουσας θερμότητας προς την αισθητή, τόσο πιο αποδοτικό είναι το σύστημα αφού απομακρύνεται η λανθάνουσα ενέργεια με τη μικρότερη δυνατή απώλεια σε αισθητή, δηλαδή σε θερμότητα (Μανωλαράκη, 2008).

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών και στα πλαίσια των προσπαθειών για εξοικονόμηση ενέργειας, υπήρξε μια τάση στο χώρο των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων για τη κατασκευή θερμοκηπίων με όσο το δυνατόν μικρότερες απώλειες ενέργειας. Έτσι τα θερμοκήπια μονώνονταν καλύτερα και εξοπλίζονταν με θερμοκουρτίνες και διπλό κάλυμμα πλαστικού στην οροφή. Όλες αυτές οι επεμβάσεις μείωσαν τις ενεργειακές απώλειες των θερμοκηπίων, ελαττώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο και την ενέργεια που απαιτούνταν για τη θέρμανσή τους. Παράλληλα όμως αύξησαν και τη σχετική υγρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου με αποτέλεσμα το κόστος αφύγρανσης αυτών των θερμοκηπίων να είναι μεγαλύτερο από αυτό των υπόλοιπων θερμοκηπίων, χωρίς πρόσθετες επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας (Μπαρτζάνας 2004).



Γράφημα 2.2. Επίδραση του διπλού καλύμματος στην υγρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου (Bailey, 1984).

Οι De Halleux & Gauthier (1998), από πείραμα που πραγματοποίησαν, οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι η αφύγρανση με αερισμό ανάλογο των απαιτήσεων σε αφύγρανση αύξησε, σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας χωρίς αφύγρανση, την κατανάλωση ενέργειας κατά 18,4%. Οι van de Braak *et al.* (1988) εκτίμησαν ότι το κόστος για την αφύγρανση μέσω της συνδυασμένης χρήσης των συστημάτων θέρμανσης και αερισμού αντιπροσώπευε το 10% του συνολικού κόστους για τη θέρμανση του θερμοκηπίου, το οποίο μεταφράζεται σε 200 MJ m⁻² yr⁻¹ περίπου. Σε ανάλογη μελέτη για την περιοχή της νότιας Γαλλίας (Boulard *et al.*, 1989) το κόστος αυτό υπολογίστηκε σε 94 MJ m⁻² yr⁻¹ ή 15% των απαιτήσεων σε θέρμανση.

Οι Teitel *et al.* (1999) διεξήγαγαν έρευνα για τη μελέτη της ομοιομορφίας του κλίματος του θερμοκηπίου, με τη χρήση δύο συστημάτων θέρμανσης: (α) σύστημα θέρμανσης με σωλήνες ζεστού νερού και (β) σύστημα θέρμανσης με θερμαινόμενο αέρα (αερόθερμο), διακινούμενο μέσω διάτρητων σωλήνων. Τα αποτελέσματα της έρευνάς τους έδειξαν ότι και με τις δύο μεθόδους θέρμανσης υπήρχαν κυκλικές εναλλαγές στη θερμοκρασία της καλλιέργειας και του αέρα, στη διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ καλλιέργειας και αέρα και στο ποσοστό υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου. Παρατηρήθηκαν λιγότεροι θερμικοί κύκλοι με το σύστημα σωλήνων, παρά με το αερόθερμο, λόγω της σχετικής υψηλής θερμικής αδράνειας του νερού που περικλείεται στους σωλήνες θέρμανσης. Το ποσοστό υγρασίας στο επίπεδο

της καλλιέργειας αυξήθηκε κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και για τα δύο συστήματα, αλλά ο ρυθμός αύξησης και το εύρος ήταν μεγαλύτερα κατά τη λειτουργία του αερόθερμου. Η θερμική μεταφορά μέσω ακτινοβολίας μεταξύ των σωλήνων θέρμανσης και της καλλιέργειας εξακρίβωσε ότι, με τη θέρμανση μέσω σωλήνων, τα φύλλα στο κατώτερο μέρος της καλλιέργειας (όπου ήταν τοποθετημένοι οι σωλήνες), και ειδικά αυτά που ήταν ακριβώς δίπλα στους σωλήνες, ήταν γενικά θερμότερα από τον αέρα και εκείνα στο ανώτερο τμήμα ήταν ψυχρότερα από τον αέρα, κατά τη διάρκεια της θέρμανσης. Με το αερόθερμο, τα φύλλα ήταν ψυχρότερα από τον αέρα και στο ανώτερο αλλά και στο κατώτερο τμήμα της καλλιέργειας, κατά τη διάρκεια των περισσότερων θερμικών κύκλων, γεγονός που καθιστά το αερόθερμο πιθανή αιτία εμφάνισης μυκητολογικών ασθενειών. Επίσης, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων θέρμανσης, όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την επίτευξη ενός συγκεκριμένου επιπέδου θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, εφόσον και τα δύο συστήματα θέρμανσης ήταν τοποθετημένα ανάμεσα από τα φυτά.

Κατά τη σχεδίαση ενός θερμοκηπιακού συστήματος θέρμανσης, θα πρέπει να τεθούν υπόψη πολλές παράμετροι. Για παράδειγμα, η θερμοκρασία στο επίπεδο των φυτών συνιστάται να είναι ομοιόμορφη σε όλο το χώρο του θερμοκηπίου. Επίσης, η θερμοκρασία της καλλιέργειας θα πρέπει να είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία δρόσου, για να αποφευχθεί η συμπύκνωση και κατ' επέκταση να μειωθεί ο κίνδυνος μυκητολογικών ασθενειών. Επίσης, η ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος θέρμανσης θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη. Γενικά, τα θερμοκήπια θερμαίνονται είτε με ζεστό νερό το οποίο κυκλοφορεί μέσα σε σωλήνες, είτε με θερμό αέρα ο οποίος διανέμεται στο χώρο φυσικά ή μέσω διάτρητων πλαστικών σωλήνων. Αν και τα δύο αυτά συστήματα θέρμανσης είναι αρκετά κοινά και διαδεδομένα σε πολλές χώρες, δεν υπάρχουν πολλές πληροφορίες στη βιβλιογραφία για τη σύγκριση της λειτουργίας τους. Κάποιες από τις μελέτες που έγιναν για τα συστήματα θέρμανσης των θερμοκηπίων, αναφέρονται εν συντομία παρακάτω. Η θέση της συσκευής θέρμανσης που βασίζεται σε χαμηλής θερμοκρασίας ροή, έχει ερευνηθεί από τον Poroniski (1986, 1993), ο οποίος συμπέρανε ότι η χαμηλή θέση του συστήματος θέρμανσης έχει σημαντικά πλεονεκτήματα ιδιαιτέρως όταν συνδυάζεται με ροή χαμηλής θερμοκρασίας: μειώνει την ακτινοβολία προς το διαφανές κάλυμμα και την αυξάνει προς το φύλλωμα της καλλιέργειας και έτσι

δημιουργεί μια καλή κίνηση του θερμαινόμενου αέρα στο χώρο των φυτών. Τα μειονεκτήματα της χαμηλής θέσης του συστήματος είναι η ανάγκη για σωλήνες ανθεκτικούς σε χημικές ενώσεις και το γεγονός ότι οι σωλήνες θα πρέπει να μετακινούνται εύκολα για να επιτρέπουν την ευκολία στις καλλιεργητικές φροντίδες. Ο ερευνητής συμπέρανε, σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των Baille *et al.* (1983), ότι η θέση των συστημάτων θέρμανσης κοντά στο έδαφος και ενδιάμεσα της καλλιέργειας διευκολύνει τον καλύτερο έλεγχο του μικροκλίματος και συνεπάγεται την ομοιομορφία της θερμοκρασίας του αέρα και των φύλλων στο επίπεδο της καλλιέργειας. Τεχνικές θέρμανσης έχουν επίσης μελετηθεί από τον Van de Braak (1995), ο οποίος ανέλυσε το συμβατικό σύστημα θέρμανσης στα Ολλανδικά θερμοκήπια, που βασίζεται σε ατσάλινους σωλήνες εσωτερικής διαμέτρου 51 mm. Αυτοί οι σωλήνες τοποθετούνται στο ύψος των υποστρωμάτων, προσκολλημένοι σε εναέριες στύλους και επίσης κοντά στους πλευρικούς τοίχους και χρησιμοποιούνται για να διανείμουν τη θερμότητα σε όλο το χώρο του θερμοκηπίου. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν χρησιμοποιηθεί εναλλακτικές θέσεις, με τους σωλήνες πιο κοντά στα φυτά και τα υποστρώματα, για την παροχή θερμότητας στη ζώνη των ριζών. Ο Van de Braak (1988) υποδεικνύει ότι έχουν χρησιμοποιηθεί πτυχωτοί σωλήνες αλουμινίου από Ολλανδούς παραγωγούς και προσφέρουν τα πλεονεκτήματα του μικρότερου υδάτινου περιεχομένου και της γρηγορότερης απόκρισης του συστήματος σε δραστηριότητες ελέγχου, σε αντίθεση με τους ατσάλινους σωλήνες. Επίσης, ο Van de Braak (1988, 1995) σε έρευνά του έχει περιγράψει διάφορα εναλλακτικά συστήματα θέρμανσης, αναφέροντας ενδεικτικά ότι η θέρμανση με αερόθερμα δεν είναι ευρέως διαδεδομένη στα Ολλανδικά θερμοκήπια. Το κυριότερο πλεονέκτημα των αερόθερμων, όπως σημειώθηκε από την έρευνά του, είναι η γρήγορη απόκρισή του σε δραστηριότητες ελέγχου, ενώ το μειονέκτημά του είναι η επιπλέον κατανάλωση ηλεκτρισμού, η οποία είναι περίπου της τάξεως του 10% της ενέργειας που απαιτείται για θέρμανση.

Η διαθέσιμη έρευνα που έχει γίνει για τα αερόθερμα είναι μικρότερης ευρύτητας, σε σχέση με αυτή που υπάρχει για τα συστήματα με σωλήνες. Οι Meneses & Monteiro (1990) χρησιμοποίησαν γεννήτριες θερμού αέρα μετά από καταστροφή που προκλήθηκε από βαρύ χειμώνα το 1985-1986 στην Πορτογαλία. Ο θερμός αέρας διανέμονταν μέσω δύο διάτρητων σωλήνων πολυαιθυλενίου και η θερμοκρασία του αέρα ήταν αρκετά ομοιόμορφη στην κάθετη και εγκάρσια κατανομή στο χώρο του

θερμοκηπίου, αλλά παρατηρήθηκαν μεγάλες αποκλίσεις στην οριζόντια κατανομή της, η οποία αποδόθηκε στη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα καθώς αυτός έρρεε μέσω του σωλήνα προς τις αλληπάλληλες οπές εκροής. Ο σχεδιασμός διάτρητων σωλήνων χαμηλής πίεσης για την κατανομή θερμού αέρα μελετήθηκε και από τους Bailey (1975) και Wells & Amos (1994). Μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων, μελέτησαν και τον αριθμό των πλαστικών σωλήνων που θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση ενός θερμοκηπίου, τη θέση τους κοντά στην καλλιέργεια, το μήκος και τη διάμετρο των σωλήνων και τον αριθμό, το μέγεθος, το σχήμα και την απόσταση των οπών εκροής.

Οι Bartzanas *et al.* (2005) μελέτησαν την επίδραση δύο συστημάτων θέρμανσης στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και στην κατανάλωση ενέργειας. Το πρώτο σύστημα βασίζονταν σε θέρμανση με πλαστικούς σωλήνες κοντά στο υπόστρωμα των φυτών και το δεύτερο σε αερόθερμο. Επίσης, μελετήθηκε και ο συνδυασμός τους. Η συνδυασμένη χρήση των συστημάτων θέρμανσης έδωσε την υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση, της τάξεως του 19%. Η χρήση του αερόθερμου αύξησε τη διαφορά της πίεσης ατμών και κατά συνέπεια τη διαπνοή των φυτών. Και για τα δύο συστήματα, η θερμοκρασία της καλλιέργειας ήταν χαμηλότερη από αυτή του αέρα, αλλά αυτή η διαφορά ήταν μεγαλύτερη με τη χρήση του αερόθερμου. Οι σωλήνες θέρμανσης μπορούσαν να φτάσουν σε επιθυμητά επίπεδα θερμοκρασίας μόνο όταν η διαφορά εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας ήταν στους 10°C, ενώ αυτή η διαφορά αυξανόταν στους 15°C με την προσθήκη του αερόθερμου. Από τα αποτελέσματα αυτά προέκυψε ότι η καλύτερη μέθοδος θέρμανσης είναι η συνδυασμένη, αν και με μια ελαφρώς μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας.

Οι Manrogianopoulos & Choustoulakis (1993) αναφέρουν σε έρευνά τους την επίδραση δύο συστημάτων θέρμανσης και δύο υλικών κάλυψης στην κατανάλωση ενέργειας και στην παραγωγή καλλιέργειας τομάτας. Η έρευνα αυτή έδειξε ότι ο συντελεστής συνολικών θερμικών απωλειών σε θερμοκήπιο θερμαινόμενο με σωλήνες ζεστού νερού ήταν σημαντικά υψηλότερος από αυτόν σε θερμοκήπιο θερμαινόμενο με θερμό αέρα. Αναφέρουν ότι άλλοι ερευνητές κατέληξαν σε χαμηλότερες τιμές για τον συντελεστή θερμικών απωλειών στην περίπτωση θέρμανσης με σωλήνες και αποδίδουν τις υψηλότερες τιμές τους στο μικρό μέγεθος του θερμοκηπίου που χρησιμοποίησαν και στο γεγονός ότι το μισό του συνολικού μήκους των σωλήνων θέρμανσης ήταν τοποθετημένοι κοντά στους πλευρικούς

τοίχους του θερμοκηπίου. Επίσης, απέδειξαν ότι ένα θερμοκήπιο καλυμμένο με πολυαιθυλένιο είχε υψηλότερη συνολική ενεργειακή κατανάλωση από θερμοκήπιο καλυμμένο με γυαλί, όταν η θέρμανση βασίζονταν σε σωλήνες, αλλά όταν χρησιμοποιούνταν το αερόθερμο, η ενεργειακή κατανάλωση και για τους δύο τύπους θερμοκηπίων ήταν ίση.

Οι επιδράσεις συστημάτων θέρμανσης στο ανώτερο και στο κατώτερο όριο της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου μελετήθηκαν αριθμητικά και επαληθεύτηκαν πειραματικά από τον Ohara (1988), ο οποίος απέδειξε ότι για σύστημα σωλήνων θέρμανσης με ζεστό νερό, το κατώτερο όριο της θερμοκρασίας ήταν χαμηλό και σχεδόν σταθερό, ενώ το ανώτερο όριο αυξανόταν αναλογικά με τη θερμοκρασία του ζεστού νερού του σωλήνα και μειωνόταν όταν αυξανόταν η διαφορά θερμοκρασίας στο εσωτερικό και στο εξωτερικό του θερμοκηπίου. Με το αερόθερμο, το κατώτερο όριο της θερμοκρασίας αυξανόταν και το ανώτερο όριο μειωνόταν, όσο αυξανόταν η διαφορά της θερμοκρασίας στο εσωτερικό και στο εξωτερικό του θερμοκηπίου. Το υψηλότερο κατώτερο όριο της θερμοκρασίας με τη χρήση αερόθερμου απ' ότι με τους σωλήνες θέρμανσης, αποδόθηκε στη γρήγορη έκλυση θερμότητας από το αερόθερμο με τη διακοπή της λειτουργίας του.

Στο πείραμα των Teitel *et al.* (1999) παρατηρήθηκαν αλλαγές στο ποσοστό υγρασίας στο εσωτερικό θερμοκηπίου, θερμαινόμενου με δύο συστήματα θέρμανσης (σωλήνες θέρμανσης και αερόθερμο), κατά τη διάρκεια της νύχτας. Το ποσοστό της υγρασίας αυξάνεται κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης και μειώνεται με τη διακοπή της θέρμανσης, όταν η θερμοκρασία μειώνεται. Έτσι, λοιπόν συμπεραίνεται ότι η ποικιλία στο υδατικό περιεχόμενο του αέρα κατά τη διάρκεια της θέρμανσης οφείλεται κυρίως στις διακυμάνσεις της διαπνοής από την καλλιέργεια. Η αύξηση στο ποσοστό υγρασίας κατά τη διάρκεια της θέρμανσης ήταν υψηλότερη με το αερόθερμο παρά με τους σωλήνες θέρμανσης, προφανώς επειδή με το αερόθερμο η ταχύτητα του ανέμου ανάμεσα στην καλλιέργεια είναι υψηλότερη από τους σωλήνες θέρμανσης. Η υψηλότερη ταχύτητα του ανέμου μειώνει την οριακή αντίσταση της επιφάνειας των φύλλων. Επίσης, συντελεί στις πιο γρήγορες ανανεώσεις του αέρα, από τις οποίες ο υγρός αέρας στην οριακή επιφάνεια αντικαθίσταται από θερμότερο και λιγότερο υγρό αέρα. Ο θερμός αέρας που εισάγεται, αυξάνει τη θερμοκρασία των φύλλων και έτσι την πίεση του υδρατμών στα φύλλα, από τη μία πλευρά και από την άλλη μειώνει την ατμοσφαιρική πίεση στο σημείο αυτό των φύλλων, με αποτέλεσμα

την αύξηση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα. Με τους σωλήνες θέρμανσης, η αύξηση της πίεσης των υδρατμών στα φύλλα που προκλήθηκε από την αύξηση της θερμοκρασίας των φύλλων είναι προφανώς όμοια με αυτή του αερόθερμου, αλλά ο αριθμός των ανανεώσεων στη μονάδα του χρόνου του υγρού αέρα στην οριακή επιφάνεια, με θερμό και λιγότερο υγρό αέρα, είναι μικρότερος από αυτόν του αερόθερμου.

Εναλλαγές στη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία του αέρα κατά τη διάρκεια της νύχτας αναφέρονται και από τους Assaf & Zieslin (1996), οι οποίοι υπέδειξαν ότι αυτή η νυχτερινή διαπνοή σε καλλιέργεια τριαντάφυλλου υπό θέρμανση ίσως επηρεάστηκε από τη θερμική συναγωγή μέσω της καλλιέργειας. Οι Gaafar *et al.* (1990), απέδειξαν ότι η κατανάλωση νερού σε θερμοκήπιο με αερόθερμο ήταν γενικά υψηλότερη από αυτή σε θερμοκήπιο χωρίς θέρμανση. Επίσης, ανέφεραν ότι το υδατικό περιεχόμενο του εδάφους ήταν συνήθως χαμηλότερο σε θερμαινόμενα παρά σε μη θερμαινόμενα θερμοκήπια.

Από μελέτη που έγινε σε δύο συστήματα θέρμανσης συμπεραίνεται ότι η συνδυασμένη λειτουργία επιδαπέδιων σωλήνων και αξονικού αερόθερμου είναι προτιμότερη από τη θέρμανση με επιδαπέδιους σωλήνες μόνο, αφού καταμερίζοντας καλύτερα τη διαθέσιμη ενέργεια ως θερμότητα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου επιτυγχάνεται:

- Η επιθυμητή θερμοκρασία αέρα,
- Μείωση της υγρασίας του αέρα,
- Καλύτερη φυσιολογική λειτουργία της καλλιέργειας
- Μείωση του ρυθμού υγροποιήσεων στην επιφάνεια του καλύμματος.

Βέβαια με αυτό το σύστημα απαιτείται μεγαλύτερη ενέργεια (περίπου 16%) λόγω της ενεργειακής συμπεριφοράς του συνδυασμένου (αερόθερμο και επιδαπέδιοι σωλήνες) και όχι εξ' αιτίας της επιπλέον ενέργειας που δόθηκε (Μπαρτζάνας, 2004).

Ο Bohanon (1962) μελέτησε την επίδραση ενός αναμείκτη αέρα, που συνδυάζει τη λειτουργία του με το σύστημα θέρμανσης του θερμοκηπίου, με σκοπό την βελτίωση του μικροκλίματος για την ανάπτυξη των φυτών. Ο αναμείκτης αέρα παρείχε ανάδευση και καλή κυκλοφορία του αέρα ώστε να παραχθούν πιο ομοιόμορφες

θερμοκρασίες και υγρασίες και επαρκής αερισμός της φυλλικής επιφάνειας των φυτών. Η αναδευτική αυτή κίνηση που δημιουργούνταν από τον αναμείκτη, έκανε διανομή του αέρα από το έδαφος ως την κορυφή του θερμοκηπίου, περιορίζοντας τις ζεστές και κρύες «κηλίδες» που δημιουργούνταν κατά τόπους στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Συνεπώς, το σύστημα θέρμανσης ήταν πολύ πιο αποτελεσματικό και αποδοτικό. Ο κινούμενος αέρας που παραγόταν από τον αναμείκτη περιορίσει την περισσή υγρασία στο επίπεδο της καλλιέργειας, και η φυσική υγρασία που παραγόταν από τα φυτά και το έδαφος ανακατευόταν με αέρα μικρότερης υγρασίας που βρισκόταν πάνω από την καλλιέργεια, με αποτέλεσμα την ομοιόμορφη υγρασία σε όλο το θερμοκήπιο.

2.4. Συστήματα αερισμού

Ο αερισμός του θερμοκηπίου μπορεί να είναι είτε φυσικός, που προκαλείται από τις δυνάμεις ανέμου και άνωσης, είτε μηχανικός, με τη χρήση ανεμιστήρων. Τις περισσότερες φορές δίνεται έμφαση στον φυσικό αερισμό, ο οποίος αποτελεί την πιο ενεργειακά αποτελεσματική μέθοδο και ο οποίος παρέχει τις πιο ομοιόμορφες συνθήκες (Boulard & Draoui 1995, Papadakis *et al.* 1996).

Ο φυσικός αερισμός συνήθως επιτυγχάνεται με εναλλαγές του αέρα μέσω ελεγχόμενων πλαϊνών ή/και ανοιγμάτων οροφής. Εξαρτάται άμεσα από παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά του ανέμου, τις διαφορές στη θερμοκρασία του αέρα μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού χώρου του θερμοκηπίου όπως και από την παρουσία καλλιεργούμενων φυτών. Έτσι, η διαχείριση του κλίματος του θερμοκηπίου μέσω φυσικού αερισμού περιέχει πολυάριθμες παραμέτρους, με αποτέλεσμα να αποτελεί πρόκληση για τους ερευνητές και να είναι ο λόγος για τον οποίο η πρόβλεψη της ροής εναλλαγών αέρα και της ανάδευσης του αέρα είναι πολύ αβέβαια ακόμη και σήμερα.

Οι Kittas *et al.* (2005) χρησιμοποίησαν μηχανικό αερισμό μέσω ενός ανεμιστήρα σε πολλαπλό τοξωτό θερμοκήπιο, για να μελετήσουν τις μεταβλητές που επιδρούν στην θερμοκρασία του αέρα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η διαφορά μεταξύ της εσωτερικής και της εξωτερικής θερμοκρασίας του αέρα ήταν άμεσα συνδεδεμένη με τον ρυθμό αερισμού και την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία. Αυτή η διαπίστωση επέτρεψε την πρόταση ενός απλοποιημένου προσομοιώματος για το ενεργειακό

ισοζύγιο του θερμοκηπίου και τελικά μιας εξίσωσης που συσχετίζει την εσωτερική θερμοκρασία του θερμοκηπίου με τις εξωτερικές κλιματικές μεταβλητές. Η επαλήθευση του προσομοιώματος έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα και έδειξε ότι θα μπορούσε να συμπεριληφθεί σε αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του κλίματος του θερμοκηπίου και επίσης, ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως λειτουργικό εργαλείο για πιο ακριβείς εκτιμήσεις των αναγκών αερισμού.

Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει μια τάση να κατασκευάζονται μεγάλα πολλαπλά τοξωτά θερμοκήπια, κυρίως για οικονομικούς λόγους. Στα θερμοκήπια αυτά, τα πλαϊνά ανοίγματα στους τοίχους τους, δεν παρέχουν αρκετό αερισμό, με αποτέλεσμα την αλλαγή σε αερισμό μέσω ανοιγμάτων οροφής ή συνδυασμό αυτών των δύο. Επίσης, έχει γίνει κοινή πρακτική η χρήση προστατευτικών υλικών για ανθεκτικότητα στα έντομα που καλύπτουν αυτά τα ανοίγματα. Έτσι, τα προστατευτικά αυτά, που λειτουργούν ως μηχανικά εμπόδια για τα έντομα, μειώνουν σημαντικά τη ροή του αέρα και δημιουργούν την ανάγκη για μεγαλύτερα ανοίγματα. Για την καλύτερη κατανόηση του φυσικού αερισμού, οι επιστήμονες χρησιμοποίησαν πειραματικές μεθόδους και αριθμητικές προσομοιώσεις. Έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές μέθοδοι για τη μέτρηση του ρυθμού αερισμού: έμμεσες μέθοδοι όπως με ανιχνευτικά αέρια (Morris & Neal 1954, Whittle & Lawrence 1960, Okada & Takakura 1973, Bot 1983, Boulard & Draoui 1995, Kittas *et al.* 1995) και τεχνικές ισοζυγίου ενέργειας (Kozai & Sase, 1978; Fernandez and Bailey, 1992), και άμεσες μέθοδοι όπως τεχνικές διαφοράς πίεσης (Boulard *et al.*, 1998a). Ωστόσο, αυτές οι μελέτες δεν επιτρέπουν την ξεκάθαρη εξακρίβωση των στοιχείων της ενέργειας (αισθητής και λανθάνουσας) που ανταλλάσσεται μέσω των παραθύρων. Επίσης, δεν δίνουν πολλές πληροφορίες για τα πρότυπα ροής του αέρα στο επίπεδο της καλλιέργειας και μέσω των ανοιγμάτων. Σε ένα πολύ μεγάλο θερμοκήπιο, ίσως είναι αρκετό να γνωρίζει κανείς τη συνολική ροή του αέρα στο εσωτερικό του, για να υπολογίσει τις μέσες τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας του. Ωστόσο, είναι δεδομένο ότι οι ομοιογενείς συνθήκες δεν αντιπροσωπεύουν επαρκώς τις πραγματικές συνθήκες ενός θερμοκηπίου τέτοιας κλίμακας. Στην πραγματικότητα, η χωρική ετερογένεια της ταχύτητας του ανέμου και του κλίματος μέσα σε ένα μεγάλο θερμοκήπιο έχει συνέπειες στην δραστηριότητα των φυτών και επηρεάζει πάρα πολύ τη συμπεριφορά της καλλιέργειας.

Εφόσον η τοπική ταχύτητα του ανέμου κοντά στα φύλλα των φυτών επηρεάζει τη μεταφορά θερμότητας και μάζας από το φυτό προς τον αέρα του θερμοκηπίου και αντιστρόφως, είναι πολύ σημαντικό να καθοριστούν τα πρότυπα ροής και οι

ταχύτητες του ανέμου ανάμεσα στα φυτά. Επιπλέον, η κατάσταση γίνεται πιο περίπλοκη όταν ο αερισμός είναι καθοδηγούμενος από το συνδυασμό άνωσης και έντασης του ανέμου. Πρόσφατα, έχει γίνει κάποια πρόοδος στην προσομοίωση ροής με τη χρήση της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics, CFDs), που διευκολύνει την ανάλυση μονοδιάστατων (θερμοκρασία και υγρασία) και διανυσματικών (ταχύτητα και ροή θερμότητας και μάζας) μεγεθών (Mistriotis *et al.* 1997a,b, Boulard *et al.* 1998b, 1999, Kacira *et al.* 1998, Lee & Short 1998, 2001, Lee *et al.* 2000, Lamrani *et al.* 2001, Reichrath & Davies 2001).

Επιπλέον, νέες τεχνικές βασισμένες στην ηχητική ανεμομετρία και αυτή με τη χρήση λέιζερ Doppler, που επιτρέπουν τις μετρήσεις της στιγμιαίας ταχύτητας του ανέμου και της θερμικής ροής, έχουν εφαρμοσθεί για την ακριβή επίλυση των προτύπων ροής σε φυσικά αεριζόμενα θερμοκήπια (Boulard *et al.* 1996, 1997, 1998b, 1999, Haxaire *et al.* 2000, Lamrani *et al.* 2001, Wang & Deltour 1999a,b, Wang *et al.* 1999). Άλλες μέθοδοι, όπως η δημιουργία εικόνας της ροής, έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί κυρίως σε μικρής κλίμακας θερμοκήπια (Montero *et al.* 2001, Lee *et al.* 2000, Oca *et al.* 1999).

Πρόσφατα, οι Bartzanas *et al.* (2002) χαρακτήρισαν και προσομοίωσαν αριθμητικά τις επιδράσεις των υλικών εντομοστεγανότητας στον αερισμό και στο εσωτερικό κλίμα θερμοκηπίου τύπου τούνελ.

Έχουν μελετηθεί με λεπτομέρεια και έχουν προσομοιωθεί μέσω των CFDs οι επιδράσεις των υλικών εντομοστεγανότητας στα ανοίγματα αερισμού σε Ισπανικά θερμοκήπια τύπου «Parral» και σε Μαροκινά θερμοκήπια τύπου «Canary». Οι Campen & Bot (2003) και Molina-Aiz *et al.* (2004) ανέλυσαν την επίδραση της ταχύτητας του ανέμου σε ανοίγματα φυσικού αερισμού σε θερμοκήπια τύπου «Parral» εξοπλισμένα με υλικά εντομοστεγανότητας στην οροφή και πλαϊνά παράθυρα, χρησιμοποιώντας τρισδιάστατο και δισδιάστατο CFD προσομοίωμα, αντίστοιχα. Και στις δύο μελέτες, τα χαρακτηριστικά του αερισμού που είναι άμεσα εξαρτώμενα από το θερμοκήπιο, η επίδραση της κατεύθυνσης του ανέμου στο ρυθμό αερισμού και η γεωμετρία των ανοιγμάτων υπολογίστηκαν αριθμητικά.

Για ένα εμπορικό θερμοκήπιο τύπου «Canary» 0.5 ha, εξοπλισμένο με υλικά εντομοστεγανότητας στα πλαϊνά ανοίγματα και στα ανοίγματα οροφής, οι Fatnassi *et al.* (2003, 2006) χαρακτήρισαν το εσωτερικό κλίμα και τις εναλλαγές του αέρα μέσω μετρήσεων με ανιχνευτικό αέριο και στη συνέχεια χρησιμοποίησαν αυτά τα δεδομένα για την ταυτοποίηση ενός τρισδιάστατου προσομοιώματος ένα εμπορικό CFD πακέτο

λογισμικού (CFD2000). Επίσης, οι Majdoubi *et al.* (2009) σε μελέτη τους παρουσίασαν την ανάλυση της κυκλοφορίας του αέρα της κατανομής του μικροκλίματος, κατά τη διάρκεια της ημέρας, σε θερμοκήπιο 1 ha τύπου «Canary». Δημιούργησαν CFD προσομοίωμα για τη δυναμική του αέρα μέσω των υλικών εντομοστεγανότητας, την κατανομή του στο χώρο και τη μεταφορά θερμότητας και μάζας.

2.5. Κλιματικά Προσομοιώματα θερμοκηπίων

Αρκετή από την έρευνα, όσον αφορά στο περιβάλλον του θερμοκηπίου, εστιάζεται στον έλεγχο αυτού. Η ανάπτυξη των φυτών εξαρτάται από μια πληθώρα μεταβλητών, όπως τη θερμοκρασία, την υγρασία, τη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και την ηλιακή ακτινοβολία που δρα άμεσα στην φωτοσύνθεση. Είναι πολύ σημαντική, λοιπόν, η γνώση της επίδρασης των μεταβλητών αυτών στην καλλιέργεια, για τον κατάλληλο κλιματικό έλεγχο. Τα προσομοιώματα του κλίματος των θερμοκηπίων και της ανταπόκρισης της καλλιέργειας είναι ικανά να εξηγήσουν αυτές τις σχέσεις, όσο και τις σχέσεις μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου, έτσι ώστε το εσωτερικό περιβάλλον να ελέγχεται εύκολα και με ακρίβεια και η παραγωγή της καλλιέργειας να μεγιστοποιείται. Η δημιουργία θερμοκηπιακών συστημάτων διατήρησης της ενέργειας βασίζεται και εξαρτάται άμεσα από αυτά τα προσομοιώματα για τον καλύτερο κλιματικό έλεγχο, σε συνδυασμό με την βελτιστοποίηση της θερμοκηπιακής κατασκευής, των υλικών κάλυψης και των τεχνικών μόνωσης (Bakker, 2006; Day, 1998).

Τα προσομοιώματα, γενικά, είναι απλές μαθηματικές αναπαραστάσεις ενός συστήματος. Συνήθως, συνδυάζονται με άλλα προσομοιώματα πιο πολύπλοκα και εξειδικευμένα, για τη δημιουργία συστημάτων ελέγχου. Τα προσομοιώματα που χρησιμοποιούνται στην έρευνα του κλίματος του θερμοκηπίου μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: (1) τα μηχανιστικά ή «white-box» προσομοιώματα και (2) τα προσομοιώματα που βασίζονται σε δεδομένα ή «black-box» προσομοιώματα (Challa, 1979). Η διαφορά μεταξύ των δύο προσομοιωμάτων φαίνεται στους πίνακες 2.1. και 2.2.

2.5.1. Μηχανιστικά προσομοιώματα (white-box)

Τα μηχανιστικά προσομοιώματα είναι αυτά που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις λόγω ευχρηστίας. Εύλογα λοιπόν, το μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφίας αναφέρεται σε αυτά. Τα μηχανιστικά προσομοιώματα ξεκινούν πάντα από τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα μιας μηχανιστικής προσέγγισης διεξήχθη από τους Papadakis et al. (1994). Στο πείραμα αυτό, μελετήθηκε η δημιουργία προσομοιωμάτων της μεταφοράς ενέργειας και μάζας μεταξύ της καλλιέργειας τομάτας και του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου. Οι μηχανιστικοί τύποι, όπως το ισοζύγιο ενέργειας της καλλιέργειας, η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή και η διαπνοή των φυτών που επηρεάζονται από το μικροκλίμα του θερμοκηπίου, συνδυάστηκαν για τον πειραματικό προσδιορισμό της εσωτερικής αντίστασης. Η θερμοκρασία των φύλλων, της καλλιέργειας και το έλλειμμα της πίεσης ατμών υπολογίσθηκαν και συνδέθηκαν στην εσωτερική αντίσταση. Η σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα ήταν ικανοποιητική. Οι Sharman et al. (1999) ανέπτυξαν ένα μηχανιστικό προσομοίωμα για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας των φυτών και του χώρου που τα περιβάλλουν, αλλά και κάποιες άλλες παραμέτρους όπως η θερμική ικανότητα και η αποδοτικότητα του θερμοκηπίου, σε διάφορες ζώνες του μικροκλίματός του.

Πίνακας 2.2. Σύγκριση προσομοιωμάτων white-box και black-box (Challa 1979, Boonen 2005).

Προσομοίωμα white-box	Προσομοίωμα black-box
Απαιτεί πολύ χρόνο προσομοίωσης	Απαιτεί λίγο χρόνο προσομοίωσης
Πολύπλοκο προσομοίωμα (πολλές παράμετροι)	Απλό προσομοίωμα (μικρός αριθμός παραμέτρων)
Βασίζεται σε φυσικούς και φυσιολογικούς νόμους	Η προβλεπόμενη τιμή επηρεάζεται λιγότερο από παράγοντες και διαδικασίες που δεν έχουν συμπεριληφθεί στον υπολογισμό της
Πιθανός υπολογισμός κατά προσέγγιση	Απίθανος υπολογισμός κατά προσέγγιση
Μπορεί να υπάρξει σύνδεση μεταξύ βραχύχρονων αντιδράσεων των φυτών και μακρόχρονης	Δεν εξετάζει λεπτομέρειες εντός του συστήματος

προετοιμασίας της καλλιέργειας

Πολύ δύσκολη χρήση όταν ο σκοπός είναι ο έλεγχος

Εύκολη χρήση όταν ο σκοπός είναι η επιτήρηση και ο έλεγχος του συστήματος

Κατάλληλο για σχεδιασμό και επιστημονική ανάλυση εντός του συστήματος

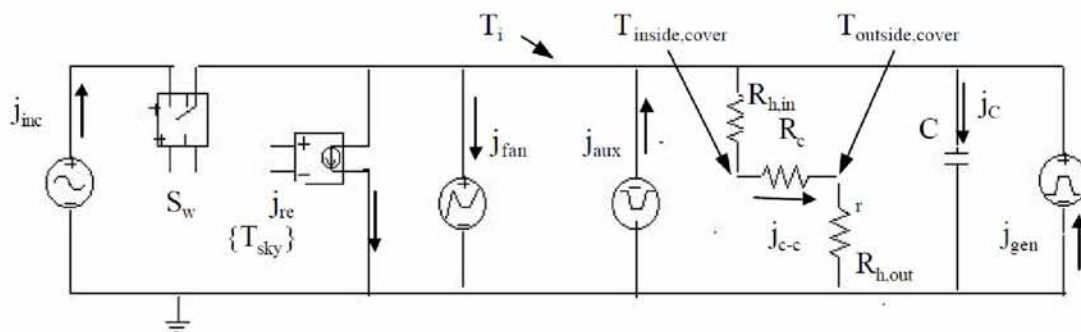
Εξαρτάται από τον δημιουργό και χειριστή του προσομοιώματος (υποκειμενικό)

Τα περισσότερα προσομοιώματα πάσχουν καλής τεκμηρίωσης, λόγω της πολυπλοκότητας τους

Οι Alhama *et al.* (2000) χρησιμοποίησαν μια άλλη τεχνική. Μελέτησαν την επίδραση μερικών από τις πιο σημαντικές παραμέτρους στην αριθμητική λύση του θερμικού ισοζυγίου που συμπεριλαμβάνεται στον έλεγχο του κλίματος. Η αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Μέθοδος Δικτύου Προσομοίωσης (Network Simulation Method). Αυτή η διαδικασία ξεκινά με τις κανονικές διαφορικές εξισώσεις που αντιπροσωπεύουν το μαθηματικό προσομοίωμα. Ο κάθε όρος της διαφορικής εξίσωσης χρησιμοποιείται στο κύκλωμα ως μια ηλεκτρική συσκευή, της οποίας η μαθηματική σχέση μεταξύ του εφαρμοσμένου δυναμικού και της τάσης είναι ισοδύναμη με αυτή του όρου. Αυτό σημαίνει ότι οι θερμικές μεταβλητές της θερμοκρασίας και η θερμική ροή συσχετίζονται με τις ηλεκτρικές μεταβλητές δυναμικού και τάσης (Εικόνα 2.3). Ολόκληρο το θερμοκήπιο θεωρείται ως ένα κελί, με συνέπεια όλες οι εισερχόμενες και εξερχόμενες θερμικές ροές να θεωρούνται και να χρησιμοποιούνται σαν οριακές συνθήκες. Το προσομοίωμα δικτύου είναι πολύ απλό και ευέλικτο (επειδή οι παράμετροι μπορούν εύκολα να αλλάζουν, ώστε να αναλύονται οι επιδράσεις τους). Εξαιτίας των μη γραμμικών σχέσεων, τα μαθηματικά προσομοιώματα έχουν δυσκολίες στην εφαρμογή της εκτίμησης μιας παραμέτρου. Ωστόσο, οι López-Cruz *et al.* (2003) εφάρμοσαν τους αλγόριθμους Διαφορικής Εξέλιξης (Differential Evolution algorithms, DEAs) για την ταυτοποίηση των παραμέτρων του προσομοιώματος, με μεγαλύτερη ακρίβεια. Έτσι, διεξήχθη ένα μαθηματικό προσομοίωμα με τρεις επίσημες μεταβλητές (θερμοκρασία αέρα, υγρασία αέρα και θερμοκρασία του άνωτερου εδαφικού στρώματος). Οι DEAs φαίνεται να είναι πιο αποτελεσματικοί σε σχέση με τους Γενετικούς Αλγόριθμους (López-Cruz *et al.*, 2003).

Πίνακας 2.3. Διαφορές των *white-box* και *black-box* προσομοιωμάτων

	White-box	Black-box
Εφαρμογή	Γενική	Ειδική
Υπολογισμός προσέγγιση	κατά Καλός	Αδύναμος
Παρεμβολή	Καλή	Άριστη
Πολυπλοκότητα προσομοιώματος	Υψηλή	Χαμηλή
Κόστος ανάπτυξης	Υψηλό	Χαμηλό
Χρόνος ανάπτυξης	Πολύς	Λίγος



Εικόνα 2.2. Το προσομοίωμα ηλεκτρικού δικτύου των *Alhama et al.* (2000).

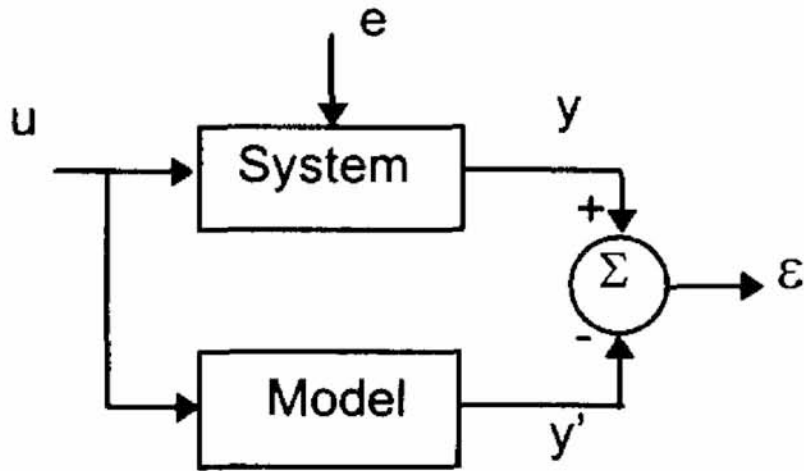
2.5.2. Προσομοιώματα που βασίζονται σε δεδομένα (**black-box**)

Στη δημιουργία προσομοιωμάτων που χρησιμοποιούνται για το κλίμα του θερμοκηπίου, η δεύτερη ομάδα είναι αυτή των εμπειρικών προσομοιωμάτων. Αυτά τα προσομοιώματα χρησιμοποιούνται κυρίως για τον έλεγχο και όχι για την επεξήγηση των φυσικών παραμέτρων. Πρέπει να είναι απλά, γιατί απαιτούν συνεχή ενημέρωση κατά τη διάρκεια του ελέγχου. Σε αντίθεση με τα μηχανιστικά προσομοιώματα, δεν απαιτείται προηγούμενη γνώση. Τα εμπειρικά αυτά προσομοιώματα μπορούν να

χωριστούν, με βάση τη μέθοδό τους, σε δύο ομάδες: (1) τα προσομοιώματα Συνάρτησης Μεταφοράς (Transfer Function models, TF) και (2) τα Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks, NN) (Berckmans & Aerts, 2009). Τα χαρακτηριστικά της TF μεθόδου ορίζονται ως εξής: γρήγορος υπολογισμός των παραμέτρων, συνεπτυγμένη μέθοδος, οι παράμετροι μπορούν να υπολογισθούν σε πραγματικό χρόνο και αυτές οι παράμετροι έχουν μικρή φυσική σημασία. Για την ομάδα των NN προσομοιωμάτων, τα χαρακτηριστικά ελαφρώς διαφέρουν: η NN μέθοδος είναι κατάλληλη για μη γραμμικά σύνθετα συστήματα, είναι κατάλληλη για συστήματα Πολλαπλών Δεδομένων Πολλαπλών Αποτελεσμάτων (Multiple Input Multiple Output, MIMO), οι παράμετροι επίσης δεν έχουν φυσική σημασία και επειδή αυτό το είδος δημιουργίας προσομοιωμάτων απαιτεί μεγάλη βάση δεδομένων, απαιτείται η σπατάλη μεγάλου χρονικού διαστήματος. Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία προσομοιωμάτων όσον αφορά στο κλίμα του θερμοκηπίου και παρατίθενται λεπτομερώς παρακάτω.

Προσομοιώματα Συνάρτησης Μεταφοράς (TF)

Οι Boaventura Cunha *et al.* (1997) σε πείραμά τους, υπολόγισαν σε πραγματικό χρόνο τις παραμέτρους ενός προσομοιώματος για την εσωτερική θερμοκρασία του αέρα ενός θερμοκηπίου. Η δομή και οι παράμετροι του κλιματικού «ξεχωριστού-χρόνου» δυναμικού προσομοιώματος προσδιορίστηκαν σε προηγούμενα δεδομένα μέσω του προσδιορισμού του συστήματος. Αυτή είναι μια μέθοδος στην οποία τα δεδομένα u και τα αποτελέσματα y υπόκεινται σε ανάλυση δεδομένων για την έρευνα ενός κατάλληλου προσομοιώματος. Στην Εικόνα 2.3 τα y' και ε αντιπροσωπεύουν τα αποτελέσματα του προσομοιώματος και το σφάλμα πρόβλεψης, αντίστοιχα.



Εικόνα 2.3. Παρουσίαση του συστήματος και του προσομοιώματος των Boaventura Cunha et al. (1997).

Το προσομοίωμα αυτό επιλέχθηκε να έχει ως δεδομένα, μεταβλητές των εξωτερικών καιρικών συνθηκών (θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου), μεταβλητές του εσωτερικού κλίματος (σχετική υγρασία) και μεταβλητές όσον αφορά στον έλεγχο του κλίματος (αερισμός, θέρμανση). Ο γενικός τύπος του παραμετρικού ARX προσομοιώματος για ένα δεδομένο είναι ο εξής:

$$y_k = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u_k + \frac{1}{A(z^{-1})}e_k$$

Επεξήγηση του ARX προσομοιώματος

Αυτή η εξίσωση μπορεί να επεκταθεί με περισσότερα δεδομένα και/ή καθυστερήσεις. Το προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε από τους Boaventura Cunha et al. (1997) ήταν ένα προσομοίωμα δεύτερης τάξης:

$$T_{as}(kT) = \frac{[B_{T_{ao}} \ B_{Rad_o} \ B_{Rh_g} \ B_{vent}]^{-1} + 0.6566 q^{-2}}{1 - 1.6538q}$$

$$\begin{bmatrix} T_{ao}(kT) \\ Rad_o(kT) \\ Rh_g(kT) \\ vent(kT) \end{bmatrix}$$

με τις παραμέτρους:

$$B_{T_{so}} = 0.0621 q^{-1} - 0.0601 q^{-2}$$

$$B_{Rad_o} = 0.0376 q^{-1} + 0.0425 q^{-2}$$

$$B_{Rh_g} = -0.0054 q^{-1} + 0.00561 q^{-2}$$

$$B_{vent} = -0.0638 q^{-1} - 0.0150 q^{-2}$$

Λόγω της χρονικής ποικιλίας των παραμέτρων, οι παράμετροι δεν μπορούν να είναι σταθερές και χρειάζονται συνεχή ενημέρωση. Ο συντονισμός των παραμέτρων διεξάγεται με την μέθοδο των Recursive Ελαχίστων Τετραγώνων (Recursive Least Square, RLS) με εκθετική «διακλάδωση» των πληροφοριών, μόνο προς τις κατευθύνσεις στις οποίες συγκεντρώνονται καινούριες πληροφορίες. Έτσι, πετυχαίνεται μια καλή εφαρμογή του προσομοιώματος. Για την επαλήθευση αυτού του συμπεράσματος, χρησιμοποιήθηκε η σύγκριση αυτής τη μεθόδου με τον πιο πολυχρησιμοποιημένο ελεγκτή PID (Proportional=Αναλογικός, Integral=Πλήρης, Derivative=Παράγωγος, Δευτερογενής). Το συμπέρασμα από τη σύγκριση αυτή ήταν ότι ο έλεγχος PID πετυχαίνει μια μέτρια απόδοση. Επίσης, δεν ήταν ικανός να λειτουργήσει με μια σταθερή ορισμένη τιμή (fixed set-point). Οι Van Pee & Berckmans (1995) σε πείραμά τους για την ανταπόκριση των φυτών (φωτοσύνθεση και υδατικό δυναμικό) προσομοίωσαν στο σύστημα δεδομένα (συγκέντρωση CO₂ και ένταση φωτός) και με αυτό τον τρόπο ανέπτυξαν μια διαδικασία σε πραγματικό χρόνο, για τον έλεγχο των δεδομένων του συστήματος.

Προσομοιώματα Νευρωνικού Δικτύου (NN)

Επειδή στα MIMO «black-box» προσομοιώματα ο αριθμός των παραμέτρων είναι μεγάλος, σε σχέση με την θεωρία των «black box» για τα TF, απαιτείται μεγάλη βάση δεδομένων για τον υπολογισμό των παραμέτρων αυτών. Σε σύγκριση με τα TF προσομοιώματα, τα NN «black box» προσομοιώματα μπορούν να λειτουργήσουν και με μη γραμμικές παραμέτρους. Ενώ αυτά τα πολύ-παραμετρικά προσομοιώματα δεν αποτελούν πρακτική λύση για τον σχεδιασμό των θερμοκηπίων, είναι πολύ καλά για περιπτώσεις ελέγχου του περιβάλλοντος. Είναι κατάλληλα για την πραγματοποίηση ακριβών προβλέψεων, παρέχοντας όλους τους παράγοντες που έχουν σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα να παρουσιάζονται και στα εισερχόμενα δεδομένα (Seginer *et al.*, 1994). Στη μελέτη των Seginer *et al.* (1994) φαίνονται οι δύο

κυριότερες εφαρμογές των NN: (1) τα NN προσομοιώματα για έλεγχο και (2) τα NN προσομοιώματα που λειτουργούν σαν πηγή για την ανάπτυξη φυσικών προσομοιωμάτων. Στην πρώτη εφαρμογή, οι μεταβλητές που δεν μπορούν να μετρηθούν, για παράδειγμα η ροή του αερισμού Q , υποδιαιρούνται σε μετρήσιμες μεταβλητές, όπως στην περίπτωση μας στην ταχύτητα του ανέμου W και επιφάνεια αερισμού A . Το νέο προσομοίωμα πρόβλεψης του αερισμού λειτουργεί πριν από το προσομοίωμα πρόβλεψης της θερμοκρασίας. Αυτό το προσομοίωμα απαιτεί μεγάλη βάση δεδομένων για τη λειτουργία του (3076 ώρες). Όταν υπολογίζονται οι διάφορες παράμετροι, καθορίζεται η βαρύτητα της επίδρασης των εισερχόμενων δεδομένων και ανιχνεύονται τα δεδομένα που επιδρούν περισσότερο στα αποτελέσματα. Αυτό το προσομοίωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα αποτέλεσμα ή για προσομοιώματα MIMO. Για τα MIMO συστήματα, τα αποτελέσματα των μεταβλητών που προβλέφθηκαν είχαν βαθμό συσχέτισης από 0,896 έως 0,993, ο οποίος είναι πολύ καλός. Φυσικά το προσομοίωμα αυτό δεν μπορεί να επεκταθεί σε μεταβλητές οι οποίες δεν χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του προσομοιώματος.

Τα Νευρωνικού Δικτύου προσομοιώματα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως ένα γρήγορο εργαλείο για την αποσαφήνιση των ασήμαντων εισερχόμενων δεδομένων στη φυσική προσομοίωση. Είναι ανώτερα από τη γραμμική συμμεταβολή και την ανάλυση των κυριότερων στοιχείων, γιατί δεν περιορίζονται στα γραμμικά προσομοιώματα (Seginer *et al.*, 1994).

Οι Frausto & J.P. (2004) διεξήχθησαν έρευνα για τη μελέτη νευρωνικού δικτύου ARX (NNARX). Ανέπτυξαν ένα προσομοίωμα της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου σαν συνάρτηση της εξωτερικής θερμοκρασίας και υγρασίας του αέρα, της ηλιακής ακτινοβολίας και του βαθμού νεφελώματος του ουρανού. Κατέληξαν ότι ο αριθμός των νευρώνων στην κρυμμένη στιβάδα του NNARX συστήματος είναι σημαντικός για μια σειρά καλών αποτελεσμάτων. Το σύστημα αυτό δεν μελετήθηκε ως προς τον έλεγχο του κλίματος.

2.5.3. Σύγκριση «black box»-«white box» προσομοιωμάτων

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί αρκετά με τη σύγκριση μεταξύ εμπειρικών και μηχανιστικών προσομοιωμάτων. Οι Cunha *et al.* (2003) σύγκριναν διάφορους τύπους

προσομοιωμάτων, μαζί με τις μεθόδους τους για τον υπολογισμό των παραμέτρων τους. Τα προσομοιώματα αυτά αφορούσαν κυρίως στην εσωτερική θερμοκρασία, υγρασία του αέρα και στη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα. Το μειονέκτημα των φυσικών προσομοιωμάτων που συγκρίθηκαν στη μελέτη αυτή ήταν η δυσκολία στο συγχρονισμό των μεθόδων, λόγω του μεγάλου αριθμού των παραμέτρων και των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν. Ένα άλλο πρόβλημα ήταν ότι το χρονικό διάστημα που απαιτούνταν για να δείξει το προσομοίωμα καλά αποτελέσματα είναι πολύ μικρό, γιατί το σύστημα θερμοκήπιο-καλλιέργεια είναι άμεσα εξαρτώμενο του χρόνου. Το «black-box» προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε για την έρευνα αυτή ήταν των Boaventura Cunha *et al.* (1997). Τα ARX προσομοιώματα είναι μια απλοποίηση όλου του συστήματος και γι' αυτό οι παράμετροι που υπολογίζονται είναι άμεσα εξαρτώμενες από το χρόνο. Στο άρθρο αυτό, χρησιμοποιήθηκε και ένα πολυεπίπεδο δίκτυο αισθητηρίων με μια συνάρτηση υπερβολικής καμπύλης. Τα NN όπως αναφέρθηκε έχουν διάφορα μειονεκτήματα: χρειάζονται μεγάλη βάση δεδομένων για τη λειτουργία τους λόγω των πολλών βαθμών ελευθερίας που έχουν, η ασυμβατότητα είναι πολλές φορές πιθανή και η μέθοδος αυτή απαιτεί πολύ χρόνο για την εφαρμογή της. Αυτός είναι ο κυριότερος λόγος που δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο. Κατά τη σύγκριση όλων αυτών των προσομοιωμάτων, παρατηρήθηκε ότι τα φυσικά προσομοιώματα έδιναν πολύ καλύτερα αποτελέσματα από αυτά που δε λειτουργούσαν σε πραγματικό χρόνο. Ωστόσο, τα λιγότερο χρονοβόρα ήταν τα ARX.

2.5.4. Συστήματα ελέγχου του θερμοκηπίου

Τα τελευταία χρόνια, ο έλεγχος του κλίματος του θερμοκηπίου έχει ερευνηθεί εκτενώς. Οι κύριοι λόγοι αυτού του ενδιαφέροντος είναι (1) η μεγέθυνση της καλλιεργητικής περιόδου και της τελικής παραγωγής, (2) η βελτίωση της ποιότητας της παραγωγής λόγω των βέλτιστων συνθηκών και (3) η δημιουργία ενός οικονομικού παραγωγικού συστήματος σε συνδυασμό με την έλλειψη των φυσικών πόρων και την ανικανότητα των παραγωγών για συνεχή έρευνα (Bennis *et al.*, 2008). Το αντικείμενο του διαχειριστή κλίματος είναι να διατηρήσει τις μεταβλητές που καθορίζουν το εσωτερικό κλίμα του θερμοκηπίου σε επιθυμητά όρια, ώστε να επιτευχθεί βελτίωση στην ανάπτυξη των φυτών και στη μείωση του κόστους

παραγωγής, όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας. Έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες στρατηγικές και μέθοδοι ελέγχου, όπως οι: λογικός έλεγχος (on-off), γενικευμένος έλεγχος πρόβλεψης, βέλτιστος έλεγχος, έλεγχος με πρόβλεψη προσομοιώματος, ασαφής έλεγχος κ.ά..

2.6. Συζήτηση- Συμπεράσματα

Από τη σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε παραπάνω παρατηρούμε ότι έχει γίνει αρκετή έρευνα όσον αφορά στα χαρακτηριστικά του αέρα του θερμοκηπίου, στα διάφορα συστήματα θέρμανσης και αερισμού. Υπάρχει πληθώρα δημοσιεύσεων που αφορούν στο πώς λειτουργούν αυτά τα συστήματα, πώς επηρεάζουν τις επιμέρους κλιματικές μεταβλητές εντός του θερμοκηπίου και τί ενεργειακή κατανάλωση έχουν. Αντιθέτως, όπως διαπιστώθηκε, υπάρχει ελλιπής έρευνα για την ομοιομορφία του κλίματος στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, όταν τα συστήματα θέρμανσης και αερισμού τίθενται σε λειτουργία, καθώς και ελλιπής έρευνα για τις μεθόδους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη της ομοιομορφίας.

Αν και οι ερευνητές έχουν ανακαλύψει τεχνικές ανάλυσης της κίνησης του αέρα (CFDs κ.ά.), η χρήση τους και η δημιουργία τους είναι πολύπλοκες, γεγονός που μας οδηγεί σε άλλες μεθόδους, όπως αυτές των «black-box» προσομοιωμάτων. Έχει γίνει αρκετή έρευνα όσον αφορά στα προσομοιώματα κλίματος του θερμοκηπίου, τα οποία όπως αποδείχθηκε, παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στον ακριβή έλεγχο του κλίματος. Όπως αναφέρθηκε, στα εμπορικά θερμοκήπια που καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις είναι πολύ σημαντικό να γίνεται λεπτομερής έλεγχος του μικροκλίματος, καθώς οι παράμετροί του μεταβάλλονται πάρα πολύ στο χώρο και επηρεάζεται άμεσα και σε μεγάλο βαθμό η απόδοση της καλλιέργειας. Επίσης, η κατανάλωση ενέργειας είναι υψηλή και απαιτείται ακριβής διαχείρισή της, κυρίως για οικονομικούς αλλά και περιβαλλοντικούς λόγους. Επομένως, δεν αρκεί μόνο ο έλεγχος της ομοιομορφίας, αν αυτός δεν γίνεται τακτικά και με τη βοήθεια προσομοιωμάτων που εφαρμόζονται σε πραγματικό χρόνο και πραγματικές συνθήκες.

Παρόλ' αυτά, λιγότερη έρευνα έχει γίνει για την επίδραση που προκαλεί ένα σύστημα κυκλοφορίας του αέρα, μέσα στο θερμοκήπιο. Ενώ έχει γνωστοποιηθεί το πρόβλημα της ετερογένειας του κλίματος στο θερμοκήπιο, η διαθέσιμη βιβλιογραφία

που υπάρχει για αναμείκτες αέρα και γενικότερα συστήματα ανάδευσής του, είναι ελάχιστη.

Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμο στην παρούσα εργασία να μελετηθεί η επίδραση ενός συστήματος κυκλοφορίας αέρα, συγκεκριμένα ανεμομίκτη (ανεμιστήρα) , στην κατανομή του μικροκλίματος, χρησιμοποιώντας διάφορα συστήματα διαμόρφωσης του κλίματος (συστήματα θέρμανσης και δροσισμού). Παρακάτω αναφέρονται τα υλικά και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν γι' αυτό το σκοπό καθώς παραθέτονται και τα αποτελέσματα της όλης έρευνας.

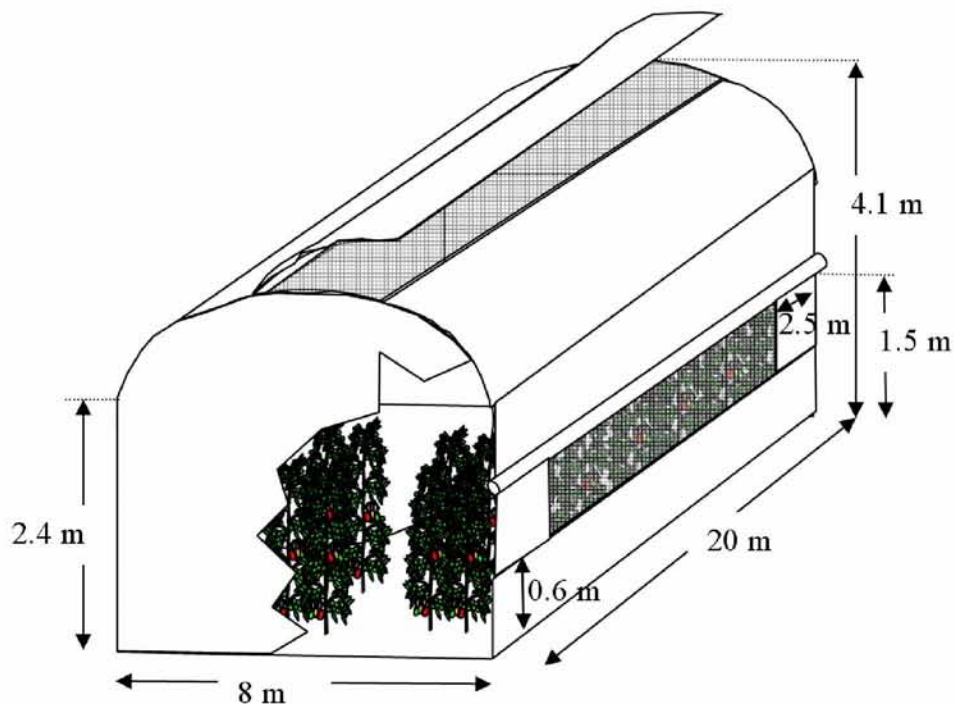
Κεφάλαιο 3 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1. Υλικά

3.1.1. Εισαγωγή - Τοποθεσία του πειράματος

Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του αναμεικτή αέρα στην κατανομή του μικροκλίματος στο θερμοκήπιο σε καλλιέργεια τομάτας, έγιναν μετρήσεις μικροκλίματος κατά την περίοδο 2009 - 2010.

Κατά την πραγματοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε το θερμοκήπιο του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο αγρόκτημα του Βελεστίνου του νομού Μαγνησίας. Το αγρόκτημα βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος $39^{\circ} 22'$ και γεωγραφικό μήκος $22^{\circ} 44'$, το υψόμετρο της περιοχής είναι 85 m και απέχει 17 km από το Βόλο. Το θερμοκήπιο είχε μήκος 20m και πλάτος 8m, καταλαμβάνοντας συνολικά 160m^2 και όγκο 572m^3 . Το ύψος του ορθοστάτη ήταν 2.4m και το ύψος του κορφιά 4.1m (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1. Πειραματικό θερμοκήπιο

Οι επικρατούντες άνεμοι της περιοχής έχουν κατεύθυνση είτε Νοτιοανατολικά προς Βορειοδυτικά (συνήθως τις πρωινές ώρες) είτε Βορειοδυτικά προς Νοτιοανατολικά (συνήθως τις απογευματινές ώρες).

3.1.2. Περιγραφή θερμοκηπίου – Καλλιέργεια

Το θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο, προσανατολισμένο 36° δεξιόστροφα από τη διεύθυνση Βορράς-Νότος, με σκελετό από γαλβανισμένο χάλυβα και κάλυψη με απλό πολυαιθυλένιο. Το θερμοκήπιο θερμαινόταν με σύστημα πλαστικών σωλήνων ανακυκλοφορίας ζεστού νερού, τοποθετημένων στο έδαφος και παράλληλα με τις γραμμές της καλλιέργειας. Επίσης, υπήρχε τοποθετημένο σε απόσταση 3 m από την επιφάνεια του εδάφους και σε απόσταση 0.5 m από την είσοδο του θερμοκηπίου ένα αερόθερμο, το οποίο τροφοδοτούνταν με θερμό νερό από τον ίδιο λέβητα με το σύστημα των επιδαπέδιων σωλήνων και παρείχε ζεστό αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

Το δίκτυο των σωλήνων ήταν τοποθετημένο σε απόσταση 10cm από την επιφάνεια του εδάφους και αποτελούνταν από μια γραμμή προσαγωγής ζεστού νερού και μια γραμμή επιστροφής για κάθε σειρά της καλλιέργειας.

Στο εσωτερικό του καυστήρα υπήρχε ένας κυκλοφορητής που έλεγχε τη ροή του ζεστού νερού στο σύστημα θέρμανσης. Στην αρχή του συστήματος των επιδαπέδιων σωληνώσεων υπήρχε και δεύτερος κυκλοφορητής ο οποίος επιτάχυνε τη ροή του ζεστού νερού στις επιδαπέδιες σωληνώσεις, έτσι ώστε από το σύστημα μέσω της αύξησης της παροχής να αυξηθεί η αποδιδόμενη ενέργεια στο περιβάλλον του θερμοκηπίου. Οι δύο κυκλοφορητές ήταν συνδεδεμένοι σε σειρά μεταξύ τους ενώ υπήρχε και η δυνατότητα απενεργοποίησης του δεύτερου κυκλοφορητή μέσω ενός διακόπτη που παρεμβαλλόταν ανάμεσά τους. Τόσο η λειτουργία των δυο κυκλοφορητών όσο και το αερόθερμο ελεγχόταν μέσω του κεντρικού ελεγκτή του κλίματος με βάση ένα αισθητήριο θερμοκρασίας – υγρασίας το οποίο ήταν τοποθετημένο στο μέσο του θερμοκηπίου και σε απόσταση 1.5m από την επιφάνεια του εδάφους. Η επιθυμητή θερμοκρασία του αέρα ήταν 21 °C κατά τη διάρκεια της ημέρας και 15 °C κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Το έδαφος του θερμοκηπίου ήταν καλυμμένο με απλό πολυαιθυλένιο έτσι ώστε να αποτρέπεται η εμφάνιση ζιζανίων αλλά και η εξάτμιση από το έδαφος ενώ η καλλιέργεια λιπαινόταν και ποτιζόταν από σύστημα στάγδην άρδευσης.



Εικόνα 3.1. Εξωτερική άποψη του πειραματικού θερμοκηπίου του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Το θερμοκήπιο ήταν εξοπλισμένο με συνεχή πλαϊνά ανοίγματα αερισμού διαστάσεων $0.9\text{m} \times 15\text{m}$ ή 13.5m^2 το καθένα. Ο **αερισμός** του θερμοκηπίου γινόταν μέσω δύο συνεχόμενων πλαϊνών ανοιγμάτων και ενός συνεχόμενου ανοίγματος στην οροφή.



Εικόνα 3.2. Πλαϊνή άποψη του πειραματικού θερμοκηπίου-Άνοιγμα παραθύρων αερισμού

Στο εσωτερικό του θερμοκηπίου υπήρχε τοποθετημένος ένας ηλεκτρικός ανεμομίκτης δυναμικότητας $4500\text{m}^3 \text{h}^{-1}$, τοποθετημένος σε ύψος 2.6m από το

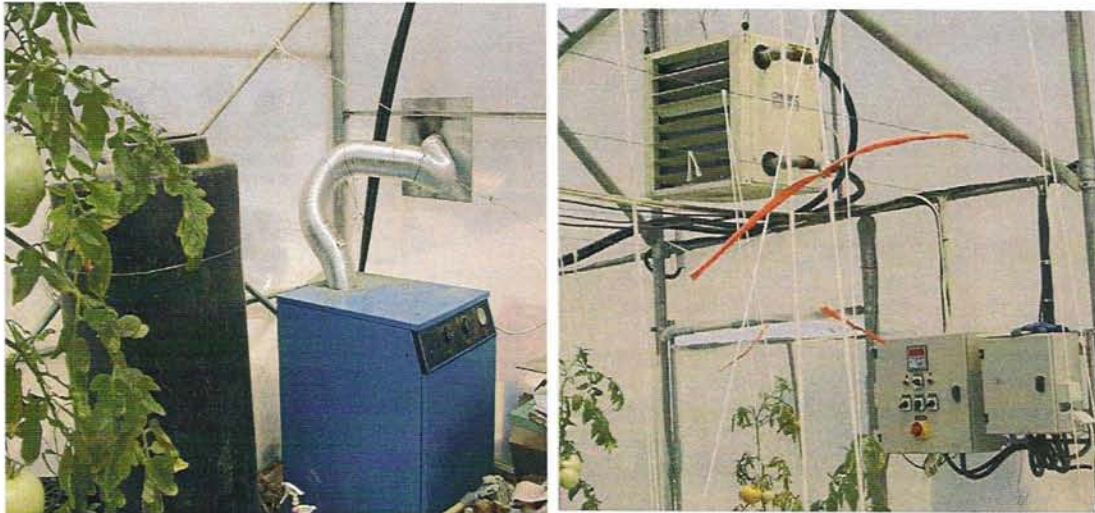
έδαφος, έτσι ώστε να βοηθά στην μετακίνηση του αέρα μέσα στο χώρο του θερμοκηπίου.

Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, εγκαταστάθηκε προσωρινά στο θερμοκήπιο νεφελοψεκαστήρας τύπου LVM 2001 TR Megatherm, ο οποίος χρησιμοποιείται σε κεντρικές εγκαταστάσεις ψεκασμού. Το ψεκαστικό υγρό που χρησιμοποιήθηκε ήταν νερό. Οι κεφαλές ψεκασμού είναι συνδεδεμένες με δίκτυο πεπιεσμένου αέρα, το οποίο συνήθως κατασκευάζεται από πλαστικό σωλήνα. Ο νεφελοψεκαστήρας διέθετε προσαρμοσμένο ανεμομίκτη για την καλύτερη κατανομή του ψεκαστικού υγρού και ήταν τοποθετημένος 5 m από την είσοδο του θερμοκηπίου, ανάμεσα από την πρώτη και τη δεύτερη σειρά των φυτών, δεξιά της εισόδου στο 1.5 m από την επιφάνεια του εδάφους.



Εικόνα 3.3. Ανεμομίκτης και νεφελοψεκαστήρας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

Συμπληρωματικά υπήρχε και αξονικό αερόθερμο, τοποθετημένο σε ύψος 2.6m από το έδαφος στη βόρεια πλευρά του θερμοκηπίου.



(α)

(β)

Εικόνα 3.4. Συστήματα θέρμανσης στο εσωτερικό του πειραματικού θερμοκηπίου: (α) Σύστημα επιδαπέδιων σωληνώσεων και (β) Αερόθερμο

Η καλλιέργεια που εγκαταστάθηκε ήταν υδροπονική καλλιέργεια τομάτας (*Lycopersicon esculentum cv. Belladonna*), μια ποικιλία αυτογονιμοποιούμενη με χαρακτηριστικό τη μεγάλη διάρκεια ζωής του καρπού. Η καλλιέργεια γινόταν σε υδροπονικό σύστημα για να επιτευχθεί ομοιομορφία συνθηκών στη ρίζα, γεγονός που δεν επιτυγχάνεται στο έδαφος, καθώς και για την αποφυγή ασθενειών του εδάφους. Το υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν περλίτης, με διαστάσεις κάθε σάκου περλίτη 1 m μήκος και 0.2 m πλάτος και ήταν τοποθετημένοι σε απόσταση 0.5 m από την επιφάνεια του εδάφους. Η καλλιέργεια είχε εγκατασταθεί σε δύο διπλές σειρές με αποστάσεις φύτευσης 0.33 m επί της γραμμής και 0.75 m επί των γραμμών, δίνοντας κατά αυτόν τον τρόπο μια πυκνότητα φυτών 2.4 φυτά / m² εδάφους.



Εικόνα 3.5. Εγκατάσταση καλλιέργειας τομάτας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου σε διπλές γραμμές φύτευσης

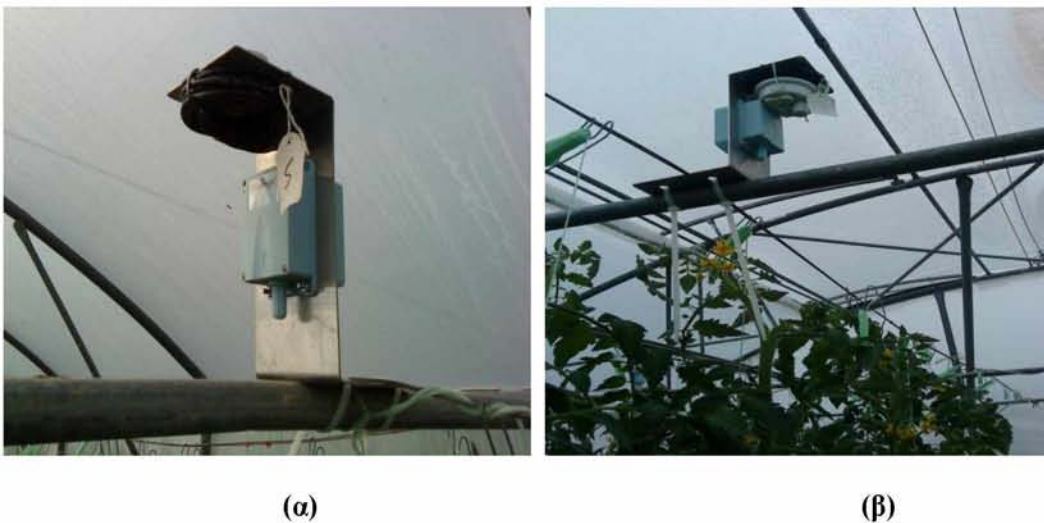
Η δόση και η συχνότητα άρδευσης καθώς και η ποιότητα του αρδευόμενου διαλύματος ελέγχονταν με ένα αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου και αναμείξεως των διαλυμάτων μέσω Η/Υ, με ρύθμιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας περίπου στο 2.5 dSm^{-1} και pH στο 5.5. Το σύστημα ήταν εξοπλισμένο με μικροελεγκτή που ρύθμιζε τα παραπάνω χαρακτηριστικά του διαλύματος προτού αυτό να διοχετευθεί στα φυτά μέσω των σταλλακτών. Το κλάδεμα και η διαμόρφωση της καλλιέργειας γινόταν σύμφωνα με την τεχνική που ακολουθείται από τους περισσότερους παραγωγούς στη χώρα μας μονοστέλεχο για φυτό τομάτας.

3.1.3. Περιγραφή των οργάνων μέτρησης

Προκειμένου να αναλυθούν οι ενδείξεις των χαρακτηριστικών που μελετήθηκαν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος, χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων (Zeno, Coastal USA) ανά 10 λεπτά (μέτρηση κάθε 1 λεπτό), όπου καταγραφόταν:

- Εσωτερικά στο θερμοκήπιο: η **θερμοκρασία** (T , $^{\circ}\text{C}$) και η **σχετική υγρασία** (RH) του αέρα με τη χρήση αισθητήρων μέτρησης (HD9009TR Hygrotransmitter, Delta OHM S.r.L., Padova, Italia) με ακρίβεια: θερμοκρασία $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, σχετική υγρασία

$\pm 2\%$ τοποθετημένοι στο κέντρο του θερμοκηπίου σε ύψος περίπου 1,8 μέτρα καθώς και η **ολική ηλιακή ακτινοβολία** (R_s , Wm^{-2}) με ηλιακά πυρανόμετρα (Middleton EP08-E, Brunswick, Victoria, Australia) σε απόσταση 2 μέτρων από το έδαφος του θερμοκηπίου. Ακόμη, η **παροχή ενέργειας** από το αερόθερμο και τους επιδαπέδιους σωλήνες: για κάθε ένα από τα δυο συστήματα θέρμανσης χρησιμοποιήθηκε ξεχωριστή διάταξη έτσι ώστε να είναι εφικτή η μέτρηση της παρεχόμενης ενέργειας [$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T / (60 \cdot 160)$] χωριστά από τα δυο συστήματα. Περιλαμβάνει ένα ροόμετρο τοποθετημένο στην είσοδο του ζεστού νερού και ένα ζεύγος αισθητήρων θερμοκρασίας τοποθετημένους στην είσοδο του ζεστού νερού και στην έξοδο του νερού επιστροφής.



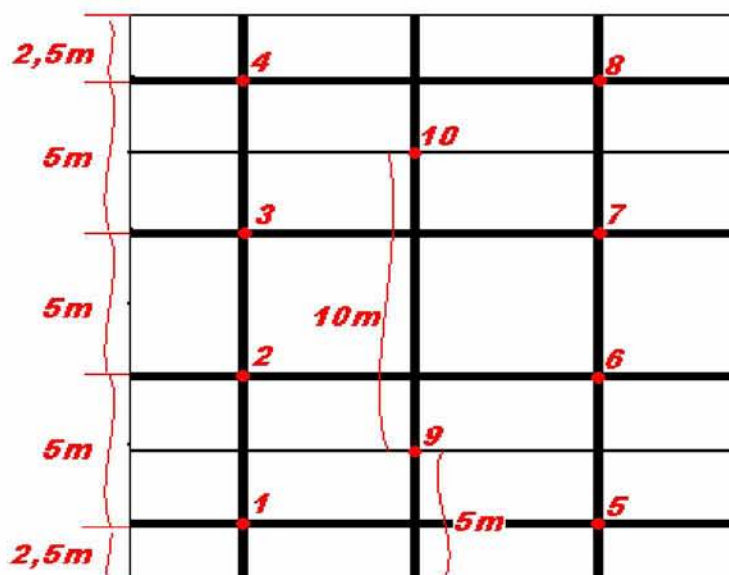
Εικόνα 3.6. Ασύρματοι και ενσύρματοι αισθητήρες καταγραφής δεδομένων, τοποθετημένοι σε διάφορες θέσεις στο εσωτερικό του θερμοκηπίου

- Εξωτερικά του θερμοκηπίου: η **θερμοκρασία**, η **σχετική υγρασία** του αέρα και η **ολική ηλιακή ακτινοβολία** που αναφέρθηκαν παραπάνω, σε απόσταση περίπου 15 μέτρων από το θερμοκήπιο και σε ύψος 4 μέτρα. Ακόμη, λήφθηκαν μετρήσεις για την **ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου** με τη χρήση ενός ανεμομέτρου κυπέλλων (model AN1-UM-3, Delta-T Devices, Cambridge, U.K.) και ενός ανεμοδείκτη (model WD1-UM-3, Delta-T Devices, Cambridge, U.K.) αντίστοιχα, οι οποίοι ήταν τοποθετημένοι σε ύψος 10 μέτρων.

3.1.4. Περιγραφή των μετρήσεων – μεταχειρίσεων

3.1.4.1. Μετρήσεις ομοιομορφίας στην κατανομή του μικροκλίματος του θερμοκηπίου

Με σκοπό να διερευνηθούν οι οριζόντιες και κατακόρυφες διαβαθμίσεις θερμοκρασίας και υγρασίας μέσα στο θερμοκήπιο χρησιμοποιήθηκαν δεκαεπτά αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας και υγρασίας. Οι επτά από αυτούς έχουν ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή για την αποθήκευση των δεδομένων. Οι υπόλοιποι δέκα αποθηκεύουν τα δεδομένα αυτόματα σε πρόγραμμα Η/Υ. Τα αισθητήρια όργανα μέτρησης τοποθετούνται σε δύο διαφορετικές διατάξεις μία οριζόντια και μια κατακόρυφη. Αρχικά τοποθετήσαμε τους 10 από τους 17 αισθητήρες. Όλοι οι αισθητήρες είναι αριθμημένοι από το 1-17. Οι πρώτοι 4 τοποθετούνται στην αριστερή πλευρά του θερμοκηπίου, πάνω από την σειρά των φυτών (2 m από το ύψος της ρίζας). Ο 1ος 2,5 m από την αρχή του θερμοκηπίου και οι υπόλοιποι 3 σε απόσταση 5 m μεταξύ τους. Άλλοι 4 αισθητήρες τοποθετούνται με τον ίδιο τρόπο στην δεξιά πλευρά του θερμοκηπίου. Οι τελευταίοι 2 αισθητήρες τοποθετούνται σχεδόν στην μέση του θερμοκηπίου και πάνω από τα φυτά. Σε αυτή την περίπτωση ο πρώτος απέχει 5m από την αρχή του θερμοκηπίου και ο άλλος 10 m απ' αυτόν.



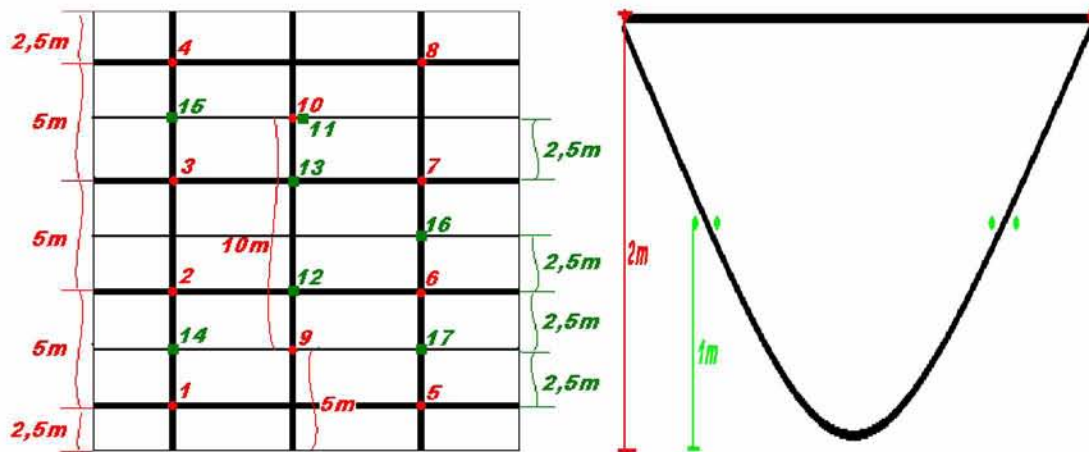
ΕΙΣΟΔΟΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Σχήμα 3.2. Διάταξη αισθητήριων οργάνων μέτρησης. Άποψη εικόνας πάνω από το θερμοκήπιο.



Εικόνα 3.7. Τοποθετημένοι οι πρώτοι δέκα αισθητήρες μέτρησης πάνω από την καλλιέργεια.

Στην συνέχεια τοποθετήσαμε άλλους 7 αισθητήρες μέσα στην καλλιέργεια και ενδιάμεσα στα φυτά (1.5 m από το ύψος της ρίζας), αφού πρώτα τα προγραμματίσαμε. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες αποθηκεύουν τα δεδομένα σε εσωτερική μνήμη που διαθέτουν. Οι αισθητήρες τοποθετούνται όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.



ΕΙΣΟΔΟΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Σχήμα 3.3. Οριζόντια και κατακόρυφη διάταξη αισθητήριων οργάνων μέτρησης θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας.

Πριν τη τοποθέτηση των αισθητήρων στη θέση που προσδιορίζονται στα σχήματα τοποθετήθηκαν όλοι μαζί στην αποθήκη του αγροκτήματος για ένα εικοσιτετράωρο και οι τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας που κατέγραψαν συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίστηκε ότι τυχόν μεταβολές στις τιμές θερμοκρασίας – υγρασίας θα οφείλονται στη διαφορετική θέση των αισθητήρων και όχι σε κάποιο σφάλμα του αισθητήρα.



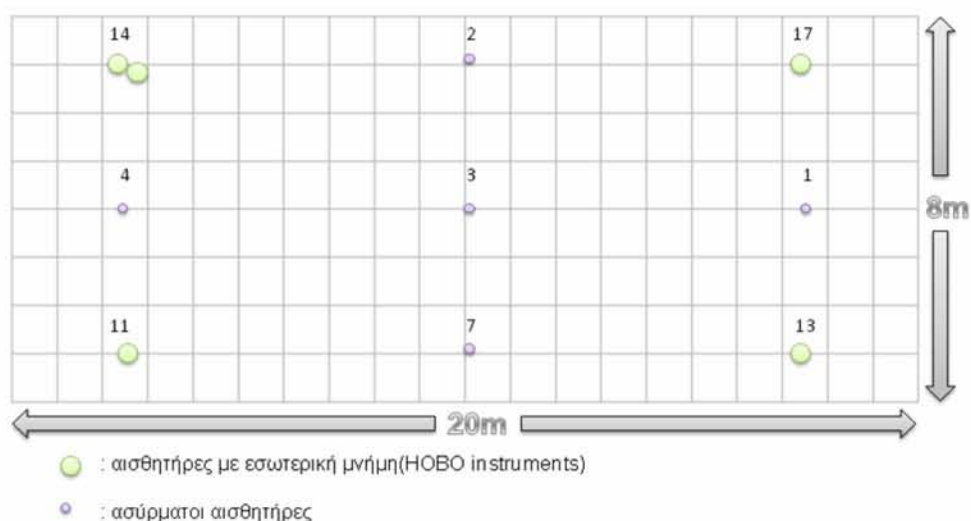
Εικόνα 3.8. Αισθητήρας θερμοκρασίας – υγρασίας

Στην διάταξη που εφαρμόσαμε επιλέξαμε διαφορετικούς τρόπους θέρμανσης και ανάδευσης του αέρα με σκοπό να διαπιστώσουμε τις οριζόντιες και κατακόρυφες μεταβολές της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Έτσι χρησιμοποιήσαμε :

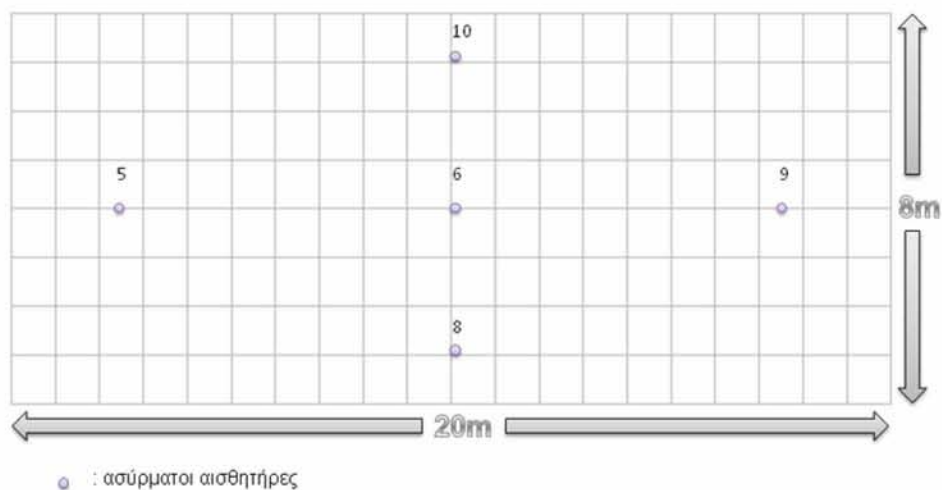
- 1) Μόνο συστήματα θέρμανσης Αερόθερμο – Επιδαπέδια θέρμανση
- 2) Συστήματα θέρμανσης και Σύστημα ανάμιξης αέρα (ανεμομίκτης)
- 3) Συστήματα θέρμανσης και Σύστημα ανάμιξης αέρα (ανά 10λεπτο λειτουργίας)

3.1.4.2. Μετρήσεις του μικροκλίματος για τη δημιουργία προσομοιωμάτων

Τα αισθητήρια όργανα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης του πειράματος, ήταν τα ίδια με τα προηγούμενα, αλλά σε διαφορετικές θέσεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.9. Τα όργανα αυτά και σε αυτή τη διάταξη, χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις της ομοιομορφίας της κατανομής του μικροκλίματος, κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών, όπου τέθηκε σε λειτουργία ο νεφελωπεκαστήρας.



(α)



(β)

Εικόνα 3.9. Τοποθεσία αισθητήριων οργάνων σε άποψη του θερμοκηπίου, με την είσοδο δεξιά. (α) 2,5m από την επιφάνεια του εδάφους και (β) 1,5m από την επιφάνεια του εδάφους.

3.1.5. Περιγραφή της επεξεργασίας

Όλες οι μετρήσεις λαμβάνονταν κάθε ένα δευτερόλεπτο (1sec) και καταγραφόταν η μέση τιμή τους κάθε ένα λεπτό (1min). Σε εξαιρετικές μόνο περιπτώσεις λαμβάνονταν κάθε τριάντα δευτερόλεπτα (30sec) και καταγραφόταν η μέση τους τιμή κάθε δέκα λεπτά (10min).

3.2. Μέθοδοι

3.2.1. Μέθοδοι επεξεργασίας μετρήσεων για την ομοιομορφία της κατανομής του μικροκλίματος

Για την μελέτη της ομοιομορφίας της κατανομής του μικροκλίματος, χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι. Η πρώτη μέθοδος είναι οπτική-εμπειρική και βασίζεται στη χρήση διαγραμμάτων επιφάνειας. Τα διαγράμματα επιφάνειας απεικονίζουν την άποψη του θερμοκηπίου, με αναφορά κάθε φορά σε κάποια από τις κυριότερες μεταβλητές, θερμοκρασία και σχετική υγρασία του αέρα. Έτσι, ο παρατηρητής, ανάλογα με τους χρωματισμούς των διαφόρων ζωνών που σχηματίζονται, μπορεί να διακρίνει οπτικά αν υπάρχει ομοιομορφία στις μετρήσεις ή αν όχι.

Η δεύτερη μέθοδος είναι πιο ακριβής και αφορά στη χρήση ενός συντελεστή. Ο συντελεστής αυτός ονομάζεται Συντελεστής Μεταβλητικότητας (Coefficient of Variable, CV) και ορίζεται ως το πηλίκο της τυπικής απόκλισης, προς τον μέσο όρο των μετρήσεων, όπως φαίνεται και παρακάτω:

$$CV(x) = \frac{\sigma}{\mu} * 100$$

Από τον τύπο ορισμού του είναι φανερό ότι είναι καθαρός αριθμός, δηλαδή απαλλαγμένος των μονάδων μέτρησης και συνεπώς η σύγκριση των τυπικών αποκλίσεων δύο πληθυσμών είναι πάντα δυνατή (Παπαδήμας, 1995). Ο συντελεστής αυτός είναι ένα σχετικό μέτρο διασποράς και εκφράζει τη διασπορά των τιμών ενός δείγματος περί τον μέσο όρο τους. Δηλαδή, εκφράζει την ομοιομορφία του δείγματος. Ένα δείγμα θεωρείται ομοιόμορφο, όταν ο CV είναι $\leq 0,1$ ή $\leq 10\%$.

3.2.2. Μέθοδοι επεξεργασίας μετρήσεων για τη δημιουργία προσομοιωμάτων του μικροκλίματος

Για τη δημιουργία προσομοιωμάτων, χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι. Η πρώτη μέθοδος ονομάζεται Unobserved Components analysis (Ανάλυση Απαρατήρητων Συνιστωσών, UC) και η δεύτερη Transfer Function models (Προσομοιώματα Μεταφοράς Συναρτήσεων, TF). Για την επεξεργασία των μετρήσεων με βάση αυτές τις δύο μεθόδους, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MATLAB® και το εργαλείο του CAPTAIN, που χειρίζεται τις συγκεκριμένες μεθόδους.

3.2.2.1 Unobserved Components analysis

Η μέθοδος αυτή είναι μια γενική στρατηγική που αφορά στην ανάλυση χρονικών αλληλουχιών και στην αφαίρεση σημάτων. Βασίζεται στην προϋπόθεση ότι οι αλληλουχίες δεδομένων αποτελούνται από προσθετικό ή πολλαπλασιαστικό συνδυασμό από διαφορετικές συνιστώσες, οι οποίες έχουν καθορισμένα στατιστικά χαρακτηριστικά αλλά δεν μπορούν να παρατηρηθούν άμεσα. Αυτές οι συνιστώσες μπορεί να περιέχουν μια τάση, κυκλικά σήματα, στοχαστικές ανωμαλίες κ.ά. (Taylor *et al.*, 2007).

Τα UC προσομοιώματα στο CAPTAIN μπορούν να συντεθούν από την ακόλουθη χρονική εξίσωση:

$$y_t = T_t + C_t + S_t + f(u_t) + N_t + e_t \quad e_t \sim N(0, \sigma^2)$$

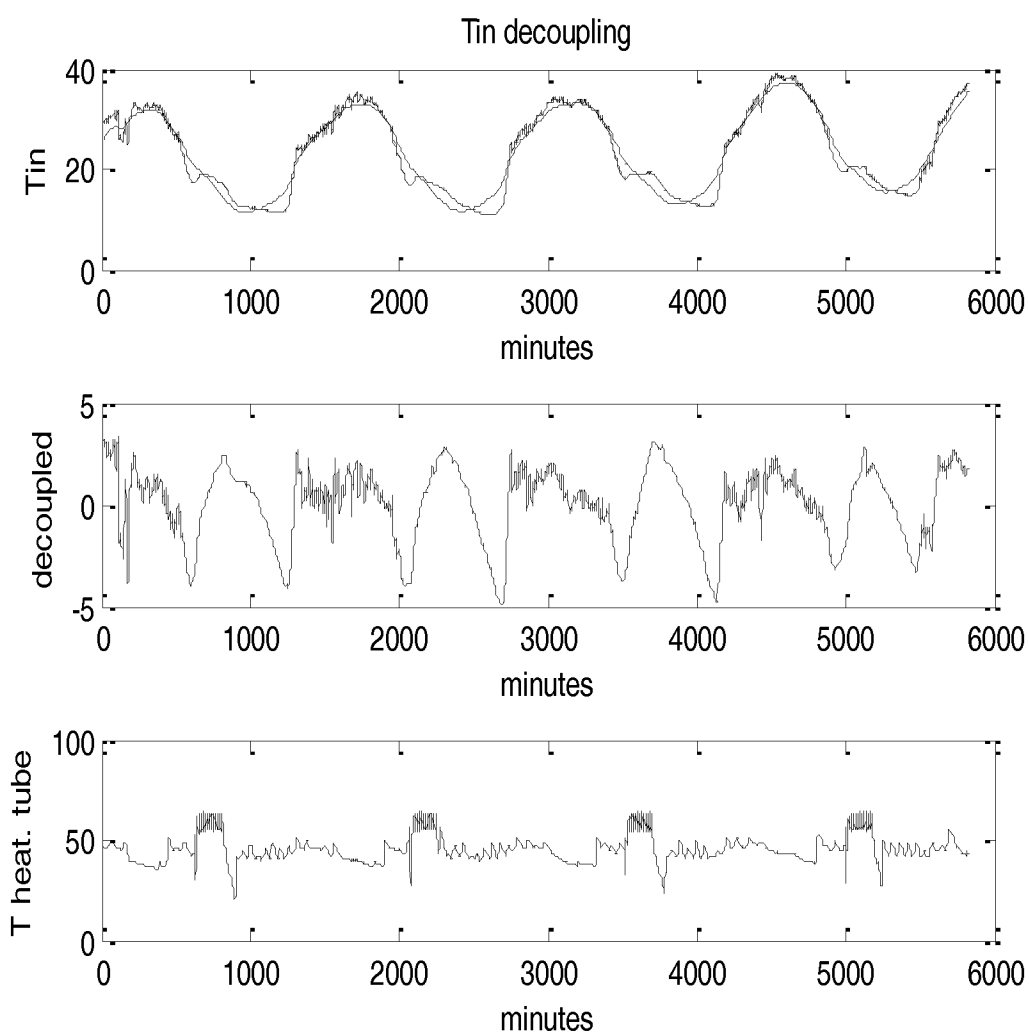
όπου, y_t είναι η παρατηρούμενη χρονική αλληλουχία, T_t είναι μια τάση ή μια συνιστώσα χαμηλής συχνότητας, C_t είναι μια συνεχής κυκλική ή ημικυκλική συνιστώσα (π.χ. ένας οικονομικός κύκλος) με περίοδο διαφορετική από αυτή των εποχιακών διακυμάνσεων των δεδομένων, S_t είναι μια εποχιακή συνιστώσα (π.χ. ετήσια εποχιακή διακύμανση); $f(u_t)$ είναι παράγοντας που αιχμαλωτίζει την επίδραση των εξωγενών μεταβλητών u_t , κατά περιπτώσεις συμπεριλαμβάνοντας στοχαστικές, μη γραμμικές, στατικές ή δυναμικές σχέσεις, N_t είναι ένα προσομοίωμα στοχαστικών ανωμαλιών, όπως σφάλματα προσομοιωμένα σαν μια διαδικασία Αυτό-Συμμεταβολής (Auto-Regression, AR process), και e_t είναι μια «ακανόνιστη»

συνιστώσα, συνήθως ορισμένη για ευκολία ανάλυσης ως μια κανονικώς κατανομημένη καμπύλη του Gauss με μηδενική μέση τιμή και παραλλακτικότητα σ^2 .

Παρά την γενικότητα της εξίσωσης αυτής, αξίζει να σημειωθεί ότι στην πλειονότητα των εφαρμογών δεν είναι απαραίτητη η χρήση όλων αυτών των συνιστωσών. Στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχουν κάποιες υπερ-παραμέτροι που παραμένουν ακαθόριστες και πρέπει να υπολογίζονται ξεχωριστά, πριν από τον υπολογισμό του προσομοιώματος. Μια προσέγγιση για την εκτίμηση των υπερ-παραμέτρων είναι οι μέθοδοι εκτίμησης των κυρίαρχων συχνοτήτων που αναφέρονται γενικώς προσεγγίζοντας το θεωρητικό ψευδο-φάσμα των προσομοιωμάτων ως προς το εμπειρικό ψευδο-φάσμα που προέρχεται άμεσα από τις χρονικές αλληλουχίες (Taylor *et al.*, 2007).

Στην παρούσα διατριβή, οι χρονικές αλληλουχίες που απαιτούσαν ανάλυση ήταν η καμπύλη της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας, συναρτήσεως του χρόνου. Οι μετρήσεις αφορούσαν τέσσερις ημέρες. Η συγκεκριμένη ανάλυση έγινε με σκοπό την απομάκρυνση της επίδρασης του φαινομένου ημέρας-νύχτας από τα δεδομένα μας. Δηλαδή, π.χ. η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι υψηλή, λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τη νύχτα μειώνεται λόγω έλλειψης αυτής. Το ίδιο συμβαίνει και εντός του θερμοκηπίου. Τις πρωινές ώρες η θερμοκρασία αυξάνεται, το μεσημέρι παραμένει για λίγο σταθερή και το απόγευμα μειώνεται, παραμένοντας πάλι σταθερή κάποιες ώρες το βράδυ (Εικόνα 3.11). Το αντίθετο, αλλά βασισμένο στην ίδια λογική, συμβαίνει και με τη σχετική υγρασία. Το σύστημα θέρμανσης του θερμοκηπίου ήταν ρυθμισμένο να κρατάει σταθερά 20°C διαφορά από την εξωτερική θερμοκρασία. Επομένως, όταν το σύστημα θέρμανσης λειτουργούσε τις απογευματινές ώρες, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία δεν παρέμεναν σταθερές, αλλά αυξομειώνονταν αναλογικά με τις εξωτερικές συνθήκες, όπως προαναφέρθηκε. Έτσι, για τον υπολογισμό της επίδρασης του συστήματος θέρμανσης στα χαρακτηριστικά του αέρα του θερμοκηπίου με τη βοήθεια προσομοιώματος, ήταν αναγκαίο να αφαιρεθεί η επίδραση ημέρας-νύχτας. Η επίδραση αυτή είναι ένα περιοδικό εποχιακό φαινόμενο που αντιμετωπίζεται ως υπερ-παραμέτρος και υπολογίζεται η συχνότητά της.

Η Εικόνα 3.10 αποτελείται από τρία διαγράμματα. Στο πρώτο διάγραμμα φαίνεται η καμπύλη της εσωτερικής θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) του θερμοκηπίου για τέσσερις ημέρες και η επίδραση του συστήματος θέρμανσης τις απογευματινές ώρες, με συνεχή γραμμή, καθώς και η τάση ημέρας-νύχτας με διακεκομμένη γραμμή. Στο δεύτερο διάγραμμα φαίνεται η θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$) στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, έχοντας αφαιρέσει την επίδραση ημέρας-νύχτας (decoupled). Έτσι, οι καμπύλες χωρίς διακυμάνσεις υποδηλώνουν την επίδραση του συστήματος θέρμανσης. Στο τρίτο διάγραμμα φαίνεται η θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$) του σωλήνα θέρμανσης, δηλαδή φαίνεται πότε ενεργοποιείται το σύστημα και πότε απενεργοποιείται κατά τη διάρκεια της ημέρας.



Εικόνα 3.10. Επίδραση του φαινομένου ημέρας-νύχτας στην εσωτερική θερμοκρασία του θερμοκηπίου και επίδραση του συστήματος θέρμανσης.

3.2.2.2 Transfer Function models

Έχοντας αφαιρέσει λοιπόν, από τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία την επίδραση της ημέρας και της νύχτας, έγινε προσπάθεια δημιουργίας TF προσομοιωμάτων, ικανά να περιγράψουν και να εξηγούν τις δυναμικές των χαρακτηριστικών του αέρα του θερμοκηπίου. Τα TF προσομοιώματα είναι πολύ σημαντικά στον τομέα της μηχανιστικής προσομοίωσης που βασίζεται σε μια σειρά δεδομένων και στα συστήματα ελέγχου που βασίζονται σε προσομοιώματα (Taylor *et al.*, 2007).

Τα SISO (simple-input simple-output, μονό-εισερχόμενο δεδομένο μονό-εξερχόμενο) TF προσομοιώματα αντιπροσωπεύονται από τον γενικό τύπο:

$$y_t = \frac{B(L)}{A(L)} u_t$$

όπου, y_t είναι τα εξερχόμενα δεδομένα, u_t είναι τα εισερχόμενα δεδομένα; $A(L)$ και $B(L)$ είναι πολυώνυμα που καθορίζονται από τα μεγέθη n και m , αντίστοιχα. Τέλος, L είναι η χρονική υστέρηση, όπου $L^j y_t = y_{t-j}$ (Taylor *et al.*, 2007).

$$A(L) = 1 + a_1 L + \dots + a_n L^n$$

$$B(L) = b_0 + b_1 L + \dots + b_m L^m$$

Στην παρούσα διατριβή θεωρήθηκε TF προσομοίωμα με τρία εισερχόμενα δεδομένα και ένα εξερχόμενο (Multiple-input Simple-output, MISO) που είχε την ακόλουθη μορφή (Young, 1984):

$$y(k) = \begin{bmatrix} B_1(z^{-1}) & B_2(z^{-1}) & B_3(z^{-1}) \\ A_1(z^{-1}) & A_2(z^{-1}) & A_3(z^{-1}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ u_3(k) \end{bmatrix} + \xi(k)$$

όπου: k είναι ο χρόνος δειγματοληψίας, $y(k)$ η εσωτερική θερμοκρασία του θερμοκηπίου [$^{\circ}\text{C}$] ή η εσωτερική σχετική υγρασία [%], $u_1(k)$ η θερμοκρασία του σωλήνα θέρμανσης του θερμοκηπίου [$^{\circ}\text{C}$], $u_2(k)$ η εξωτερική θερμοκρασία του αέρα [$^{\circ}\text{C}$] ή η εξωτερική σχετική υγρασία [%], $u_3(k)$ η καθαρή ακτινοβολία [W m^{-2}]. ξ είναι το σφάλμα που θεωρείται μηδενικό και z^{-1} η χρονική υστέρηση: $z^{-1}y(t) = y(t-1)$. $A_i(z^{-1})$

και $B_i(z^{-1})$ είναι κατάλληλα ορισμένες πολυωνυμικές παράμετροι του αντίστοιχου i της εισερχόμενης μεταβλητής u της μορφής:

$$A_i(z^{-1}) = 1 + a_{1,i}z^{-1} + a_{2,i}z^{-2} + \dots + a_{n_a,i}z^{-n_a}$$

$$B_i(z^{-1}) = b_{0,i} + b_{1,i}z^{-1} + b_{2,i}z^{-2} + \dots + b_{n_b,i}z^{-n_b}$$

όπου: a_j και b_j είναι οι εκτιμώμενες παράμετροι του προσομοιώματος και n_a, n_b είναι τα μεγέθη των αντίστοιχων πολυωνύμων.

Οι παράμετροι των προσομοιωμάτων εκτιμήθηκαν χρησιμοποιώντας την προσέγγιση Refined Instrumental Variable (RIV) (Young, 1984) όπως αναφέρεται στο εργαλείο CAPTAIN του MATLAB® (Taylor *et al.*, 2007).

Μια ευρέως διαδεδομένη προσέγγιση για την ταυτοποίηση του συστήματος αυτού, περιλαμβάνει τη χρήση διαφόρων στατιστικών κριτηρίων. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκαν δύο βασικά κριτήρια: ο Δείκτης Προσδιορισμού (R_T^2) και το YIC κριτήριο (Young Information Criterion, κριτήριο πληροφοριών του Young).

Ο Δείκτης Προσδιορισμού (R_T^2) είναι ένα στατιστικό μέτρο του πόσο καλά το προσομοίωμα εξηγεί τα δεδομένα: αν η παραλλακτικότητα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος του προσομοιώματος σ_e^2 δεν σχετίζεται πολύ με την παραλλακτικότητα των δεδομένων σ_y^2 , τότε ο R_T^2 τείνει στη μονάδα. Αντιθέτως, αν η σ_e^2 είναι παρόμοιου μεγέθους με την σ_y^2 , τότε ο δείκτης τείνει στο μηδέν (Παπαδήμας, 1995). Γενικά, οι επιτρεπόμενες τιμές για να θεωρηθεί ένα προσομοίωμα καλό είναι $R_T^2 > 0.75$. Ο Δείκτης αυτός ορίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$R_T^2 = 1 - \frac{\sigma_e^2}{\sigma_y^2}$$

Το κριτήριο YIC περιέχει δύο όρους. Ο πρώτος όρος είναι απλώς ένα σχετικό μέτρο του πόσο καλά το προσομοίωμα εξηγεί τα δεδομένα: όσο πιο μικρό μέσο τετραγωνικό σφάλμα του προσομοιώματος, τόσο πιο αρνητικός γίνεται ο όρος αυτός. Από την άλλη πλευρά, ο δεύτερος όρος προϋποθέτει ένα μέτρο της κατάστασης των συντελεστικών μεταβλητών που διέπουν την παραγωγική βάση δεδομένων: όταν το σύστημα αποτελείται από πολλές υπερ-παραμέτρους, τότε η αυτή η βάση δεδομένων θα τείνει στη μοναδικότητα. Δηλαδή, αυτός ο όρος δείχνει αν το προσομοίωμα μπορεί

να λειτουργήσει με άλλες παρόμοιες βάσεις δεδομένων ή αν δεν υπάρχουν όμοιες της αρχικής. Τα προσομοιώματα που μπορούν να προσαρμοστούν σε άλλες βάσεις δεδομένων προτιμώνται. Γενικά, όσο πιο αρνητική είναι η τιμή του YIC, τόσο καλύτερο είναι το προσομοίωμα (Taylor *et al.*, 2007). Το κριτήριο αυτό ορίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$YIC = \log_e \frac{\sigma^2}{\sigma_y^2} + \log_e \left(\frac{1}{np} \cdot \sum_{i=1}^{np} \left(\frac{\sigma^2 \cdot p_{ii}}{a_{ii}^2} \right) \right)$$

3.2.2.3. Ανάλυση της ιεραρχίας των μεταβλητών

Όπως προαναφέρθηκε, η εκτίμηση της ποιότητας των προσομοιωμάτων έγινε με βάση τα δύο προηγούμενα κριτήρια. Ωστόσο, θα πρέπει να μελετηθεί και η απλότητα του προσομοιώματος, ώστε να είναι πιο εύχρηστο (Bridges *et al.*, 1995). Έτσι, έγινε προσπάθεια να απλοποιηθούν οι ταυτοποιημένες δομές των προσομοιωμάτων, αφήνοντας εκτός του υπολογισμού μια από τις μεταβλητές κάθε φορά, ακολουθώντας νέος συντονισμός του προσομοιώματος. Επομένως, οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν εντέλει ήταν πολύ λιγότερες (3) από αυτές που υπολογίστηκαν αρχικά και τα απλοποιημένα δομής πλέον προσομοιώματα που επιλέχθηκαν συγκρίνονταν κάθε φορά με τα υπόλοιπα με τη χρήση του R_T^2 (Uchida *et al.*, 2003).

Η δομή του προσομοιώματος ορίζεται ως εξής: n_a είναι ο αριθμός που ορίζει την χρονική υστέρηση των εξερχόμενων δεδομένων και παίρνει τιμές από το 1 ως το 3, n_{bi} είναι ο αριθμός που ορίζει τη χρονική υστέρηση των εισερχόμενων δεδομένων με i την κάθε μια εισερχόμενη μεταβλητή και παίρνει τιμές από το 1 ως το 3 και d_i είναι ο αριθμός που ορίζει τη χρονική υστέρηση του σφάλματος και ορίστηκε να είναι σταθερά μηδενικό. Παράδειγμα, ένα προσομοίωμα με δομή [1 1 2 1 2 3 2 0] σημαίνει ότι είναι πρώτης τάξεως συνάρτηση, όπως υποδηλώνει ο πρώτος αριθμός (1), η πρώτη εισερχόμενη μεταβλητή ορίζεται από μια παράμετρο, όπως υποδηλώνει ο δεύτερος αριθμός (1), η δεύτερη εισερχόμενη μεταβλητή ορίζεται από δύο παραμέτρους, όπως υποδηλώνει ο τρίτος αριθμός (2), η τρίτη εισερχόμενη μεταβλητή ορίζεται από μια παράμετρο, όπως υποδηλώνει ο τέταρτος αριθμός (1), η πρώτη εισερχόμενη μεταβλητή έχει δύο λεπτά χρονική υστέρηση, όπως υποδηλώνει ο πέμπτος αριθμός (2), η δεύτερη εισερχόμενη μεταβλητή έχει τρία λεπτά χρονική υστέρηση, όπως υποδηλώνει ο έκτος αριθμός (3), η τρίτη εισερχόμενη μεταβλητή

έχει δύο λεπτά χρονική υστέρηση, όπως υποδηλώνει ο έβδομος αριθμός (2) και τέλος, το σφάλμα των μετρήσεων είναι μηδενικό, όπως υποδηλώνει ο όγδοος αριθμός (0).

Δοκιμάστηκαν 5184 προσομοιώματα για την ακρίβειά τους να προσομοιώνουν την μετρημένη από τους αισθητήρες εσωτερική θερμοκρασία του αέρα ή τη σχετική υγρασία του. Ως εισερχόμενα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν η θερμοκρασία του σωλήνα του συστήματος θέρμανσης, η εξωτερική θερμοκρασία ή σχετική υγρασία, αντίστοιχα, και η καθαρή ακτινοβολία που διαπερνούσε το θερμοκήπιο.

Κεφάλαιο 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1. ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

4.1.1. Εισαγωγή

Η θέρμανση του πειραματικού θερμοκηπίου, όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 3 προερχόταν είτε από ένα δίκτυο επιδαπέδιων σωλήνων είτε από ένα αξονικό αερόθερμο είτε από το συνδυασμό των επιδαπέδιων σωλήνων και του αξονικού αερόθερμου. Προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές συνθήκες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου πρέπει να δώσουμε μία ποσότητα θερμότητας με τη χρήση κάποιου συστήματος θέρμανσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η ποσότητα αυτής της θερμότητας ήταν δυνατό να δοθεί, στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, μέσω κάποιου από τα προαναφερθέντα συστήματα. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των μεταβολών θερμοκρασίας και υγρασίας κατά μήκος και καθ' ύψος του θερμοκηπίου, στο εσωτερικό αυτού, όπως διαμορφώθηκαν με την αλληλεπίδραση ενός συστήματος κυκλοφορίας αέρα, συγκεκριμένα αναμεικτής, παράλληλα με την χρήση των συστημάτων θέρμανσης.

Συγκεκριμένα:

- Μόνο συστήματα θέρμανσης (αερόθερμο – επιδαπέδια)
- Συνδυασμός συστημάτων θέρμανσης (αερόθερμο – επιδαπέδια) και αναμεικτή
- Συνδυασμός συστημάτων θέρμανσης (αερόθερμο – επιδαπέδια) και αναμεικτή ανά 10λεπτο λειτουργίας

4.1.2. Μόνο συστήματα θέρμανσης (αερόθερμο-επιδαπέδια)

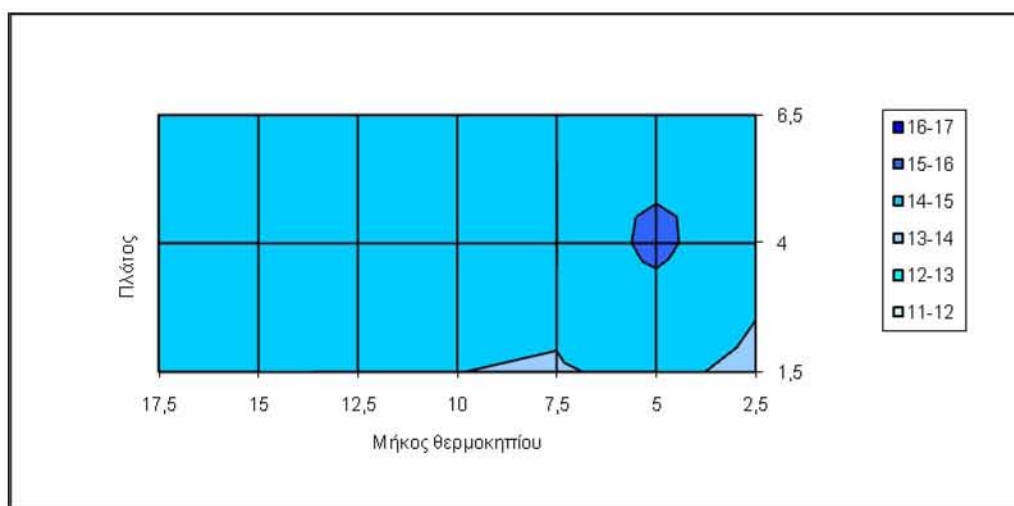
Χωρίς την εφαρμογή του συστήματος κυκλοφορίας του αέρα, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Για την διερεύνηση της κατανομής της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, ελέγχθησαν 4 διαφορετικές ημέρες. Τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν αφορούν τη χρονική περίοδο από 20:00 έως 8:00 και οι τιμές είναι ο μέσος όρος των μετρούμενων παραμέτρων ανά δεκάλεπτο.

Σημείωση: η επιλογή των ημερών έγινε με βάση την εξωτερική θερμοκρασία, επιλέχθηκαν μέρες που συμβάδιζαν οι εξωτερικές θερμοκρασίες σε κάθε μεταχείριση.

Μεταβολή θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου

Στο Σχήμα 4.1. παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου στο επίπεδο 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους.



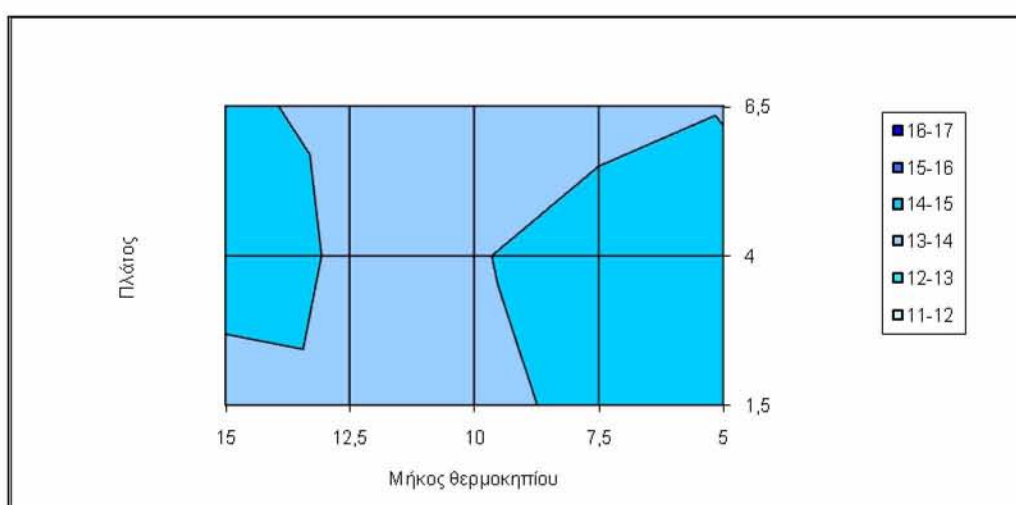
Σχήμα 4.1. Οριζόντια μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα στο επίπεδο του ύψους του ορθοστάτη πάνω από την καλλιέργεια, τις νυχτερινές ώρες, με χρήση συστημάτων θέρμανσης (αερόθερμο-επιδαπέδια) από 17/12 έως 18/12.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, η υψηλότερη θερμοκρασία σημειωνόταν στα 5 m μήκους και 4 πλάτους, από την είσοδο του θερμοκηπίου, με τιμή 15,2°C. Η τιμή της στο κέντρο του θερμοκηπίου, δηλαδή σε απόσταση 10 m από την είσοδο του θερμοκηπίου, ήταν 14,3°C. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι στο σημείο εισόδου του θερμοκηπίου και σε ύψος 3m από το έδαφος υπήρχε τοποθετημένο το αερόθερμο, το οποίο έστελνε τον ζεστό αέρα από το σημείο τοποθέτησής του προς το κέντρο του θερμοκηπίου.

Από τον συντελεστή μεταβλητότητας (CV), ο οποίος είναι της τάξεως του 3,03%, προκύπτει ότι παρουσιάζεται μεγάλη ομοιογένεια στις τιμές της θερμοκρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου, πάνω από το επίπεδο της καλλιέργειας.

Η επανάληψη της μέτρησης αυτής πραγματοποιήθηκε κατά τις νυχτερινές ώρες από 20/12 έως και 21/12. Η υψηλότερη θερμοκρασία σημειωνόταν στα 5m μήκους και 4 πλάτους, από την είσοδο του θερμοκηπίου, με τιμή 15,1°C. Η τιμή της στο κέντρο του θερμοκηπίου, δηλαδή σε απόσταση 10m από την είσοδο του θερμοκηπίου, ήταν 14,6°C. Η διαφορά αυτών των δύο θερμοκρασιών είναι παρόμοια με την προηγούμενη μέτρηση, για τους ίδιους λόγους. Επίσης, η τιμή του CV για τις ημέρες αυτές είναι 4,25%, που υποδηλώνει μεγάλη ομοιογένεια.

Στο Σχήμα 4.2. παρουσιάζεται η οριζόντια κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου στο επίπεδο 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 4.2. Οριζόντια μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα στο επίπεδο της καλλιέργειας, τις νυχτερινές ώρες, με χρήση συστημάτων θέρμανσης (αερόθερμο-επιδαπέδια) από 17/12 έως 18/12.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, η υψηλότερη θερμοκρασία σημειωνόταν στα 15 m μήκους και 4 πλάτους, από την είσοδο του θερμοκηπίου, με τιμή 14,4°C. Η τιμή της στο κέντρο του θερμοκηπίου, δηλαδή σε απόσταση 10 m από την είσοδο του θερμοκηπίου, ήταν 14,3°C.

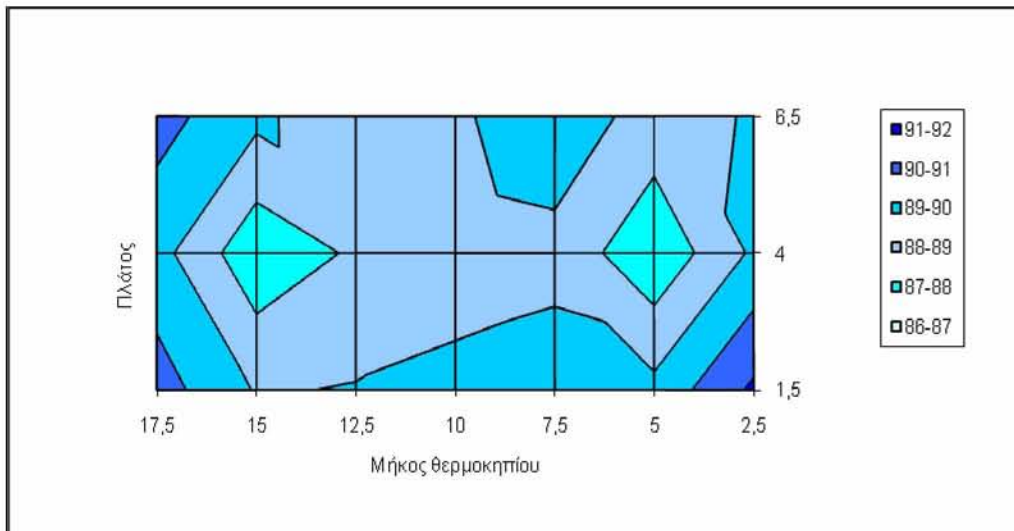
Από τον συντελεστή μεταβλητότητας (1,79%), προκύπτει ότι παρουσιάζεται μεγάλη ομοιογένεια στις τιμές της θερμοκρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου, σε ύψος 1,5 m από το έδαφος δηλαδή στο επίπεδο της καλλιέργειας. Διαπιστώνεται δηλαδή, μία μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή των θερμοκρασιών χωρίς μεγάλες αποκλίσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα, σε σχέση με τις τιμές της θερμοκρασίας πάνω από την καλλιέργεια.

Η επανάληψη των παραπάνω μετρήσεων που πραγματοποιήθηκε από 20/12 έως και 21/12, έδειξε παρόμοια αποτελέσματα με την υψηλότερη θερμοκρασία να σημειώνεται στα 10 m μήκους και 4 m πλάτους, από την είσοδο του θερμοκηπίου, με τιμή 14,5°C.

Από τον συντελεστή μεταβλητότητας (CV=2,16%), προκύπτει ότι παρουσιάζεται μεγάλη ομοιογένεια στις τιμές της θερμοκρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου, σε ύψος 1,5 m από το έδαφος δηλαδή στο επίπεδο της καλλιέργειας. Διαπιστώνεται για ακόμη μια φορά, μία μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή των θερμοκρασιών χωρίς μεγάλες αποκλίσεις, σε σχέση με τις μέσες τιμές των σημείων στην κορυφή του θερμοκηπίου που προαναφέρθηκαν. Η διαφορά αυτή στην ομοιογένεια της θερμοκρασίας μεταξύ των δύο επιπέδων, ίσως να οφείλεται στο γεγονός το αερόθερμο το οποίο είναι τοποθετημένο στο ύψος του κορφιά, στέλνει τον αέρα από τη μία άκρη του θερμοκηπίου προς την άλλη, χωρίς κάποιο μέσο κατανομής της θερμότητας, ενώ το σύστημα επιδαπέδιας θέρμανσης, το οποίο βρίσκεται τοποθετημένο κοντά στο έδαφος και συνεπώς κοντά στο επίπεδο των 1,5 m διοχέτευσε ομοιόμορφα την θερμότητα στο χώρο του θερμοκηπίου.

Μεταβολή σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου

Στο Σχήμα 4.3. παρουσιάζεται η μεταβολή της σχετικής υγρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου στο επίπεδο 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 4.3. Οριζόντια μεταβολή της σχετικής υγρασίας του αέρα στο επίπεδο του ύψους του ορθοστάτη πάνω από την καλλιέργεια, τις νυχτερινές ώρες, με χρήση συστημάτων θέρμανσης (αερόθερμο-επιδαπέδια) από 17/12 έως 18/12.

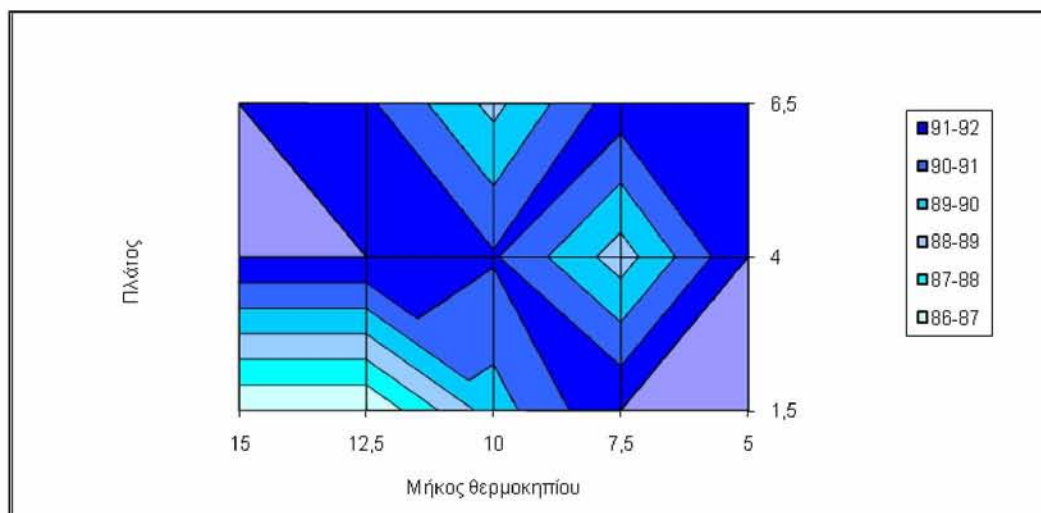
Από το αντίστοιχο σχήμα της σχετικής υγρασίας, η υψηλότερη τιμή καταγραφόταν, στα 2,5 m μήκους και 1,5 m πλάτους, από την είσοδο του θερμοκηπίου, με τιμή 91,2%. Το μικρότερο ποσοστό υγρασίας εμφανίζεται σε απόσταση 5m από είσοδο του θερμοκηπίου, η τιμή της οποίας φθάνει το 87,2%, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που προερχόταν από το αερόθερμο.

Από τον συντελεστή μεταβλητότητας ($CV=1,49\%$), προκύπτει ότι παρουσιάζεται μεγάλη ομοιογένεια στις τιμές της σχετικής υγρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου, πάνω από το επίπεδο της καλλιέργειας.

Κατά την επανάληψη των μετρήσεων από τις 20/12 έως τις 21/12 προέκυψε ότι η υψηλότερη τιμή της σχετικής υγρασίας που καταγράφεται στα 2,5 m μήκους και 1,5 m πλάτους, από την είσοδο του θερμοκηπίου, ήταν 87%. Το μικρότερο ποσοστό υγρασίας εμφανιζόταν σε απόσταση 5m από είσοδο του θερμοκηπίου, η τιμή της οποίας φθάνει το 81,2%, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που προέρχεται από το αερόθερμο.

Από τον συντελεστή μεταβλητότητας ($CV=2,20\%$), προκύπτει ότι παρουσιάζεται ομοίως μεγάλη ομοιογένεια στις τιμές της σχετικής υγρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου, πάνω από το επίπεδο της καλλιέργειας.

Στο Σχήμα 4.4. παρουσιάζεται η μεταβολή της σχετικής υγρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου στο επίπεδο 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 4.4. Οριζόντια μεταβολή της σχετικής υγρασίας του αέρα στο ύψος της καλλιέργειας, τις νυχτερινές ώρες, με χρήση συστημάτων θέρμανσης (αερόθερμο-επιδαπέδια) από 17/12 έως 18/12.

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι, στο επίπεδο αυτό, η σχετική υγρασία κυμαίνονταν σε αρκετά υψηλά επίπεδα ενώ σε μερικά σημεία, στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, φθάνει το 100%, δηλαδή ο αέρας είχε κορεσθεί (πλήρης συμπύκνωση). Η μικρότερη τιμή της σχετικής υγρασίας ήταν 72,7% και καταγράφηκε σε μήκος 15 m και πλάτος 1,5 m από την αρχή του θερμοκηπίου.

Από τον συντελεστή μεταβλητότητας ($CV=10,7\%$), προκύπτει ότι παρουσιάζεται μικρή ομοιογένεια στις τιμές της σχετικής υγρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου, σε ύψος 1,5 m από το έδαφος δηλαδή στο επίπεδο της καλλιέργειας. Διαπιστώνεται δηλαδή, μία μικρότερη ομοιομορφία στην κατανομή των τιμών σχετικής υγρασίας, με μεγάλες αποκλίσεις, όπως φαίνεται και στο σχήμα, σε αντίθεση με τις μέσες τιμές των σημείων στην κορυφή του θερμοκηπίου που αναφέρθηκαν.

Από την επανάληψη της μέτρησης στις 20/12 και 21/12 προκύπτει ότι για την σχετική υγρασία, ενδιάμεσα στην καλλιέργεια του πειράματος, αξιοσημείωτη είναι η χαμηλότερη τιμή της, 65,2% στα 15 m μήκους και 1,5 m πλάτους. Αντίθετα η υψηλότερη τιμή της παρατηρήθηκε στα 5 m μήκους και 1,5 m πλάτους από την είσοδο του θερμοκηπίου, πράγμα που παρατηρείται στις μέχρι τώρα μετρήσεις που

παρουσιάζονται, γεγονός που πιθανόν οφειλόταν σε σφάλμα μέτρησης του αισθητήρα.

Από τον συντελεστή μεταβλητότητας ($CV=13,76\%$), προκύπτει ότι παρουσιάζεται ετερογένεια στις τιμές της σχετικής υγρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου, σε ύψος 1,5 m από το έδαφος δηλαδή στο επίπεδο της καλλιέργειας, όπως και στην προηγούμενη μέτρηση. Διαπιστώνεται δηλαδή, ανομοιομορφία στην κατανομή των τιμών σχετικής υγρασίας, με μεγάλες αποκλίσεις, σε αντίθεση με τις μέσες τιμές των σημείων στην κορυφή του θερμοκηπίου που αναφέρθηκαν.

Η διαφορά αυτή στην ομοιογένεια της σχετικής υγρασίας μεταξύ των δύο επιπέδων, ίσως να οφείλεται στη διαπνοή των φυτών. Στο επίπεδο 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους, όπου βρίσκονταν τα φυτά, παρατηρήθηκε μεγάλη ετερογένεια των τιμών της σχετικής υγρασίας, διότι τα φυτά βρίσκονταν σε υψηλό στάδιο ανάπτυξης, κάλυπταν το μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειας του θερμοκηπίου και οι διεργασίες τους (αναπνοή, διαπνοή) γίνονταν όλο και πιο έντονα, λόγω της ηλικίας των φυτών, αλλά της λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης τις ώρες αυτές.

Έχει αποδειχθεί ότι όταν λειτουργεί το αερόθερμο, η απόλυτη υγρασία του αέρα είναι μεγαλύτερη στην περιοχή που καταλαμβάνεται από την καλλιέργεια (υψηλότερος ρυθμός διαπνοής). Καθώς όμως απομακρυνόμαστε από την περιοχή της καλλιέργειας, η απόλυτη υγρασία του αέρα είναι μικρότερη όταν λειτουργεί το αερόθερμο (Bartzanas, 2004).

Από τις μετρήσεις των τεσσάρων ημερών την περίοδο λειτουργίας μόνο των συστημάτων θέρμανσης, χωρίς την λειτουργία του αναμείκτη, πρόεκυψαν μέσες τιμές θερμοκρασιών $14,1^{\circ}\text{C}$ και $13,8^{\circ}\text{C}$ στα 2,5 m και στα 1 m, με αντίστοιχες τιμές σχετικής υγρασίας 86,7% και 88%. Δηλαδή, η κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα μειώνεται κατά $0,3^{\circ}\text{C}$ καθώς απομακρυνόμαστε από το πάνω μέρος της καλλιέργειας, μια διαφορά μικρή, σε αντίθεση με τη σχετική υγρασία που δεν παρουσίασε σε όλες τις περιπτώσεις μεγάλη ομοιομορφία.

Η επίδραση των σωλήνων θέρμανσης στην κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου διερευνήθηκε πειραματικά από τους Kempkes *et al.* (1999), Kittas *et al.* (2003), οι οποίοι βρήκαν σημαντικές διαφορές

στην κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου το οποίο θερμαίνεται από επιδαπέδιους σωλήνες.

4.1.3. Λειτουργία Συστημάτων Θέρμανσης (αερόθερμο – επιδαπέδιων σωλήνων) και συστήματος ανάμιξης του αέρα – Αναμείκτης αέρα

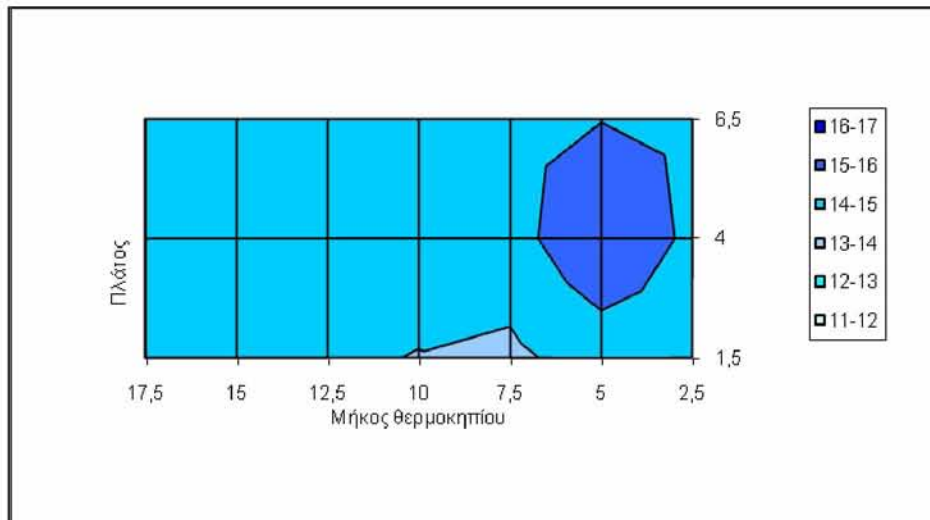
Με την εφαρμογή του συστήματος κυκλοφορίας του αέρα και των δύο συστημάτων θέρμανσης προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Για την διερεύνηση της κατανομής της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, ελέχθησαν 4 διαφορετικές ημέρες. Τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν αφορούν τη χρονική περίοδο από 20:00 έως 8:00 και οι τιμές είναι ο μέσος όρος των μετρούμενων παραμέτρων ανά δεκάλεπτο.

Σημείωση: η επιλογή των ημερών έγινε με βάση την εξωτερική θερμοκρασία, επιλέχθηκαν μέρες που συμβάδιζαν οι εξωτερικές θερμοκρασίες σε κάθε μεταχείριση.

Μεταβολή θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου

Στο Σχήμα 4.5. παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου στο επίπεδο 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 4.5. Οριζόντια μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα στο επίπεδο του ύψους του ορθοστάτη πάνω από την καλλιέργεια, τις νυχτερινές ώρες, με χρήση ανεμομίκτη και συστημάτων θέρμανσης (αερόθερμο- επιδαπέδια) από 10/12 έως 11/12.

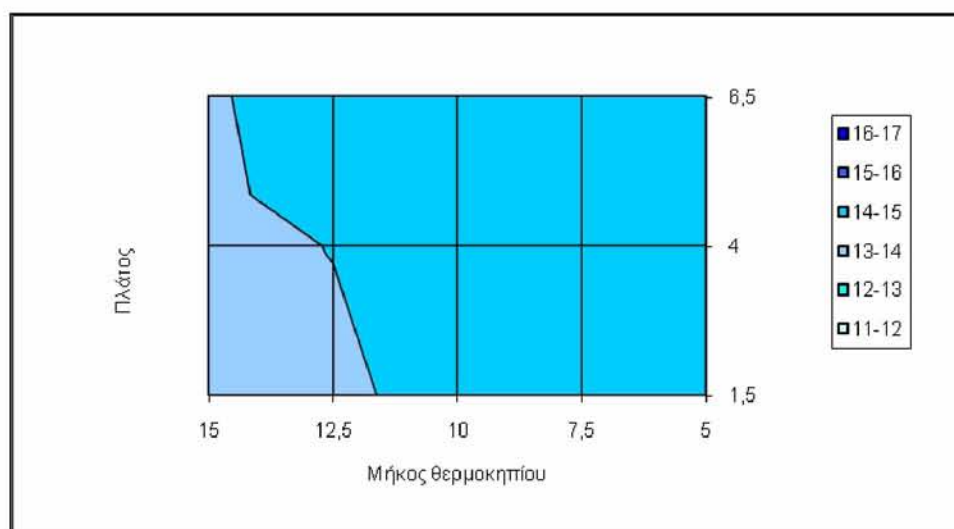
Από το σχήμα παρατηρούμε ότι η υψηλότερη θερμοκρασία σημειώνεται στα 5m μήκους και 4m πλάτους από την είσοδο του θερμοκηπίου, με μέσο όρο 15,7°C. Η αμέσως επόμενη υψηλότερη θερμοκρασία καταγράφηκε στα 17,5 m μήκους και 2,5 m πλάτους από την είσοδο του θερμοκηπίου, με μέσο όρο 14,9°C. Παρατηρείται μία ομοιογένεια στην κατανομή των θερμοκρασιών, αφού η χαμηλότερη καταγράφεται στους 13,9°C.

Από τον συντελεστή μεταβλητότητας ($CV=3,74\%$), προκύπτει ότι παρουσιάζεται μεγάλη ομοιογένεια στις τιμές θερμοκρασιών κατά μήκος του θερμοκηπίου, πάνω από το επίπεδο της καλλιέργειας.

Κατά την επανάληψη της μέτρησης στις 11/12 και 12/12 η υψηλότερη θερμοκρασία σημειώθηκε στα 5 m μήκους και 4 m πλάτους, από την είσοδο του θερμοκηπίου, με τιμή 15,8°C. Η τιμή της στο κέντρο του θερμοκηπίου, δηλαδή σε απόσταση 10 m από την είσοδο του θερμοκηπίου, είναι 14,6°C. Οι διαφορές αυτές των τιμών στις δύο μετρήσεις οφείλονται, όπως προαναφέρθηκε, στη θέση του αερόθερμου μέσα στο χώρο του θερμοκηπίου.

Ο συντελεστής μεταβλητότητας ήταν 4,61%, γεγονός που υποδηλώνει μεγάλη ομοιομορφία.

Στο Σχήμα 4.6. παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου στο επίπεδο 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 4.6. Οριζόντια μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα στο ύψος της καλλιέργειας, τις νυχτερινές ώρες, με χρήση ανεμομίκτη και συστημάτων θέρμανσης (αερόθερμο-επιδαπέδια) από 10/12 έως 11/12.

Όσον αφορά στις αντίστοιχες μετρήσεις θερμοκρασίας στο ύψος των φυτών της καλλιέργειας, παρατηρήθηκε μία ομοιομορφία ως προς την κατανομή τους με μικρό εύρος τιμών. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή της καταγράφηκε στα 10 m μήκους και 4m πλάτους από τη είσοδο του θερμοκηπίου ($14,8^{\circ}\text{C}$) ενώ η ελάχιστη στα 15 m μήκους και 2,5 m πλάτους ($13,8^{\circ}\text{C}$). Οι μετρήσεις που λάβαμε είναι αναμενόμενες διότι οι υψηλότερες τιμές της θερμοκρασίας παρατηρούνταν στα σημεία που βρίσκονται πλησιέστερα του αερόθερμου.

Από τον συντελεστή μεταβλητότητας ($CV=1,57\%$), προκύπτει ότι παρουσιάζεται μεγάλη ομοιογένεια στις τιμές της θερμοκρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου, σε ύψος 1,5 m από το έδαφος δηλαδή στο επίπεδο της καλλιέργειας. Διαπιστώνεται δηλαδή, μία μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή των θερμοκρασιών χωρίς μεγάλες αποκλίσεις, όπως φαίνεται και στο σχήμα, σε αντίθεση με τις μέσες τιμές των σημείων στην κορυφή του θερμοκηπίου όπου η ομοιομορφία του μικροκλίματος είναι μικρότερη.

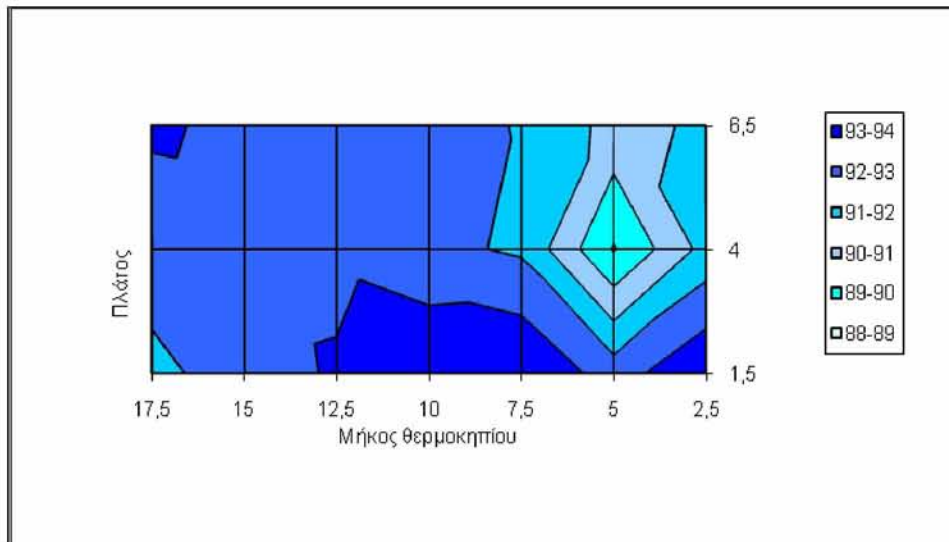
Κατά την επανάληψη της μέτρησης φαίνεται να υπάρχει μία μικρή πτώση της θερμοκρασίας όσο απομακρυνόμαστε από την είσοδο του θερμοκηπίου με την

ελάχιστη τιμή να είναι 13,7°C στα 15m από την είσοδο του θερμοκηπίου. Παρόλα αυτά παρουσιάστηκε μια ομοιογένεια στο μικροκλίμα με την διαφορά της χαμηλότερης (13,7°C) από την υψηλότερη (14,6°C) θερμοκρασία να είναι 0,9°C, όπως αποδεικνύεται και από τον CV που ήταν της τάξεως του 2,04%.

Διερευνήθηκε η επίδραση των συστημάτων θέρμανσης στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου τις νυχτερινές ώρες, χρησιμοποιώντας ένα πειραματικό θερμοκήπιο τύπου τούνελ με καλλιέργεια της τομάτας. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι η θερμοκρασία της καλλιέργειας ήταν χαμηλότερη από την θερμοκρασία του αέρα όμως η κατανομή της ήταν μεγαλύτερη την περίοδο μόνο του αερόθερμου, γεγονός που οδήγησε σε αύξηση της αεροδυναμικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας. Επίσης, η χρήση του αερόθερμου διερευνήθηκε για σκοπούς αφύγρανσης. Αποδείχθηκε ότι με το αερόθερμο, αν και η αγωγιμότητα μεταφοράς μάζας μέχρι τον κορεσμό ήταν υψηλότερη, η ροή συμπύκνωσης ήταν μικρότερη, με αποτέλεσμα τη μικρότερη συμπύκνωση στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος (Bartzanas et al., 2005).

Μεταβολή σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου

Στο Σχήμα 4.7. παρουσιάζεται η μεταβολή της σχετικής υγρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου στο επίπεδο 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 4.7. Οριζόντια μεταβολή της σχετικής υγρασίας του αέρα στο οριζόντιο επίπεδο 2,5m από την επιφάνεια του εδάφους τις νυχτερινές ώρες, με χρήση ανεμομίκτη και συστημάτων θέρμανσης (αερόθερμο- επιδαπέδια) από 10/12 έως 11/12.

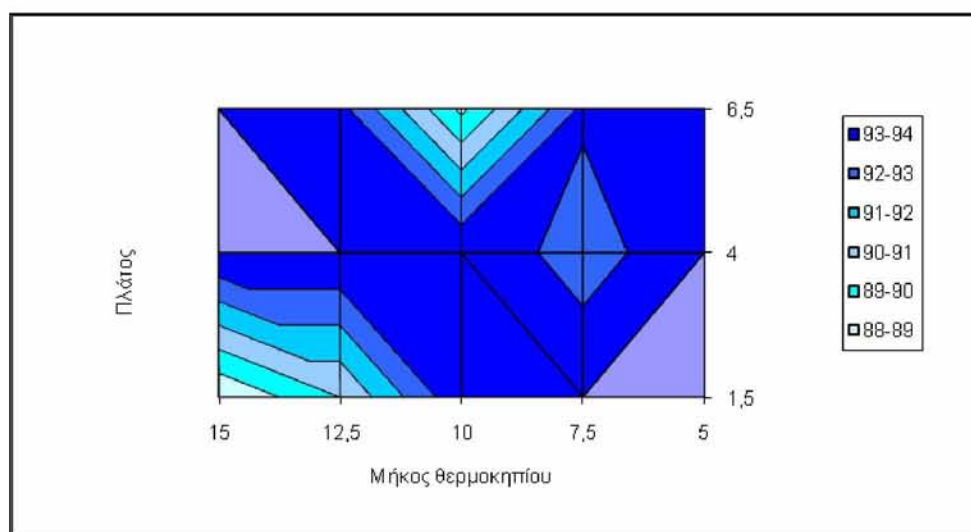
Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η σχετική υγρασία πάνω από την επιφάνεια των φυτών, δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφορές κατά το μήκος του θερμοκηπίου. Η διαφορά της υψηλότερης με την χαμηλότερη τιμή της σχετικής υγρασίας είναι 5,3%. Η υψηλότερη τιμή παρουσιάζεται στο κέντρο του θερμοκηπίου 94,2% ενώ η ελάχιστη 5 m από την είσοδο του θερμοκηπίου 88,9%. Για ακόμη μια φορά μεγάλο ρόλο παίζει η θέση του αερόθερμου.

Από τον συντελεστή μεταβλητότητας (1,73%), προκύπτει ότι παρουσιάζεται μεγάλη ομοιογένεια στις τιμές της σχετικής υγρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου, πάνω από το επίπεδο της καλλιέργειας.

Στην επαναληπτική μέτρηση φαίνεται ότι η σχετική υγρασία δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφορές κατά μήκος του θερμοκηπίου και πάνω από την επιφάνεια των φυτών. Έτσι στην συγκεκριμένη περίπτωση αν δεν συμπεριλάβουμε την τιμή 81% που βρισκόταν ακριβώς μπροστά από το αερόθερμο, η διαφορά της αμέσως επόμενης μικρότερης (85%) από την υψηλότερη (89%) είναι 4%.

Από τον συντελεστή μεταβλητότητας (2,72%), προκύπτει ότι παρουσιάζεται μεγάλη ομοιογένεια στις τιμές της σχετικής υγρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου, πάνω από το επίπεδο της καλλιέργειας.

Στο Σχήμα 4.8. παρουσιάζεται η μεταβολή της σχετικής υγρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου στο επίπεδο 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 4.8. Οριζόντια μεταβολή της σχετικής υγρασίας του αέρα στο οριζόντιο επίπεδο 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους τις νυχτερινές ώρες, με χρήση ανεμομίκτη και συστημάτων θέρμανσης (αερόθερμο- επιδαπέδια) από 10/12 έως 11/12.

Η σχετική υγρασία ενδιάμεσα στα φυτά, όπως φαίνεται παραπάνω, παρουσιάζει ανομοιογένεια, με την διαφορά της μεγαλύτερης από την μικρότερη τιμή της σχετικής υγρασίας, να φτάνει το 10%. Πολύ πιθανόν αυτή η διαφορά να οφείλεται σε λάθος μετρήσεις των αισθητήρων που βρίσκονται ενδιάμεσα στην καλλιέργεια.

Από τον συντελεστή μεταβλητότητας (8,04%), προκύπτει ότι παρουσιάζεται ομοιογένεια, αν και μικρή, στις τιμές της σχετικής υγρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου, σε ύψος 1,5 m από το έδαφος δηλαδή στο επίπεδο της καλλιέργειας.

Στην επαναληπτική μέτρηση παρατηρείται ότι οι τιμές της σχετικής υγρασίας, ενδιάμεσα στα φυτά παρουσίασαν ανομοιογένεια, με την υψηλότερη να βρίσκεται στο κέντρο του θερμοκηπίου και να είναι 94,2% ενώ η μικρότερη στα 7,5 m από την είσοδο του θερμοκηπίου με τιμή 84%. Απόδειξη αποτελεί ο συντελεστής μεταβλητότητας με τιμή $CV=11,47\%$.

Από τις μετρήσεις των τεσσάρων ημερών την περίοδο λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης μαζί με την λειτουργία του αναμεικτε αέρα, προκύπτουν μέσες τιμές θερμοκρασιών 14,4°C και 14°C στα 2,5 m και στα 1,5 m, με αντίστοιχες τιμές

σχετικής υγρασίας 89,7% και 92%. Δηλαδή, η κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα μειώνεται κατά 0,4°C καθώς απομακρυνόμαστε από το πάνω μέρος της καλλιέργειας και η κατανομή της σχετικής υγρασίας αυξάνεται κατά 2,3%.

Τα αποτελέσματα αυτής της μεταχείρισης ήταν παρόμοια με αυτά της χρήσης των συστημάτων θέρμανσης, χωρίς την ανάδευση του αέρα. Αποδείχθηκε λοιπόν ότι η θερμοκρασία παρουσίασε μεγαλύτερη ομοιογένεια στο επίπεδο της καλλιέργειας, ενώ η σχετική υγρασία στο επίπεδο πάνω από την καλλιέργεια.

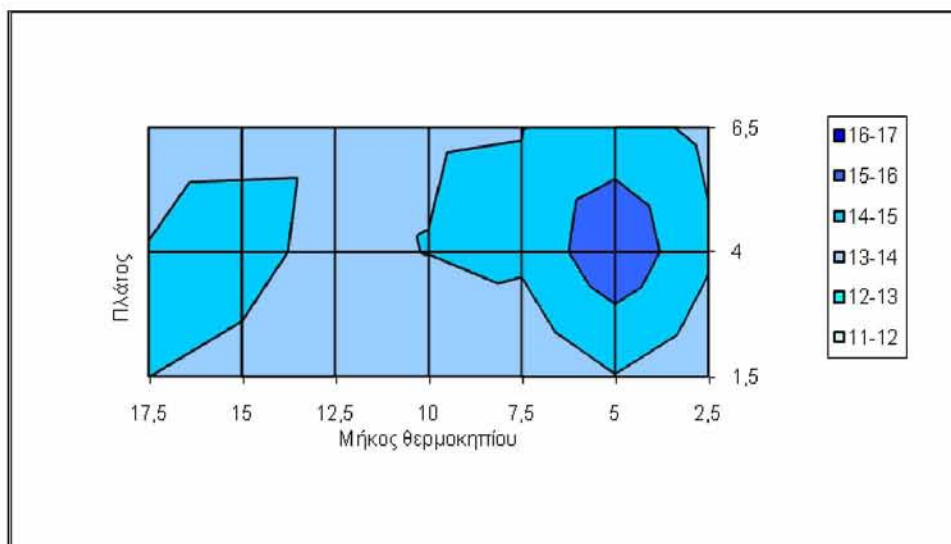
4.1.4. Λειτουργία Συστημάτων Θέρμανσης και συστήματος ανάμιξης του αέρα-Αναμείκτης, ανά δεκάλεπτο λειτουργίας.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι μεταβολές της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, κατά μήκος του θερμοκηπίου, εφαρμόζοντας δύο διαφορετικές μεταχειρίσεις. Κατά την διάρκεια της νύχτας ρυθμίστηκε, ηλεκτρονικά, ο αναμείκτης αέρα, με χρονοδιακόπτη έτσι ώστε να λειτουργεί κάθε μισή ώρα για δέκα λεπτά. Ταυτόχρονα είναι σε λειτουργία και τα δύο συστήματα θέρμανσης. Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκαν 4 διαφορετικές μέρες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

Τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν αφορούν τη χρονική περίοδο από 20:00 έως 8:00 και οι τιμές είναι ο μέσος όρος των μετρούμενων παραμέτρων ανά δεκάλεπτο.

Μεταβολή θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου

Στο Σχήμα 4.9. παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου στο επίπεδο 2,5m από την επιφάνεια του εδάφους.



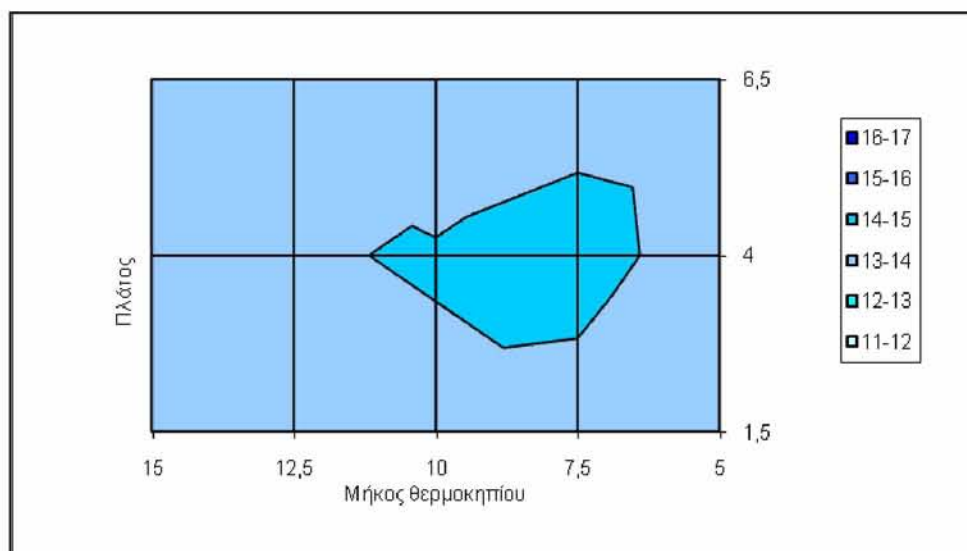
Σχήμα 4.9. Οριζόντια μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα στο επίπεδο του ύψους του ορθοστάτη πάνω από την καλλιέργεια, τις νυχτερινές ώρες, με χρήση συστημάτων θέρμανσης (αερόθερμο – επιδαπέδια) και λειτουργία αναμεικτή κάθε μισή ώρα για 10 λεπτά, από 19/12 έως 20/12.

Στο παραπάνω σχήμα, η υψηλότερη μέση τιμή θερμοκρασίας εμφανίστηκε στα 5 m από την είσοδο του θερμοκηπίου και ανέρχεται στους 15°C. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο διότι το σημείο βρίσκεται πλησιέστερα στα συστήματα θέρμανσης. Στο κέντρο του θερμοκηπίου, η μέση θερμοκρασία κυμαίνεται στους 14,5°C. Αντίθετα, η χαμηλότερη θερμοκρασία καταγράφηκε στα 2,5 m από την είσοδο του θερμοκηπίου, με μέσο όρο 13,1°C.

Από τον συντελεστή μεταβλητότητας (4,16%), προκύπτει ότι παρουσιάζεται μεγάλη ομοιογένεια στις τιμές θερμοκρασιών κατά μήκος του θερμοκηπίου, πάνω από το επίπεδο της καλλιέργειας.

Κατά την επαναληπτική μέτρηση από 23/12 έως 24/12 παρατηρήθηκε ότι η υψηλότερη θερμοκρασία σημειώνεται 5 m μήκους και 4 m πλάτους από την είσοδο του θερμοκηπίου, με τιμή 15,2°C. Η αμέσως επόμενη υψηλότερη θερμοκρασία καταγράφηκε στα 15 m μήκους και 4 m πλάτους από την είσοδο του θερμοκηπίου, με τιμή 14,5°C. Από τον συντελεστή μεταβλητότητας (3,40%) παρατηρείται μία ομοιογένεια στην κατανομή των θερμοκρασιών, αφού η χαμηλότερη καταγράφεται στους 13,5°C.

Στο Σχήμα 4.10. παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου στο επίπεδο 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 4.10. Οριζόντια μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα στο ύψος της καλλιέργειας, τις νυχτερινές ώρες, με χρήση συστημάτων θέρμανσης (αερόθερμο – επιδαπέδια) και λειτουργία αναμείκτη κάθε μισή ώρα για 10 λεπτά, από 19/12 έως 20/12.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, η υψηλότερη θερμοκρασία σημειώθηκε στα 10 m μήκους και 4 πλάτους, από την είσοδο του θερμοκηπίου, με τιμή 14,5°C, ενώ η χαμηλότερη στα 13 m μήκους και 1,5 m πλάτους από την είσοδο.

Από τον συντελεστή μεταβλητότητας (3,13%), προκύπτει ότι παρουσιάζεται μεγάλη ομοιογένεια στις τιμές της θερμοκρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου, σε ύψος 1,5 m από το έδαφος δηλαδή στο επίπεδο της καλλιέργειας. Διαπιστώνεται δηλαδή, μία μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή των θερμοκρασιών χωρίς μεγάλες αποκλίσεις, όπως φαίνεται και στο σχήμα, σε αντίθεση με τις μέσες τιμές των σημείων στην κορυφή του θερμοκηπίου όπου η ομοιομορφία του μικροκλίματος είναι μικρότερη.

Από την επαναληπτική μέτρηση φαίνεται ότι η υψηλότερη θερμοκρασία σημειώθηκε στα 10 m μήκους και 4 m πλάτους, από την είσοδο του θερμοκηπίου, με τιμή 14,6°C. Διαπιστώνεται, μία ομοιομορφία στην κατανομή των θερμοκρασιών

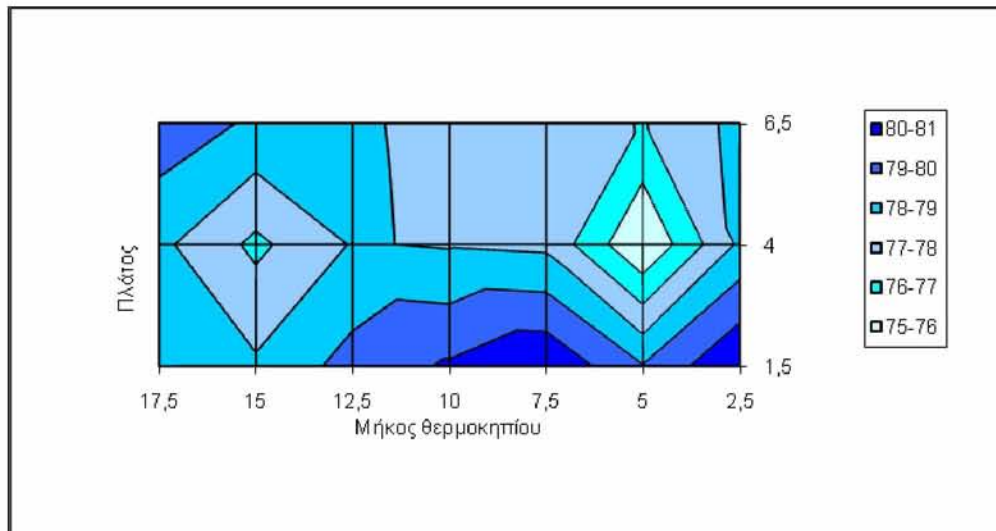
χωρίς μεγάλες αποκλίσεις, όπως φαίνεται και στο γράφημα, σε αντίθεση με τις μέσες τιμές των σημείων στην κορυφή του θερμοκηπίου που αναφέρθηκαν. Ο συντελεστής μεταβλητότητας ήταν 2,21%, τιμή που υποδηλώνει μεγάλη ομοιομορφία όπως και στην προηγούμενη μέτρηση.

Γενικά, η διαφορά της ομοιομορφίας μεταξύ των δύο επιπέδων, δεν ήταν τόσο μεγάλη όσο στις προηγούμενες μεταχειρίσεις, όπου η θερμοκρασία πάνω από την καλλιέργεια παρουσίαζε πολύ μικρότερη ομοιομορφία σε σχέση με το χαμηλότερο επίπεδο. Αυτό θα επανεξεταστεί και παρακάτω.

Μελετήθηκαν οι επιπτώσεις ενός συστήματος θέρμανσης σε διαφορετικά σημεία του θερμοκηπίου για την κατανομή και την ομοιομορφία της θερμοκρασίας του αέρα και της θερμοκρασίας του φυλλώματος. Το σύστημα αυτό που αποτελούνταν από σωλήνες ζεστού νερού, τοποθετήθηκε πάνω από την κορυφή της καλλιέργειας σε έξι διαφορετικά ύψη (0,25, 0,5, 0,75, 1,0, 1,25 και 1,45 m) και συγκρίθηκε με ένα εναέριο σύστημα θέρμανσης (αερόθερμο) που τοποθετήθηκε 1,6m πάνω από την κορυφή του φυλλώματος. Η θέρμανση με τους σωλήνες ζεστού νερού επηρέασε την κατανομή και την ομοιομορφία της θερμοκρασίας του αέρα στο θερμοκήπιο: η αλλαγή στην κατανομή της θερμοκρασίας ήταν στενά συνδεδεμένη με την θέση των σωλήνων θέρμανσης. Η θερμοκρασία του φύλλου συσχετιζόταν με την θερμοκρασία του αέρα, παρόλα αυτά δεν επηρεάστηκε από τη θέση των σωλήνων θέρμανσης (Andersson, 2009).

Μεταβολή σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου

Στο Σχήμα 4.11. παρουσιάζεται η μεταβολή της σχετικής υγρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου στο επίπεδο 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους.



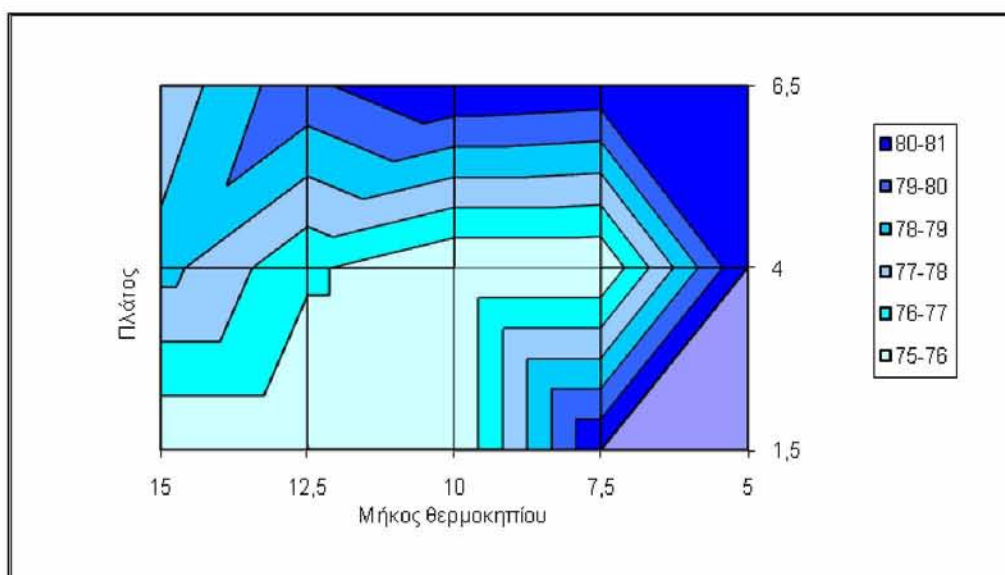
Σχήμα 4.11. Οριζόντια μεταβολή της σχετικής υγρασίας του αέρα στο επίπεδο του ύψους του ορθοστάτη πάνω από την καλλιέργεια, τις νυχτερινές ώρες, με χρήση συστημάτων θέρμανσης (αερόθερμο – επιδαπέδια) και λειτουργία αναμεικτή κάθε μισή ώρα για 10 λεπτά, από 19/12 έως 20/12.

Από το σχήμα της σχετικής υγρασίας, πάνω από την καλλιέργεια του πειράματος, παρατηρείται ότι υπάρχει μία ψηλότερη τιμή που καταγράφεται, στα 2,5 m μήκους και 1,5 m πλάτους, από την είσοδο του θερμοκηπίου, με τιμή 81%. Το μικρότερο ποσοστό υγρασίας εμφανίστηκε σε απόσταση 5 m από είσοδο του θερμοκηπίου, η τιμή της οποίας φθάνει το 75%, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που προέρχεται από το αερόθερμο.

Από τον συντελεστή μεταβλητότητας (2,48%), προκύπτει ότι παρουσιάζεται μεγάλη ομοιογένεια στις τιμές της σχετικής υγρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου, πάνω από το επίπεδο της καλλιέργειας.

Στην επαναληπτική μέτρηση παρατηρείται ότι υπάρχουν τρία σημεία που παρουσιάζουν μικρότερη τιμή σχετικής υγρασίας σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία, που είναι τοποθετημένοι οι αισθητήρες. Παρόλα αυτά, η διαφορά ανάμεσα στην χαμηλότερη τιμή σχετικής υγρασίας (83,3%) από την υψηλότερη τιμή σχετικής υγρασίας (88,5%), είναι 5,2%. Έχουμε μία ομοιομορφία της τάξεως του $CV=1,87\%$ πάνω από το επίπεδο της καλλιέργειας.

Στο σχήμα 4.12. παρουσιάζεται η μεταβολή της σχετικής υγρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου στο επίπεδο 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 4.12. Οριζόντια μεταβολή της σχετικής υγρασίας του αέρα στο ύψος της καλλιέργειας, τις νυχτερινές ώρες, με χρήση συστημάτων θέρμανσης (αερόθερμο – επιδαπέδια) και λειτουργία αναμείκτη κάθε μισή ώρα για 10 λεπτά, από 19/12 έως 20/12.

Η σχετική υγρασία ενδιάμεσα στα φυτά, όπως φαίνεται παραπάνω, παρουσιάζει ανομοιογένεια, με την διαφορά της μεγαλύτερης από την μικρότερη, τιμής της σχετικής υγρασίας να φτάνει το 20%. Πολύ πιθανόν αυτή η διαφορά να οφείλεται σε λάθος μετρήσεις των αισθητήρων που βρίσκονται ενδιάμεσα στην καλλιέργεια.

Από τον συντελεστή μεταβλητότητας (8,1%), προκύπτει ότι η ομοιογένεια στις τιμές της σχετικής υγρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου είναι σε αποδεκτά όρια (<10%) αλλά όχι τόσο υψηλή όσο ήταν στην κορυφή του θερμοκηπίου.

Κατά την επαναληπτική μέτρηση, η τιμή του CV ήταν 6,8%, γεγονός που υποδηλώνει ότι υπήρχε σχετικά υψηλή ομοιομορφία μεταξύ των τιμών της σχετικής υγρασίας, αλλά όχι τόσο υψηλή όσο στην κορυφή του θερμοκηπίου.

Παρατηρείται για ακόμη μια φορά, ότι η διαφορά της ομοιομορφίας μεταξύ των δύο επιπέδων, σε σχέση με τις προηγούμενες μεταχειρίσεις, είναι μικρότερη όταν λειτουργεί ο αναμείκτης αέρα κάθε μισή ώρα για δέκα λεπτά.

Από τις μετρήσεις των τεσσάρων ημερών την περίοδο λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης μαζί με την λειτουργία του αναμεικτή, ανά δεκάλεπτο λειτουργίας, προκύπτουν μέσες τιμές θερμοκρασιών 14°C και 13,7°C στα 2,5 m και στα 1,5 m, με αντίστοιχες τιμές σχετικής υγρασίας 82,5% και 84,5%. Δηλαδή, η κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα μειώνεται κατά 0,3°C καθώς απομακρυνόμαστε από το πάνω μέρος της καλλιέργειας.

Πειράματα διεξήχθησαν προκειμένου να μελετηθεί η συνδυασμένη χρήση των σωλήνων θέρμανσης και του αερόθερμου και διαπιστώθηκε ότι αυξήθηκε η δραστηριότητα των φυτών ενώ μειώθηκε το ποσοστό συμπύκνωσης. Αυτή η μέθοδος θέρμανσης οδήγησε σε αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας μέχρι και 19% αλλά δημιούργησε επίσης μία ανομοιογενή κατανομή του μικροκλίματος στην περίπτωση κατά την οποία χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι σωλήνες θέρμανσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο όγκος του αέρα του θερμοκηπίου είναι χωρισμένος σε δύο περιοχές, τη μία που καταλαμβάνει η καλλιέργεια όπου κυριαρχεί η φυσική συναγωγή και την άλλη πάνω από την καλλιέργεια όπου ο ζεστός αέρας από το σύστημα θέρμανσης οδήγησε σε ένα διαφορετικό μικροκλίμα (Tadj et al., 2010).

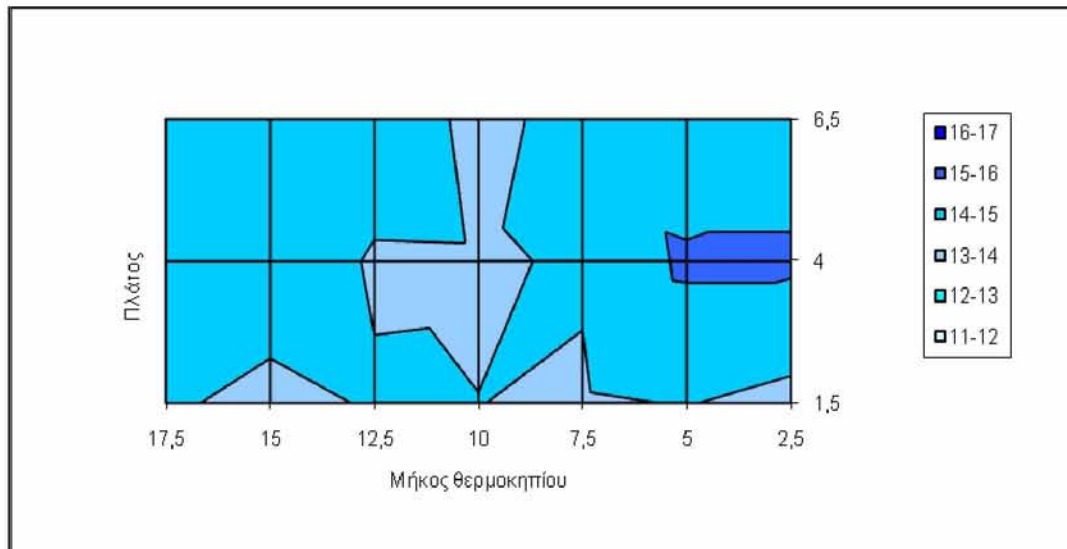
4.1.5. Σύγκριση των 3^{ων} διαφορετικών μεταχειρίσεων.

Τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν αφορούν τη χρονική περίοδο από 20:00 έως 8:00 και οι τιμές είναι ο μέσος όρος των μετρούμενων παραμέτρων, από όλους τους αισθητήρες, που είχαν τοποθετηθεί στο θερμοκήπιο.

Μεταβολή θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου

Μόνο συστήματα θέρμανσης (αερόθερμο – επιδαπέδια)

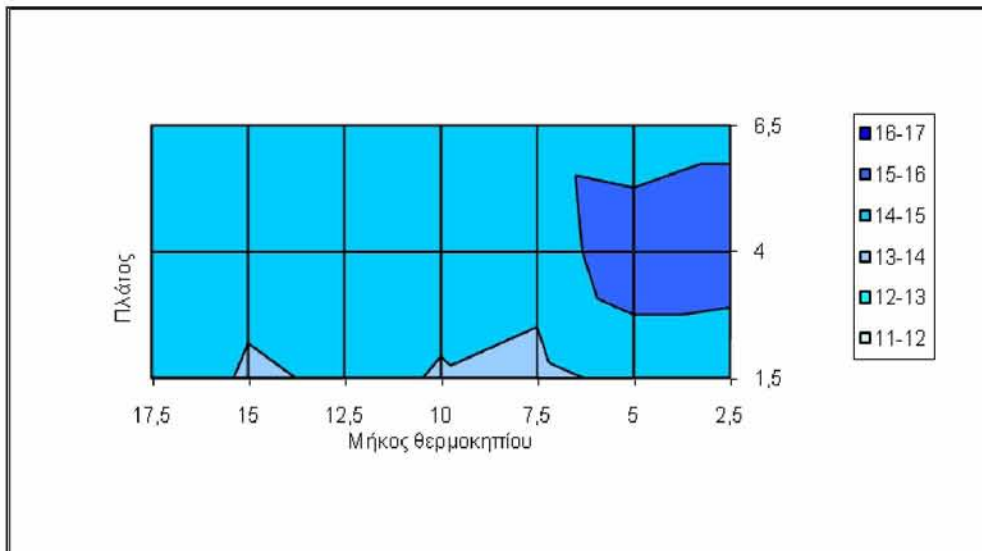
Στο παρακάτω σχήμα παριστάνεται, η μεταβολή της θερμοκρασίας, στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, με την εφαρμογή των συστημάτων θέρμανση (αερόθερμο – επιδαπέδια), από 17/12 έως 18/12.



Σχήμα 4.13. Μεταβολή της θερμοκρασίας, στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, με την εφαρμογή των συστημάτων θέρμανση (αερόθερμο – επιδαπέδια), από 17/12 έως 18/12.

Από το συντελεστή μεταβλητότητας (2,85%), αλλά και από το σχήμα, φαίνεται μία ομοιομορφία στις θερμοκρασίες, κατά μήκος του θερμοκηπίου. Η υψηλότερη θερμοκρασία καταγράφεται από τον αισθητήρα 9, που είναι τοποθετημένος 4m από την είσοδο του θερμοκηπίου.

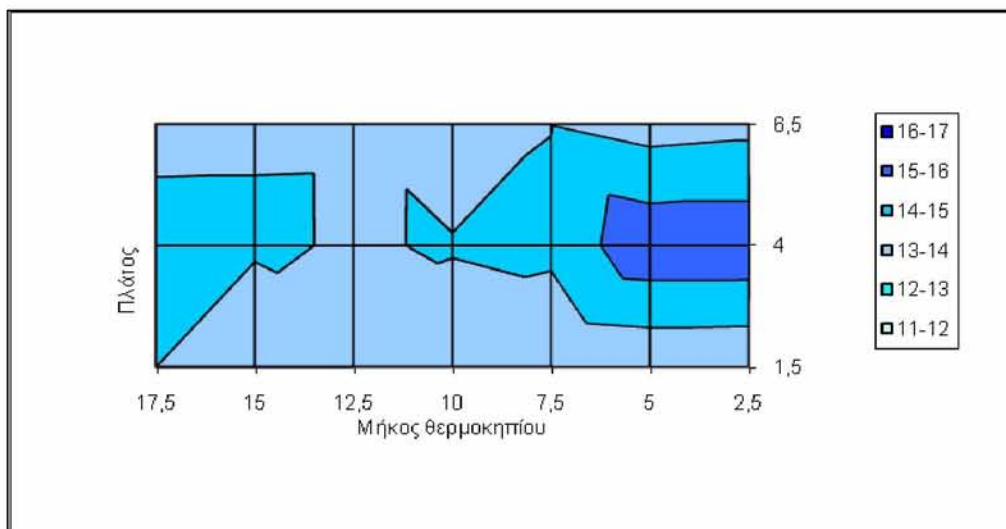
Λειτουργία Συστημάτων Θέρμανσης (αερόθερμο – επιδαπέδιων σωλήνων) και συστήματος ανάμιξης του αέρα – Αναμείκτης



Σχήμα 4.14. Κατανομή της θερμοκρασίας με λειτουργία Συστημάτων Θέρμανσης (αερόθερμο – επιδαπέδιων σωλήνων) και συστήματος ανάμιξης του αέρα – Αναμείκτης, από 10/12 έως 11/12.

Από το συντελεστή μεταβλητότητας (3,26%), αλλά και από το παραπάνω σχήμα, παρουσιάζεται μία ομοιομορφία στις θερμοκρασίες, κατά μήκος του θερμοκηπίου.

Λειτουργία Συστημάτων Θέρμανσης και συστήματος ανάμιξης του αέρα – Αναμείκτης, ανά δεκάλεπτο λειτουργίας.



Σχήμα 4.15. Κατανομή της θερμοκρασίας με λειτουργία Συστημάτων Θέρμανσης (αερόθερμο – επιδαπέδιων σωλήνων) και συστήματος ανάμιξης του αέρα – Αναμείκτης, ανά δεκάλεπτο λειτουργίας, από 23/12 έως 24/12.

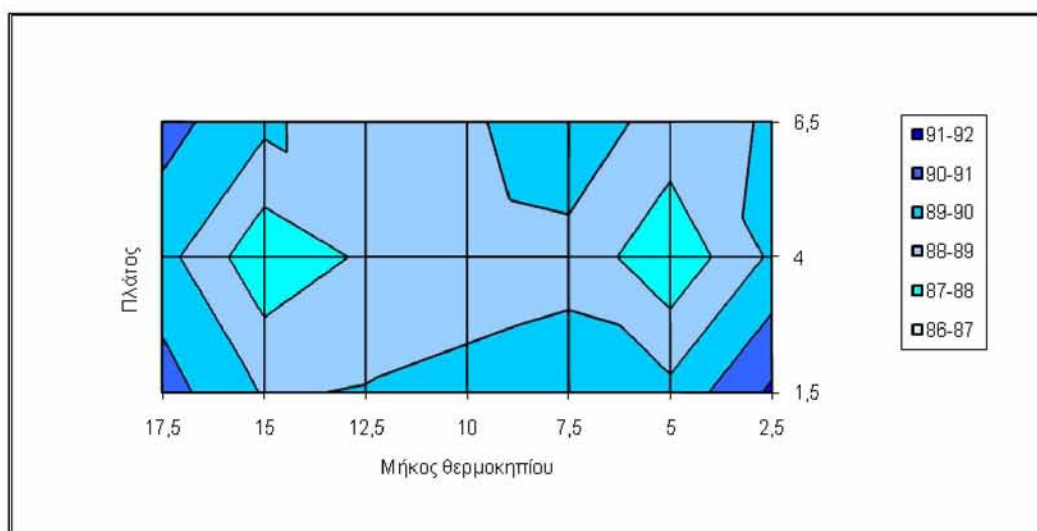
Από το συντελεστή μεταβλητότητας (3,07%), αλλά και από το γράφημα, παρουσιάζεται μία ομοιομορφία στις θερμοκρασίες, κατά μήκος του θερμοκηπίου.

Από τα παραπάνω προκύπτει, ότι δεν υπάρχει στατιστικώς μεγάλη διαφορά στην κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου και οι τιμές δεν παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις, ανεξάρτητα με ποια μεταχείριση εφαρμόζουμε, αφού ο συντελεστής CV και στις τρεις περιπτώσεις είναι πολύ μικρότερος από το 10%.

Μεταβολή σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου

Μόνο συστήματα θέρμανσης (αερόθερμο – επιδαπέδια)

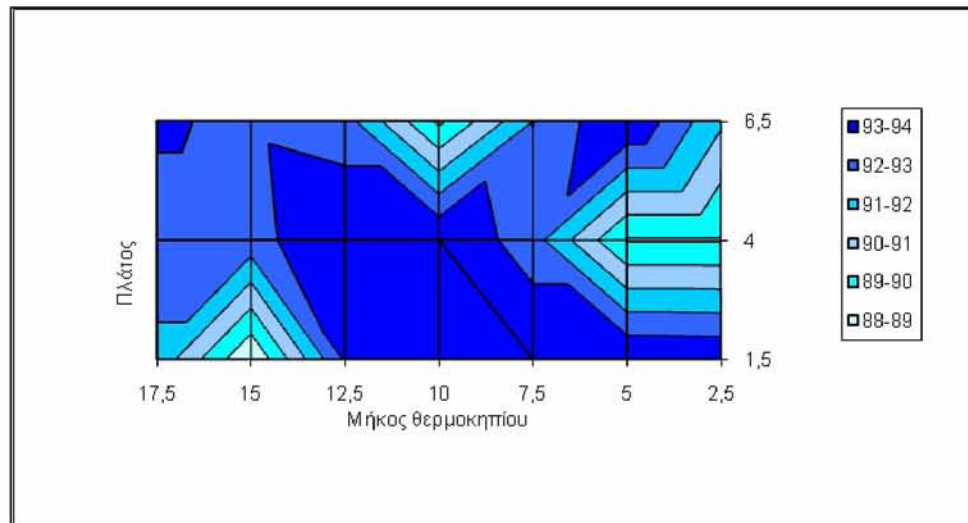
Στο παρακάτω σχήμα παριστάνεται, η μεταβολή των τιμών της σχετικής υγρασίας, στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, με την εφαρμογή των συστημάτων θέρμανση (αερόθερμο – επιδαπέδια), από 17/12 έως 18/12.



Σχήμα 4.16. Μεταβολή της σχετικής υγρασίας, στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, με την εφαρμογή των συστημάτων θέρμανση (αερόθερμο – επιδαπέδια), από 17/12 έως 18/12.

Από το συντελεστή μεταβλητότητας (6,31%), συμπεράνουμε ότι παρουσιάζεται μία μικρή ομοιομορφία στις τιμές σχετικής υγρασίας, κατά μήκος του θερμοκηπίου.

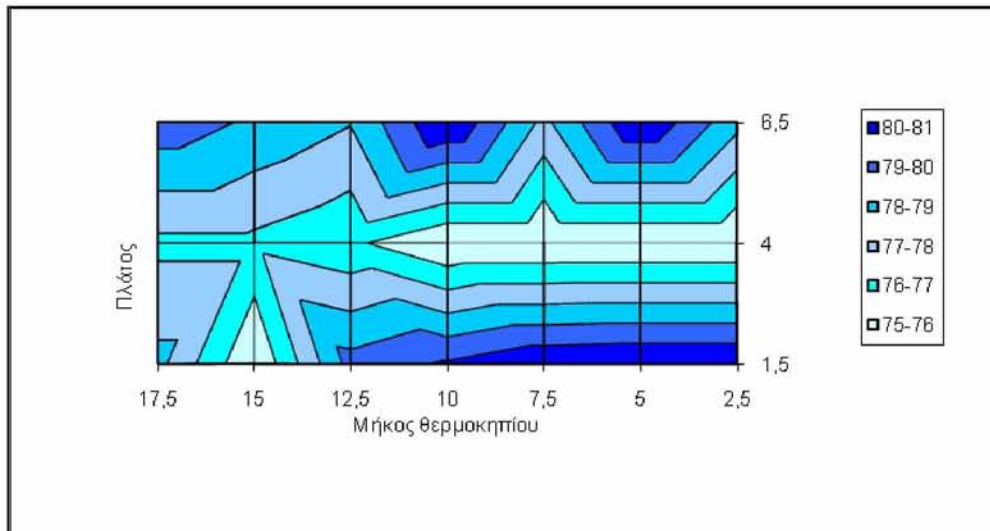
Λειτουργία Συστημάτων Θέρμανσης (αερόθερμο – επιδαπέδιων σωλήνων) και συστήματος ανάμιξης του αέρα – Αναμείκτης



Σχήμα 4.17. Κατανομή της σχετικής υγρασίας με λειτουργία Συστημάτων Θέρμανσης (αερόθερμο – επιδαπέδιων σωλήνων) και συστήματος ανάμιξης του αέρα – Αναμείκτης, από 10/12 έως 11/12.

Από το συντελεστή μεταβλητότητας (5,3%), αλλά και από το παραπάνω σχήμα, παρουσιάζεται μία καλύτερη ομοιομορφία στις τιμές σχετικής υγρασίας, κατά μήκος του θερμοκηπίου, σε αντίθεση με την μεταχείριση χωρίς αναμείκτη.

Λειτουργία Συστημάτων Θέρμανσης και συστήματος ανάμιξης του αέρα – Αναμείκτης, ανά δεκάλεπτο λειτουργίας.



Σχήμα 4.18. Κατανομή της σχετικής υγρασίας με λειτουργία Συστημάτων Θέρμανσης (αερόθερμο – επιδαπέδιων σωλήνων) και συστήματος ανάμιξης του αέρα – Αναμείκτης, ανά δεκάλεπτο λειτουργίας, από 23/12 έως 24/12.

Από το συντελεστή μεταβλητότητας (4,44%), αλλά και από το σχήμα, παρουσιάζεται μία ομοιομορφία στις τιμές σχετικής υγρασίας, κατά μήκος του θερμοκηπίου.

Όπως φαίνεται και παραπάνω, υπάρχει μια καλύτερη κατανομή των τιμών της σχετικής υγρασίας, όταν χρησιμοποιείται ο αναμείκτης αέρα, αφού ο συντελεστής CV σε αυτές τις περιπτώσεις είναι μικρότερος. Συνεπώς, η σχετική υγρασία είναι αυτή που επηρεάζεται περισσότερο από τον αναμείκτη αέρα, και όχι τόσο η θερμοκρασία του αέρα.

Ο Bohanon (1962) μελέτησε την επίδραση ενός αναμείκτη αέρα, που συνδυάζει τη λειτουργία του με το σύστημα θέρμανσης του θερμοκηπίου, με σκοπό την βελτίωση του μικροκλίματος για την ανάπτυξη των φυτών. Ο αναμείκτης αέρα παρείχε ανάδευση και καλή κυκλοφορία του αέρα ώστε να παραχθούν πιο ομοιόμορφες θερμοκρασίες και υγρασίες και επαρκής αερισμός της φυλλικής επιφάνειας των φυτών. Η αναδευτική αυτή κίνηση που δημιουργούνταν από τον αναμείκτη, έκανε διανομή του αέρα από το έδαφος ως την κορυφή του θερμοκηπίου, περιορίζοντας τις ζεστές και κρύες «κηλίδες» που δημιουργούνταν κατά τόπους στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Συνεπώς, το σύστημα θέρμανσης ήταν πολύ πιο αποτελεσματικό και αποδοτικό. Ο κινούμενος αέρας που παραγόταν από τον αναμείκτη περιορίσε την

περισσή υγρασία στο επίπεδο της καλλιέργειας, και η φυσική υγρασία που παραγόταν από τα φυτά και το έδαφος ανακατευόταν με αέρα μικρότερης υγρασίας που βρισκόταν πάνω από την καλλιέργεια, με αποτέλεσμα την ομοιόμορφη υγρασία σε όλο το θερμοκήπιο.

Τα φυτά πρέπει να αναπνέουν για να φέρουν εις πέρας τις διαδικασίες αναπνοής, διαπνοής και φωτοσύνθεσης. Τα φυτά του αγρού πραγματοποιούν αυτές λειτουργίες με τη βοήθεια του φυσικού ανέμου. Αλλά κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όταν ένα θερμοκήπιο δεν αερίζεται φυσικά, δεν υπάρχει επαρκής κίνηση του αέρα μεταξύ των φυτών ώστε να επιτραπεί το μέγιστο της ανάπτυξής τους. Έτσι, με τη χρήση αναμεικτής αέρα, η μελέτη του Bohanon (1962) περιγράφει τη βελτίωση του κλίματος του θερμοκηπίου, με τη βοήθεια του οποίου τα φυτά θα έχουν μια πιο ζωνήρη ανάπτυξη και οι μυκητολογικές ασθένειες θα περιοριστούν σε μεγάλο βαθμό.

4.2. ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΡΟΣΙΣΜΟΥ

4.2.1. Εισαγωγή

Προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές συνθήκες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, πρέπει να αφαιρέσουμε μια ποσότητα θερμότητας με τη χρήση κάποιου συστήματος δροσίσιμου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο δροσίσιμος προερχόταν από έναν νεφελοψεκαστήρα του οποίου η παροχή ρυθμιζόνταν ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε μεταχείρισης. Ο νεφελοψεκαστήρας αυτός διέθετε ενσωματωμένο ανεμομίκτη για καλύτερη κατανομή του κλίματος στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Στη φάση αυτή του πειράματος, σημασία δεν έχει τόσο η αύξηση της σχετικής υγρασίας, όσο η ομοιομορφία στην κατανομή αυτής, στο χώρο του θερμοκηπίου και η αποτελεσματικότητα του συστήματος αερισμού.

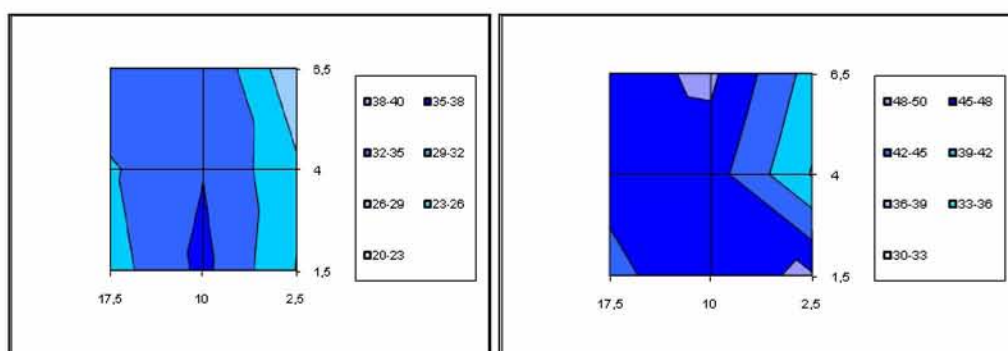
Για τη διερεύνηση της κατανομής της σχετικής υγρασίας, επιλέχθηκαν 5 διαφορετικές ημέρες όσον αφορά τον τρόπο δροσίσιμου του θερμοκηπίου. Τα

αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν αφορούν τη χρονική περίοδο από 19:00 έως 23:30 ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Οι αισθητήρες ήταν τοποθετημένοι σε δύο επίπεδα 1,5 m και 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους.

Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά γραφήματα επιφάνειας του θερμοκηπίου για τα δύο επίπεδα των αισθητήρων και σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, ώστε να φανεί η αλλαγή της ομοιογένειας της σχετικής υγρασίας στην πορεία του χρόνου και ενώ γινόταν διαφορετικές μεταχειρίσεις. Επίσης, παρουσιάζονται πίνακες με τις τιμές των CV για όλες τις χρονικές στιγμές.

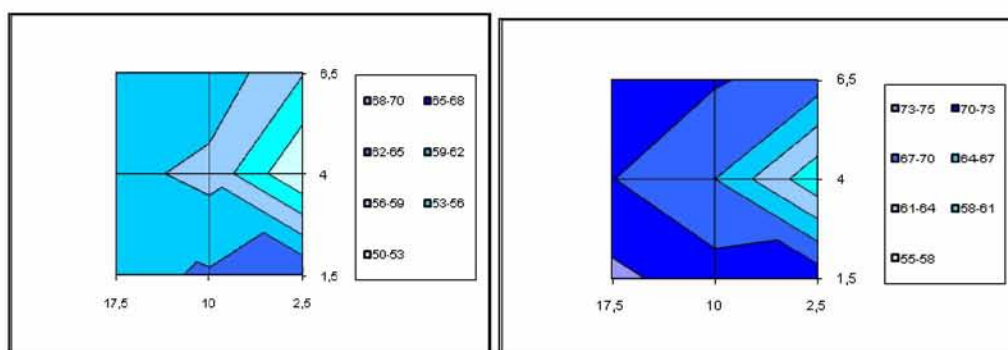
4.2.2. 1^η μέτρηση στις 5/7/2010

Ο νεφελοψεκαστήρας τέθηκε σε λειτουργία στο 100% της μέγιστης παροχής του μέχρι η υγρασία να σταθεροποιηθεί και απενεργοποιήθηκε. Τη δεδομένη χρονική στιγμή άνοιξαν τα πλαϊνά παράθυρα στο 100% του ανοίγματός τους μέχρι τη σταθεροποίηση των συνθηκών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και στη συνέχεια ενεργοποιήθηκε πάλι το σύστημα, μέχρι τη σταθεροποίηση της σχετικής υγρασίας, αφού έκλεισαν τα παράθυρα.



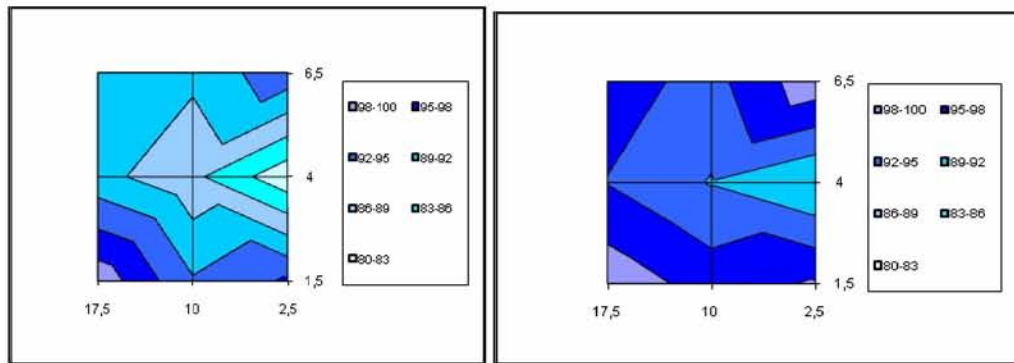
(α)

(β)



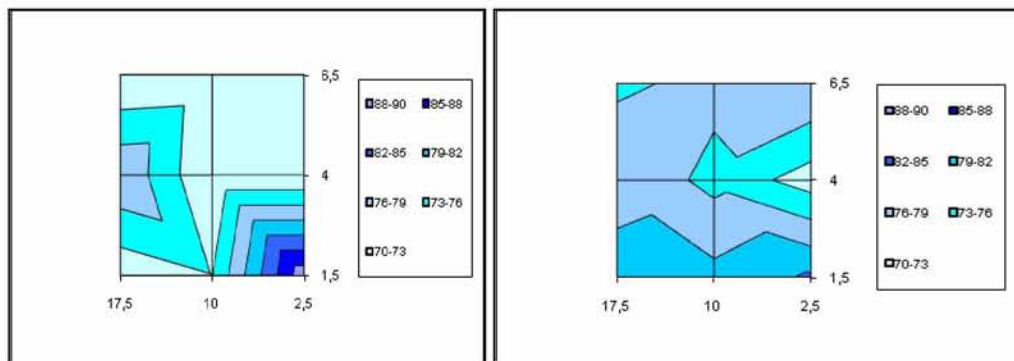
(γ)

(δ)



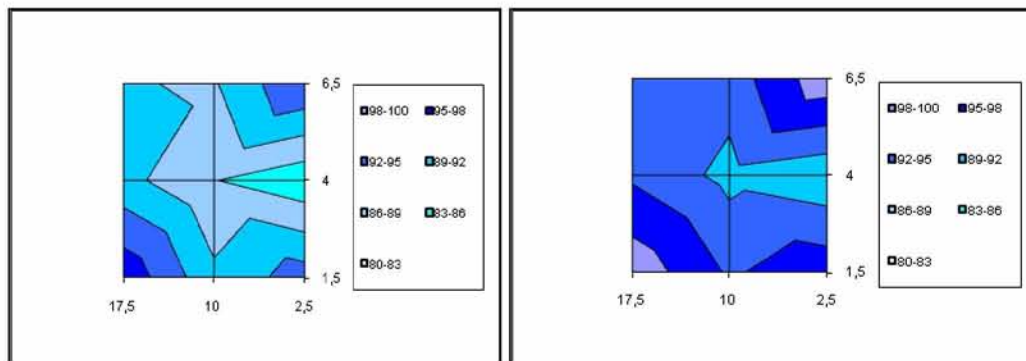
(ε)

(στ)



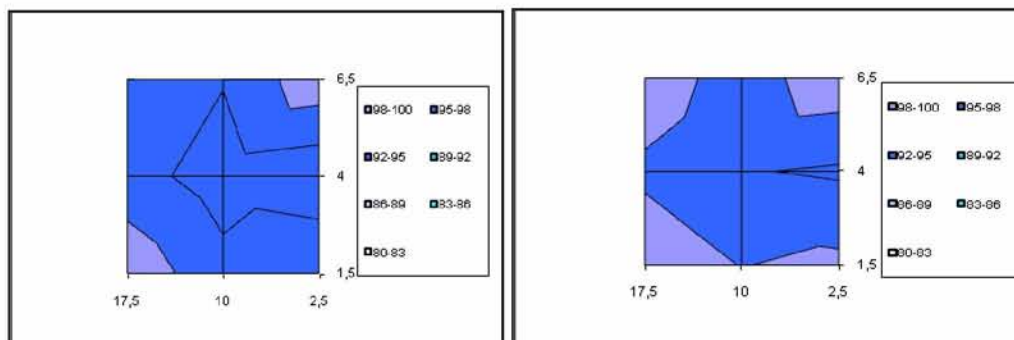
(ζ)

(η)



(θ)

(ι)



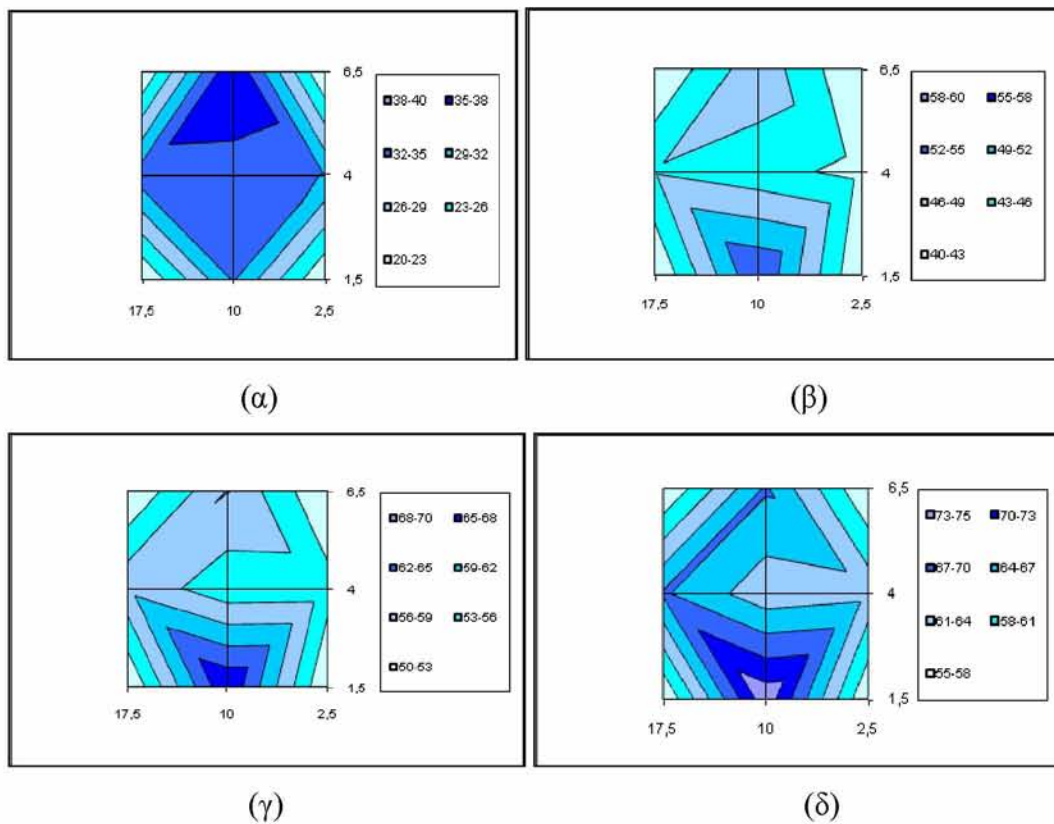
(ια)

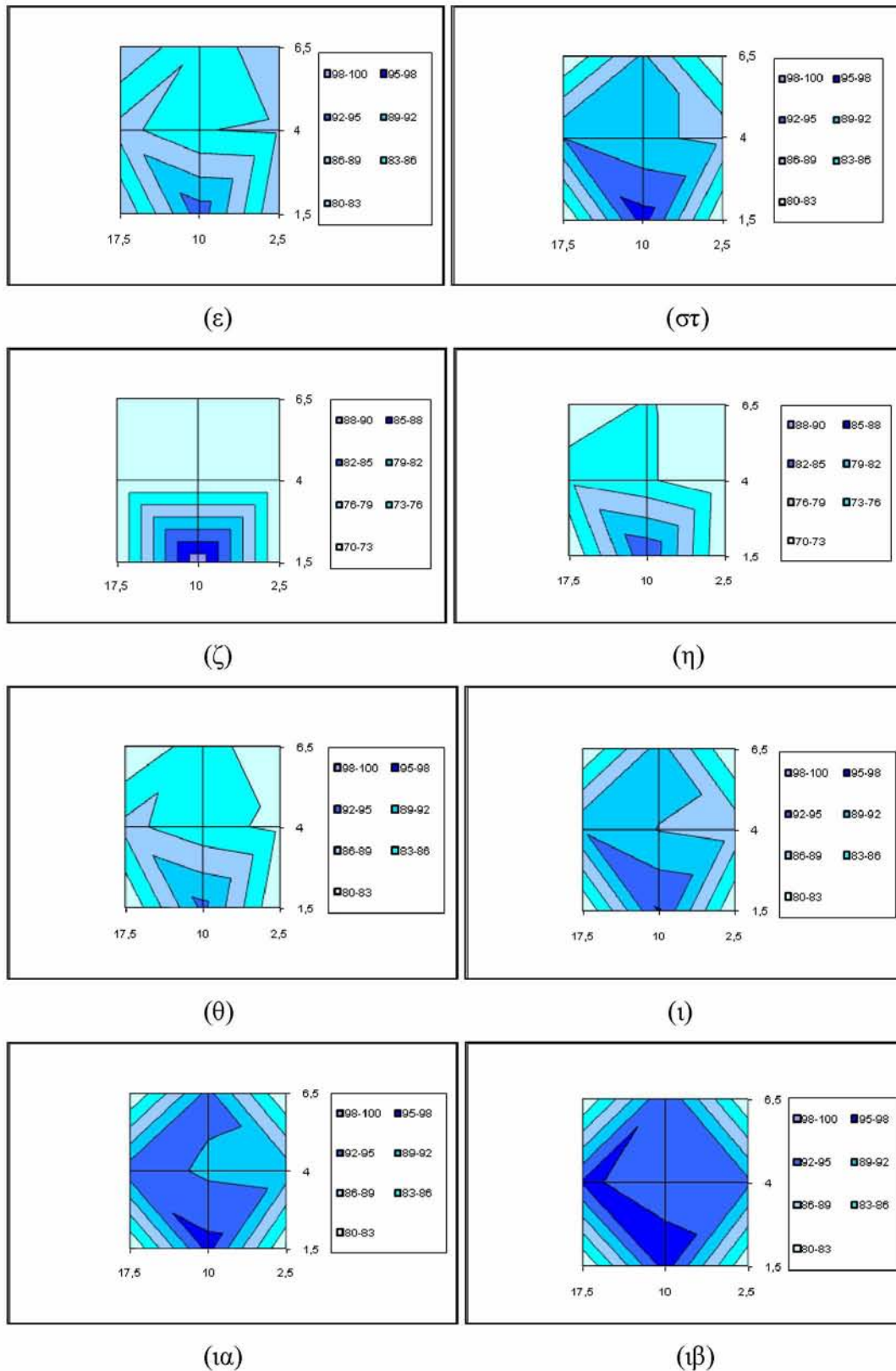
(ιβ)

Σχήμα 4.2.1. Οριζόντια μεταβολή της σχετικής υγρασίας του αέρα στο οριζόντιο επίπεδο 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους τις νυχτερινές ώρες, με χρήση νεφελωπεκαστήρα στις 05/07. (α) 19:41 μόλις τέθηκε σε λειτουργία το μηχάνημα, (β)

19:50, (γ) 20:00, (δ)20:10, (ε) 20:40, (στ) 21:10, (ζ) 21:40 μετά από 10 λεπτά από το σταμάτημα του νεφελοψεκαστήρα, (η)22:10 μόλις τέθηκε πάλι σε λειτουργία το μηχάνημα, (θ) 22:20, (ι) 22:30, (ια) 22:40, (ιβ) 23:00.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, η θέση του νεφελοψεκαστήρα βρίσκονταν στη μέση του πλάτους θερμοκηπίου, κοντά στην είσοδο. Παρατηρείται από τα διαγράμματα ότι η κατανομή της σχετικής υγρασίας στο χώρο αλλάζει πολύ κατά τη διάρκεια του χρόνου, από τη στιγμή που ξεκινά να λειτουργεί ο νεφελοψεκαστήρας. Επίσης, παρατηρείται μεγάλη διαφορά στην κατανομή της υγρασίας στο διάγραμμα (ζ) όπου μόλις έχει σταματήσει να λειτουργεί, ενώ έχουν ανοίξει τα παλαινά παράθυρα και ο αέρας τείνει να ανακτήσει τα φυσικά χαρακτηριστικά του. Φαίνεται και από τα χρώματα των διαγραμμάτων ότι η μεγαλύτερη ομοιομορφία παρατηρείται μετά από πολλή ώρα λειτουργίας των μηχανημάτων, στα (ια) και (ιβ), όπου το χρώμα στο μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας είναι το ίδιο.





Σχήμα 4.2.1. Οριζόντια μεταβολή της σχετικής υγρασίας του αέρα στο οριζόντιο επίπεδο 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους τις νυχτερινές ώρες, με χρήση νεφελωπεκαστήρα στις 05/07. (α) 19:41 μόλις τέθηκε σε λειτουργία το μηχάνημα, (β)

19:50, (γ) 20:00, (δ)20:10, (ε) 20:40, (στ) 21:10, (ζ) 21:40 μετά από 10 λεπτά από το σταμάτημα του νεφελωψεκαστήρα, (η)22:10 μόλις τέθηκε πάλι σε λειτουργία, (θ) 22:20, (ι) 22:30, (ια) 22:40, (ιβ) 23:00.

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η μεταβολή της σχετικής υγρασίας σε βάθος χρόνου, 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους. Στα τέσσερα άκρα του θερμοκηπίου δεν υπήρχαν διαθέσιμοι αισθητήρες για τη μέτρηση της σχετικής υγρασίας, γι' αυτό και οι τιμές στα σημεία αυτά φαίνονται μηδενικές. Επομένως, η πραγματική μεταβολή υπολογίστηκε μόνο για τα υπόλοιπα σημεία και όχι για τα τέσσερα άκρα.

Στο διάγραμμα (α) φαίνεται η κατανομή της υγρασίας τη στιγμή που ξεκίνησε να λειτουργεί ο νεφελωψεκαστήρας. Παρατηρείται ότι η υγρασία στο επίπεδο αυτό δεν έχει προλάβει να επηρεασθεί από τον νεφελωψεκαστήρα. Στο διάγραμμα (β) φαίνεται η επίδραση του νεφελωψεκαστήρα, αλλά η ομοιομορφία όχι μόνο φαίνεται να είναι μικρή, αλλά έχει μειωθεί σε σχέση με το διάγραμμα (α), όπως παρατηρείται και από την τιμή του CV στο Πίνακα 4.9. Από το διάγραμμα (γ) μέχρι και το (στ) παρατηρείται ότι η σχετική υγρασία σε βάθος χρόνου ισορροπεί και κατανέμεται πολύ πιο ομοιόμορφα στο χώρο. Στις 21:40 το μηχάνημα έχει ήδη απενεργοποιηθεί, ενώ έχουν ανοίξει τα παράθυρα, και η ομοιομορφία της υγρασίας στο χώρο έχει ελαττωθεί, όπως παρατηρήθηκε και στο επίπεδο 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους. Από το διάγραμμα (η) έως το (ιβ) που ξαναλειτουργεί το μηχάνημα, φαίνεται ότι η κατανομή της σχετικής υγρασίας έχει ανακτήσει πιο εύκολα την ομοιομορφία της, σε σχέση με την έναρξη της επέμβασης στις 19:41, γεγονός που επαληθεύεται και από τον Πίνακα 4.9. Επίσης παρατηρείται ότι η ομοιομορφία όχι απλώς ανακτάται πιο εύκολα αλλά αυξάνεται και φτάνει τις τιμές της ομοιομορφίας του κατώτερου επιπέδου του θερμοκηπίου.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η τιμή του CV που υποδηλώνει την ομοιομορφία των μετρήσεων, για τα διαγράμματα του Σχήματος 4.2.1.

Πίνακας 4.1. Τιμές του συντελεστή παραλλακτικότητας CV για την κατανομή της σχετικής υγρασίας στο χώρο του θερμοκηπίου, κατά την 1^η μέτρηση, στις 05/07.

CV/ ώρα	19:41	19:50	20:00	20:10	20:40	21:10	21:40	22:10	22:20	22:30	22:40	23:00
CV(%) επίπεδο 1,5m	10	7	8	6	6	4	11	4	5	4	3	2
CV(%) επίπεδο 2,5m	7	11	9	8	5	3	17	7	5	3	2	2

Γενικά, από τον Πίνακα 4.1 φαίνεται ότι η συμπεριφορά της σχετικής υγρασίας, όσον αφορά στην κατανομή της στο χώρο, διαφέρει στα δύο επίπεδα των μετρήσεων. Στο πρώτο επίπεδο 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους, όπου βρίσκεται και ο νεφελοψεκαστήρας, επιτυγχάνεται πιο εύκολα μεγαλύτερη ομοιομορφία στο χώρο και με πιο σταθερό ρυθμό. Αντιθέτως, στο δεύτερο επίπεδο 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους, η ομοιομορφία επιτυγχάνεται με μεγαλύτερη δυσκολία, αν και τελικά η τιμή του CV και στα δύο επίπεδα καταλήγει να είναι η ίδια. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, γίνεται λόγος για ομοιομορφία της κατανομής, όταν η τιμή του CV είναι κάτω από 10%. Επομένως, όσον αφορά στο επίπεδο της καλλιέργειας, οι μοναδικές χρονικές στιγμές που επικρατούσε ανομοιομορφία στο χώρο, ήταν όταν ξεκίνησε να λειτουργεί ο νεφελοψεκαστήρας και 10 λεπτά αφού άνοιξαν τα παράθυρα. Παρόμοια αποτελέσματα έχουμε και για τις τιμές του CV στο επίπεδο πάνω από την καλλιέργεια, μόνο που η πρώτη μη αποδεκτή τιμή παρουσιάστηκε 10 λεπτά αφού ξεκίνησε να λειτουργεί ο νεφελοψεκαστήρας, και όχι πιο πριν.

Επίσης, το σύστημα αερισμού (παράθυρα) χρειάστηκε 40 λεπτά περίπου για να ανανεώσει τον αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, μέχρι να σταθεροποιηθούν τα χαρακτηριστικά του (θερμοκρασία και σχετική υγρασία) σε σταθερές τιμές.

4.2.2. 2^η μέτρηση στις 6/7/2010

Ο νεφελωπεκαστήρας τέθηκε σε λειτουργία στο 80% της μέγιστης παροχής του μέχρι η υγρασία να σταθεροποιηθεί και απενεργοποιήθηκε. Τη δεδομένη χρονική στιγμή άνοιξαν τα πλαϊνά παράθυρα στο 100% του ανοίγματός τους μέχρι τη σταθεροποίηση των συνθηκών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και στη συνέχεια ενεργοποιήθηκε πάλι το σύστημα στο 100% της μέγιστης παροχής του, μέχρι τη σταθεροποίηση της σχετικής υγρασίας, αφού έκλεισαν τα παράθυρα.

Στη συνέχεια φαίνεται ο Πίνακας 4.2 με τις τιμές του CV για τα δύο επίπεδα μετρήσεων.

Πίνακας 4.2. Τιμές του συντελεστή παραλλακτικότητας CV για την κατανομή της σχετικής υγρασίας στο χώρο του θερμοκηπίου, κατά την 2^η μέτρηση, στις 06/07.

CV/ ώρα	19:30	19:40	19:50	20:00	20:30	21:00	21:30	21:40	21:50	22:00	22:30	23:00
CV επίπεδο 1,5m	6	5	5	4	3	7	4	4	4	5	2	1
CV επίπεδο 2,5m	5	4	4	3	3	6	4	7	6	4	2	2

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, όταν ξεκινά να λειτουργεί ο νεφελωπεκαστήρας στο 80% της μέγιστης παροχής του, η ομοιομορφία της κατανομής της σχετικής υγρασίας στο χώρο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, αλλά όχι τόσο πολύ όσο όταν το μηχάνημα λειτουργεί στο 100% της παροχής του. Στις 21:00 ο νεφελωπεκαστήρας σταμάτησε να λειτουργεί, ενώ άνοιξαν τα παράθυρα, και στη συνέχεια στις 21:30 άρχισε πάλι να λειτουργεί στο 100% της παροχής τους. Όπως παρατηρείται, η ομοιομορφία δεν αυξήθηκε πολύ ομαλά και στα δύο επίπεδα, εφόσον

δεν ακολούθησε αύξουσα σταθερή πορεία. Παρόλ' αυτά, αυξήθηκε πολύ περισσότερο απ' ότι όταν ο νεφελοψεκαστήρας λειτουργούσε με μικρότερη ισχύ.

Γενικά, η τιμή του CV δεν ξεπέρασε το 10%, γεγονός που σημαίνει ότι ακόμη και όταν δε λειτουργούσε ο νεφελοψεκαστήρας, η σχετική υγρασία του αέρα ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένη στο χώρο.

Επίσης, μετά το άνοιγμα των πλαϊνών παραθύρων, ο αέρας χρειάστηκε 30 λεπτά περίπου για να ανανεωθεί και να επέλθει ξανά σε ισορροπία. Αυτό συνέβη γιατί την πρώτη φορά λειτουργίας του νεφελοψεκαστήρα, η ισχύς του ήταν στο 80%, που σημαίνει ότι η συνολική υγρασία που μεταφέρθηκε στο χώρο ήταν λιγότερη από αυτή που μεταφέρθηκε με ισχύ 100%. Επομένως, το ποσοστό της υγρασίας που έπρεπε να αφαιρεθεί από τον θερμότερο εξωτερικό αέρα, όταν άνοιξαν τα παράθυρα, ήταν μικρότερο και γι' αυτό η διαδικασία αυτή ανανέωσης διήρκησε λιγότερη ώρα.

4.2.3. 3^η μέτρηση στις 7/7/2010

Ο νεφελοψεκαστήρας τέθηκε σε λειτουργία στο 100% της μέγιστης παροχής του μέχρι η υγρασία να σταθεροποιηθεί και απενεργοποιήθηκε. Τη δεδομένη χρονική στιγμή άνοιξαν τα πλαϊνά παράθυρα στο 100% του ανοίγματός τους μέχρι τη σταθεροποίηση των συνθηκών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και στη συνέχεια ενεργοποιήθηκε πάλι το σύστημα στο 100% της μέγιστης παροχής του, μέχρι τη σταθεροποίηση της σχετικής υγρασίας, αφού έκλεισαν τα παράθυρα. Η μέτρηση αυτή, δηλαδή, ήταν όμοια με την πρώτη.

Στη συνέχεια φαίνεται ο Πίνακας 4.3 με τις τιμές του CV για τα δύο επίπεδα μετρήσεων.

Πίνακας 4.3. Τιμές του συντελεστή παραλλακτικότητας CV για την κατανομή της σχετικής υγρασίας στο χώρο του θερμοκηπίου, κατά την 3^η μέτρηση, στις 07/07.

CV/ ώρα	19:00	19:10	19:20	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	21:45	22:00	22:15	22:30	23:00
CV επίπεδο 1,5m	5	5	5	5	5	4	5	5	4	4	4	3	2
CV επίπεδο 2,5m	4	7	7	6	4	3	13	8	7	4	2	2	1

Όπως παρατηρείται στον παραπάνω πίνακα, η κατανομή της σχετικής υγρασίας στο επίπεδο 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους παρουσιάζει μεγάλη ομοιομορφία από τη στιγμή που ξεκινά να λειτουργεί ο νεφελοψεκαστήρας μέχρι να σταματήσει στις 20:50. Το ίδιο παρατηρείται όταν ξεκινά πάλι να λειτουργεί ο νεφελοψεκαστήρας στις 21:40, μέχρι να σταματήσει πάλι στις 23:00. Η ομοιομορφία αλλάζει πολύ πιο ομαλά απ' ό τι στην 1^η μέτρηση, αν και οι αρχικές τιμές της πριν ξεκινήσουν να λειτουργεί το σύστημα ήταν πολύ πιο υψηλές σε σχέση με την 3^η μέτρηση. Παρόλ' αυτά, η κατανομή της σχετικής υγρασίας στο επίπεδο 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά με την 1^η μέτρηση. Ο ρυθμός αλλαγής της ομοιομορφίας δεν είναι πολύ σταθερός, αλλά τελικά η ομοιομορφία καταλήγει να αυξάνεται σε αρκετά υψηλά επίπεδα (CV=1).

Μη αποδεκτές τιμές του CV παρατηρήθηκαν μόνο στις 21:00, δηλαδή 10 λεπτά αφού άνοιξαν τα παράθυρα και μόνο για το επίπεδο 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους. Η διάρκεια αερισμού, στη μέτρηση αυτή ήταν κατά 10 λεπτά μεγαλύτερη από την πρώτη μέτρηση, κατά την οποία έγιναν οι ίδιες μεταχειρίσεις. Αυτό συνέβη επειδή η εξωτερική σχετική υγρασία και θερμοκρασία του αέρα την ημέρα αυτή ήταν χαμηλότερες από αυτές τις πρώτης ημέρας. Επομένως, εφόσον ο εξωτερικός αέρας

ήταν θερμότερος και ξηρότερος, οι ανανεώσεις με τον εσωτερικό αέρα ήταν περισσότερες και κατά συνέπεια, η διάρκεια ήταν μεγαλύτερη.

4.2.4. 4^η μέτρηση στις 12/7/2010

Ο νεφελοψεκαστήρας τέθηκε σε λειτουργία στο 60% της μέγιστης παροχής του μέχρι η υγρασία να σταθεροποιηθεί και απενεργοποιήθηκε. Τη δεδομένη χρονική στιγμή άνοιξαν τα πλαϊνά παράθυρα στο 100% του ανοίγματός τους μέχρι τη σταθεροποίηση των συνθηκών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και στη συνέχεια ενεργοποιήθηκε πάλι το σύστημα στο 60% της μέγιστης παροχής του, μέχρι τη σταθεροποίηση της σχετικής υγρασίας, αφού έκλεισαν τα παράθυρα.

Στη συνέχεια φαίνεται ο Πίνακας 4.4 με τις τιμές του CV για τα δύο επίπεδα μετρήσεων.

Πίνακας 4.4. Τιμές του συντελεστή παραλλακτικότητας CV για την κατανομή της σχετικής υγρασίας στο χώρο του θερμοκηπίου, κατά την 4^η μέτρηση, στις 12/07.

CV/ ώρα	19:50	20:00	20:15	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	22:45	23:00	23:15
CV επίπεδο 1,5m	8	5	5	6	6	6	4	6	7	6	5
CV επίπεδο 2,5m	6	19	13	13	4	5	3	8	9	4	4

Όπως παρατηρείται στον παραπάνω πίνακα, η κατανομή της σχετικής υγρασίας στο επίπεδο 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους παρουσιάζει μεγάλη ομοιομορφία από

τη στιγμή που ξεκινά να λειτουργεί ο νεφελοψεκαστήρας μέχρι να σταματήσει στις 22:00, αν και αρχικά αυξάνει απότομα η ομοιομορφία ($CV=5$) και στη συνέχεια μειώνεται και παραμένει σταθερή στο $CV=6$, μέχρι να αυξηθεί και πάλι στο $CV=4$. Παρόμοια μείωση της ομοιομορφίας παρατηρείται και στη δεύτερη φάση των μετρήσεων, από τις 22:30 που τίθεται πάλι σε λειτουργία ο νεφελοψεκαστήρας, ενώ στο τέλος πάλι αυξάνει στο $CV=5$. Για το δεύτερο επίπεδο 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους, παρατηρείται μεγαλύτερη ανομοιογένεια, από κάθε άλλη μέτρηση και των προηγούμενων ημερών. Αρχικά, στις 19:50 η ομοιομορφία της κατανομής είναι υψηλή ($CV=6$), ενώ μετά από 10 λεπτά μειώνεται απότομα ($CV=19$) και αυξάνει πάλι απότομα ($CV=13$ και $CV=4$), μέχρι να σταθεροποιηθεί στο $CV=5$. Στη δεύτερη φάση των μετρήσεων, από τις 22:30 παρουσιάζεται ομαλότερος ρυθμός μεταβολής της ομοιομορφίας, με σταθεροποίηση στο $CV=4$.

Η διαφορετική αυτή συμπεριφορά της κατανομής της σχετικής υγρασίας στο χώρο του θερμοκηπίου, έγκειται στην μικρότερη ισχύ με την οποία λειτουργούσε ο νεφελοψεκαστήρας. Λόγω της μικρότερης αυτής ισχύος, τα σταγονίδια του νεφελοψεκαστήρα κινούνταν με μικρότερη ταχύτητα στο χώρο και μεταφέρονταν σε όλη την επιφάνεια του θερμοκηπίου με πιο αργό ρυθμό. Επομένως, ήταν δύσκολο να δημιουργηθεί μεγάλη ομοιομορφία σε σύντομο χρονικό διάστημα και ομαλά.

Η διαδικασία ανανέωσης του αέρα, μέσω των ανοιγμάτων αερισμού διήρκησε 30 λεπτά, εφόσον ο νεφελοψεκαστήρας λειτουργούσε με μικρότερη ισχύ.

4.2.5. 5^η μέτρηση στις 15/7/2010

Ο νεφελοψεκαστήρας τέθηκε σε λειτουργία στο 40% της μέγιστης παροχής του μέχρι η υγρασία να σταθεροποιηθεί και απενεργοποιήθηκε. Τη δεδομένη χρονική στιγμή άνοιξαν τα πλαϊνά παράθυρα στο 100% του ανοίγματός τους μέχρι τη σταθεροποίηση των συνθηκών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και στη συνέχεια ενεργοποιήθηκε πάλι το σύστημα στο 40% της μέγιστης παροχής του, μέχρι τη σταθεροποίηση της σχετικής υγρασίας, αφού έκλεισαν τα παράθυρα.

Στη συνέχεια φαίνεται ο Πίνακας 4.5. με τις τιμές του CV για τα δύο επίπεδα μετρήσεων.

Πίνακας 4.5. Τιμές του συντελεστή παραλλακτικότητας CV για την κατανομή της σχετικής υγρασίας στο χώρο του θερμοκηπίου, κατά την 5^η μέτρηση, στις 15/07.

CV/ ώρα	19:10	19:20	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:20	22:30	22:40	22:50	23:00	23:30
CV επίπεδο 1,5m	11	13	13	11	8	5	4	3	4	4	3	3	3	2
CV επίπεδο 2,5m	6	5	5	5	3	2	2	1	1	2	2	2	2	1

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.5., η κατανομή της σχετικής υγρασίας στο επίπεδο 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους ξεκινά ανομοιογενώς στις 19:10 (CV=11), έπειτα η ομοιογένεια μειώνεται για τα επόμενα 20 λεπτά και στη συνέχεια αυξάνει πολύ αλλά με πιο αργό ρυθμό από τις προηγούμενες μετρήσεις (CV=3 στις 22:00). Στη δεύτερη φάση των μετρήσεων, από τις 22:20, ενώ έχουν ανοίξει τα παράθυρα, η ομοιομορφία δεν μειώνεται πάρα πολύ, αφού η τιμή του CV αυξάνει μόνο κατά 1 μονάδα. Έπειτα ο CV μειώνεται αργά και σταθερά μέχρι την τιμή 2. Στο δεύτερο επίπεδο 2,5m από την επιφάνεια του εδάφους, η σχετική υγρασία συμπεριφέρεται με τελείως διαφορετικό τρόπο από τις μετρήσεις των προηγούμενων ημερών, καθώς η ομοιομορφία αυξάνει σταδιακά και με σταθερό ρυθμό, χωρίς να ελαττωθεί αμέσως μετά την έναρξη λειτουργίας των μηχανημάτων. Επίσης, όπως και στο κατώτερο επίπεδο, παρατηρείται κατά τη δεύτερη φάση των μετρήσεων, μικρή μείωση της ομοιομορφίας, μετά το άνοιγμα των παραθύρων (CV=2 στις 22:30). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η διαδικασία αερισμού, μέσω των πλαϊνών ανοιγμάτων, διήρκεσε μόλις 20 λεπτά, αφού η διαφορά σχετικής υγρασίας εσωτερικού και εξωτερικού αέρα ήταν μικρότερη από κάθε άλλη μέτρηση.

Συμπερασματικά, από τις μετρήσεις της σχετικής υγρασίας τις 5 αυτές ημέρες, παρουσιάζεται μεγάλη και γρήγορη ομοιομορφία στην κατανομή της όταν ο νεφελοψεκαστήρας λειτουργεί στο 100% της μέγιστης παροχής του, ενώ φαίνεται

μεγάλη αλλά αργή μεταβολή της ομοιομορφίας, όταν λειτουργεί με μικρότερη ισχύ. Επίσης, όταν λειτουργεί στο 100% της μέγιστης παροχής του, προστίθεται στον αέρα μεγαλύτερη ποσότητα υγρασίας, η οποία κατανέμεται σε όλο το χώρο, με αποτέλεσμα, μόλις ανοίξουν τα παράθυρα, η υγρασία αυτή να χάνεται στον εξωτερικό χώρο γρήγορα και βίαια. Έτσι, στη δεύτερη φάση των μετρήσεων, όταν τίθεται πάλι σε λειτουργία ο νεφελοψεκαστήρας, η ομοιομορφία της σχετικής υγρασίας στο χώρο έχει χαθεί, εφόσον οι τιμές του CV είναι και πάλι υψηλές. Αντιθέτως, όπως παρατηρείται στις μετρήσεις με μικρότερες παροχές του νεφελοψεκαστήρα, η υγρασία που προστίθεται στο χώρο από τα σταγονίδια του νεφελοψεκαστήρα είναι λιγότερη, επομένως όταν ανοίγουν τα παράθυρα χάνεται μικρότερη ποσότητα αυτής στο περιβάλλον εκτός του θερμοκηπίου. Έτσι, στη δεύτερη φάση των μετρήσεων η αρχική ομοιομορφία είναι πάντοτε καλύτερη, αφού έχει χαθεί μικρότερη ποσότητα υγρασίας αργά και όχι βίαια. Η κίνηση αυτή του αέρα, καθώς ανοίγουν τα παράθυρα, αποδεικνύεται από την παρακάτω βιβλιογραφία.

Οι Haxaire et al. (2000) σε πείραμα τους σε θερμοκήπιο εξοπλισμένο με παράθυρα οροφής, παρατήρησαν ότι κατά το φυσικό αερισμό, ρεύματα αέρα εισέρχονταν από την υπήνεμη πλευρά του θερμοκηπίου, έρρεαν προς τα ανάντη παράλληλα με τον εξωτερικό άνεμο και κινούνταν πάνω από το χώρο του θερμοκηπίου και της καλλιέργειας. Η κίνηση αυτή γινόταν γρήγορα, τείνοντας να σταθεροποιηθούν οι συνθήκες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Έπειτα, εξέρχονταν από την προσήνεμη πλευρά των παραθύρων.

Παρόλ' αυτά, οι Fernandez & Bailey (1992) μέσα από πείραμα που διεξήγαγαν, συμπέραναν ότι για χαμηλές ταχύτητες ανέμου, οι ρυθμοί αερισμού δεν αυξάνονταν μονοτονικά, όπως αναμένονταν, αλλά γραμμικά με την γωνία ανοίγματος του αερισμού. Η διασπορά των ρυθμών αερισμού επηρεάζονταν από τη γωνία ανοίγματος, ενώ δεν επηρεάζονταν από τη διεύθυνση του ανέμου και τη διαφορά εσωτερικής- εξωτερικής υγρασίας, όπως παρατηρήθηκε στο πείραμα της παρούσας διατριβής.

4.3. ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

4.3.1. Εισαγωγή

Ένας άλλος τρόπος παρατήρησης της ομοιομορφίας του κλίματος μέσα στο θερμοκήπιο, είναι αυτός με τη χρήση προσομοιωμάτων. Επίσης, με τα προσομοιώματα είναι δυνατή και η μελέτη της συμπεριφοράς του κλίματος. Στην παρούσα διατριβή, έγινε η μελέτη της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας εντός του θερμοκηπίου, κατά τη διάρκεια της χρήσης του συστήματος θέρμανσης του θερμοκηπίου, χωρίς τη χρήση αναμεικτή αέρα. Με τον τρόπο αυτό έγινε η παρατήρηση της φυσικής και όχι της βεβιασμένης αλλαγής των χαρακτηριστικών αυτών. Για τη μελέτη τους, χρησιμοποιήθηκαν ασύρματοι αισθητήρες σε διαφορετικά ύψη, όπως φαίνονται στο κεφάλαιο «ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ».

Η πρώτη κατηγορία προσομοιωμάτων είναι αυτή που αφορά στη θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου, όπου χρησιμοποιήθηκαν ως ανεξάρτητες μεταβλητές, η θερμοκρασία του σωλήνα θέρμανσης, η εξωτερική θερμοκρασία του αέρα και η καθαρή ακτινοβολία του αέρα που εισέρχονταν στο θερμοκήπιο. Η δεύτερη κατηγορία προσομοιωμάτων αφορά στη σχετική υγρασία του αέρα του θερμοκηπίου, με ανεξάρτητες μεταβλητές την θερμοκρασία του σωλήνα θέρμανσης, την εξωτερική σχετική υγρασία και την καθαρή εισερχόμενη ακτινοβολία του αέρα. Οι δύο αυτές κατηγορίες χωρίστηκαν σε δύο υποκατηγορίες, την πρώτη όπου θέτονταν σε λειτουργία το σύστημα θέρμανσης και τη δεύτερη όπου σταματούσε να λειτουργεί το σύστημα θέρμανσης. Οι μετρήσεις ξεκινούσαν όταν τα χαρακτηριστικά του αέρα ήταν σταθεροποιημένα στο χρόνο και σταματούσαν όταν ξανασταθεροποιούνταν μετά την επέμβαση του συστήματος θέρμανσης. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν σε τέσσερις διαφορετικές ημέρες και επιλέχθηκαν τα καλύτερα προσομοιώματα που αντιπροσώπευαν όλες τις ημέρες αυτές.

Για την αξιολόγηση των προσομοιωμάτων, όπως αναφέρθηκε, μελετήθηκαν η δομή του προσομοιώματος, η τιμή συντελεστή R_T^2 και η τιμή του YIC κριτηρίου. Σύμφωνα με τις εκτιμώμενες παραμέτρους των προσομοιωμάτων, παρατηρήθηκε ότι η εξωτερική θερμοκρασία ήταν η πιο σημαντική μεταβλητή, που επηρέαζε άμεσα την

εσωτερική θερμοκρασία του θερμοκηπίου. Η θερμοκρασία του σωλήνα θέρμανσης είχε μικρότερη επίδραση στην εσωτερική θερμοκρασία, αλλά ήταν σαφές ότι η μεταβλητή αυτή έλεγχε το σύστημα, για την επίδραση της θέρμανσης. Από την άλλη πλευρά, η καθαρή ακτινοβολία παρουσίασε τη μικρότερη επίδραση στο σύστημα, αλλά ήταν σημαντική για σταθερότητα των προσομοιωμάτων. Τα προσομοιώματα χωρίς τον υπολογισμό αυτής της μεταβλητής ήταν πολύ ασταθή και μεγάλες διαφορές μεταξύ των τεσσάρων ημερών.

Παρακάτω, παρατίθενται οι σχετικοί πίνακες με τα προσομοιώματα που δημιουργήθηκαν και τα χαρακτηριστικά τους, καθώς και κάποια διαγράμματα αντιπροσωπευτικών παραδειγμάτων.

4.3.2. Προσομοιώματα θερμοκρασίας

Στον Πίνακα 4.6. παρατίθενται τα προσομοιώματα της θερμοκρασίας του αέρα εντός του θερμοκηπίου.

Πίνακας 4.6. Προσομοιώματα της εσωτερικής θερμοκρασίας του άερα με τα χαρακτηριστικά τους.

Θέρμανση	Αισθητήρες	Δομή προσομοιώματος	R_T^2	ΥΙC
Άνοιγμα θέρμανσης	1	[1 2 3 2 0 2 1 0]	0.948- 0.978	(-4.752)- (-1.404)
	2	[1 2 2 2 0 0 1 0]	0.972- 0.992	(-5.692)- (-4.693)
	3	[2 3 3 1 2 1 3 0]	0.962- 0.986	(-4.681)- 2.8241
	4	[2 3 3 1 1 1 3 0]	0.960- 0.981	(-3.882)- (-1.039)
	5	[2 1 3 3 1 1 0 0]	0.929- 0.987	(-5.544)- (-1.099)
	6	[1 1 3 2 0 0 1 0]	0.962- 0.981	(-4.985)- (-1.087)
	7	[2 3 3 1 0 0 3 0]	0.891- 0.973	(-6.580)- 1.2042
	8	[1 2 3 2 0 1 1 0]	0.912- 0.982	(-4.690)- 3.0715
	9	[1 2 3 1 1 0 3 0]	0.972- 0.981	(-4.588)- (-1.259)
	10	[2 2 3 2 0 1 2 0]	0.934-0.988	(-4.466)- (-1.832)
Κλείσιμο θέρμανσης	1	[1 2 2 2 2 2 0 0]	0.916- 0.984	(-6.836)- 2.275
	2	[1 1 3 1 2 2 0 0]	0.911- 0.994	(-3.025)- 6.601
	3	[1 2 2 3 1 3 2 0]	0.910- 0.995	(-4.675)- 2.612
	4	[1 2 2 2 1 0 0 0]	0.969- 0.989	(-5.243)- 0.369
	5	[1 2 3 2 1 1 0 0]	0.888- 0.993	(-3.069)- 3.932
	6	[2 2 2 2 0 1 1 0]	0.760- 0.995	(-5.492)- 2.979
	7	[1 3 1 3 3 3 3 0]	0.931- 0.989	(-3.245)- 3.941
	8	[2 3 2 2 1 1 0 0]	0.944- 0.993	(-5.094)- 1.566
	9	[1 3 2 3 2 2 3 0]	0.858- 0.983	(-1.489)- 5.757
	10	[1 1 2 1 0 2 3 0]	0.769- 0.991	(-8.712)- 1.298

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, τα προσομοιώματα που επιλέχθηκαν λειτουργούν με μεγάλη ακρίβεια, εφόσον οι τιμές του R_T^2 είναι πάνω από 0,75 που θεωρείται το κατώτερο επιτρεπτό όριο ακρίβειας. Όσον αφορά στην πρώτη υποομάδα

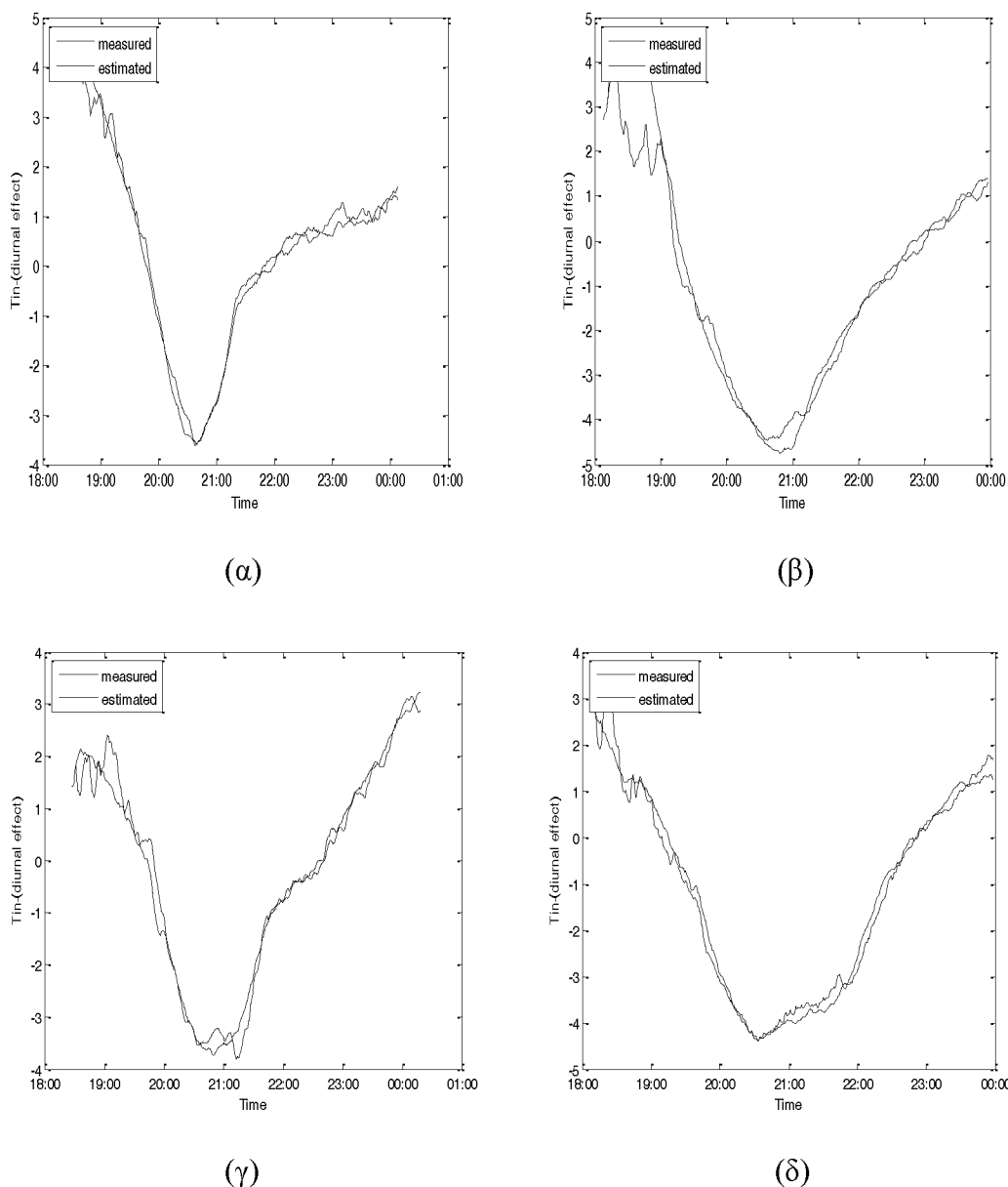
με την ένδειξη «Άνοιγμα θέρμανσης», οι τιμές του R_T^2 ήταν πάνω από 0,90, γεγονός που υποδεικνύει μεγάλη ακρίβεια του προσομοιώματος. Όσον αφορά στην δεύτερη υποομάδα με την ένδειξη «Κλείσιμο θέρμανσης», οι τιμές του R_T^2 ήταν πάνω από 0,90, γεγονός που υποδεικνύει μεγάλη ακρίβεια του προσομοιώματος, με κάποιες εξαιρετικές περιπτώσεις, όπως οι αισθητήρες 5, 6, 9 και 10 που παρουσίασαν για κάποιες ημέρες μικρότερη ακρίβεια, αλλά πάλι εντός των αποδεκτών ορίων. Οι τιμές του YIC κριτηρίου ήταν για τα περισσότερα προσομοιώματα αρκετά αρνητικές (γεγονός που υποδεικνύει μεγάλη προσαρμοστικότητα του προσομοιώματος σε διαφορετικές συνθήκες), με κάποιες εξαιρετικές περιπτώσεις όπου οι τιμές ήταν θετικές και επηρέασαν αρκετά την ακρίβεια των προσομοιωμάτων στις συγκεκριμένες ημέρες.

Μια άλλη σημαντική παρατήρηση στα παραπάνω αποτελέσματα είναι και η δομή των προσομοιωμάτων, η οποία χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά του αέρα στα διάφορα σημεία του θερμοκηπίου. Στην πρώτη υποομάδα παρατηρείται ότι τα δεδομένα όλων των αισθητήρων ακολουθούν προσομοιώματα πρώτης τάξεως, εκτός των αισθητήρων 3, 4, 5, 7 των οποίων τα δεδομένα ακολουθούν προσομοιώματα δεύτερης τάξεως. Οι αισθητήρες αυτοί, εκτός του 5, βρίσκονταν στο κατώτερο επίπεδο του θερμοκηπίου, 1.5m από την επιφάνεια του εδάφους, όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο σχήμα σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ο αισθητήρας 5 βρισκόταν στα 2,5m από την επιφάνεια του εδάφους. Συνεπώς τα χαρακτηριστικά του αέρα στις θέσεις αυτές ακολουθούν διαφορετική πορεία αλλαγής τους όταν ο αέρας θερμαίνεται από το σύστημα θέρμανσης. Αντίστοιχα για την δεύτερη υποομάδα, τα δεδομένα των αισθητήρων που δεν ακολουθούν προσομοιώματα πρώτης τάξεως είναι των 6 και 8. Οι αισθητήρες αυτοί βρισκόταν στο επίπεδο 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους. Συνεπώς, όταν ο αέρας θερμαίνεται, τα σημεία που βρίσκονται κοντά στο σύστημα θέρμανσης συμπεριφέρονται με πιο πολύπλοκο τρόπο (δεύτερης τάξεως προσομοιώματα) από αυτά που είναι πιο απομακρυσμένα από αυτό. Επίσης, όταν ο αέρας επανέρχεται στα φυσικά χαρακτηριστικά του, συμπεριφέρεται διαφορετικά, εφόσον τα σημεία που ακολουθούν δεύτερης τάξεως προσομοιώματα, είναι αυτά που βρίσκονται κοντά στο σύστημα θέρμανσης, αλλά σε υψηλότερα σημεία του θερμοκηπίου.

Οι Teitel & Tanny (1999) πραγματοποίησαν ένα πείραμα για τη δημιουργία προσομοιώματος όσον αφορά στη μεταβολή της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, κατά το φυσικό αερισμό με ανοίγματα

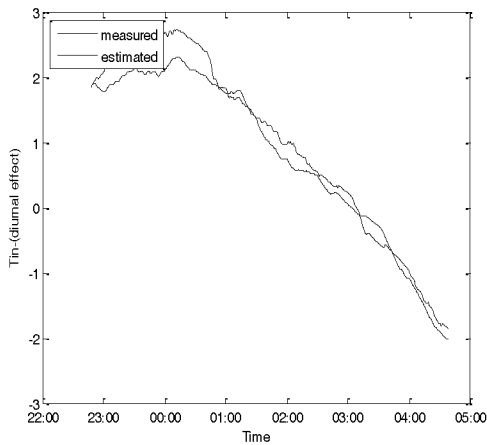
οροφής. Απέδειξαν ότι ανοίγοντας τα παράθυρα οροφής, το χρονικό διάστημα μείωσης της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας στενεύει, τείνοντας και οι δύο όσο το δυνατόν γρηγορότερα σε ένα σταθερό επίπεδο τιμών.

Παρακάτω, παρατίθενται κάποια διαγράμματα αντιπροσωπευτικά των παραπάνω αποτελεσμάτων και για τις τέσσερις ημέρες των μετρήσεων.

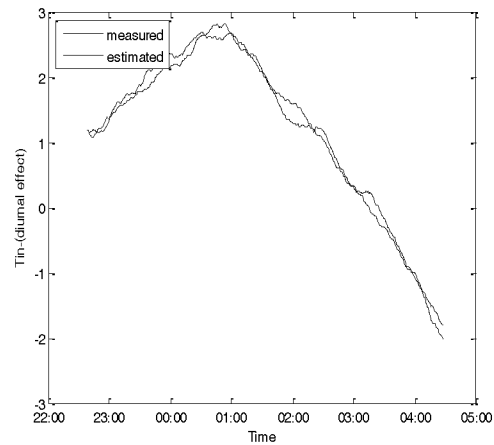


Σχήμα 4.3.1. Καμπύλη της εσωτερικής θερμοκρασίας του άερα του αισθητήρα 5, μετρημένης και υπολογισμένης από το αντίστοιχο προσομοίωμα, έχοντας αφαιρεθεί η επίδραση ημέρας-νύχτας, για την υποομάδα «Ανοιγμα θέρμανσης». (α) ημέρα 1, (β) ημέρα 2, (γ) ημέρα 3, (δ) ημέρα 4.

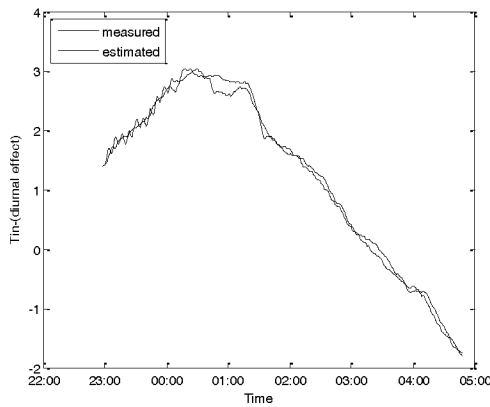
Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.6., το προσομοίωμα που αντιπροσωπεύει τα χαρακτηριστικά της θερμοκρασίας στη θέση του αισθητήρα 5 παρουσιάζει μεγάλη ακρίβεια, εφόσον η μετρημένη από την υπολογισμένη με το προσομοίωμα θερμοκρασία αποκλίνουν το πολύ 0.5°C .



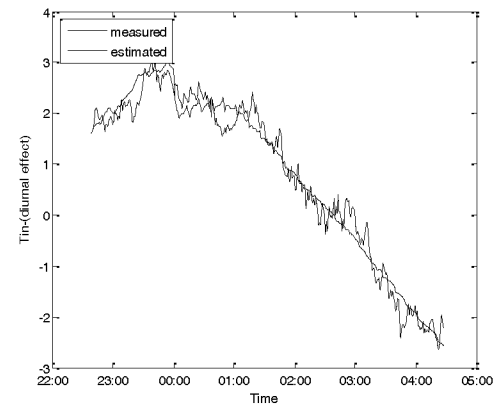
(α)



(β)



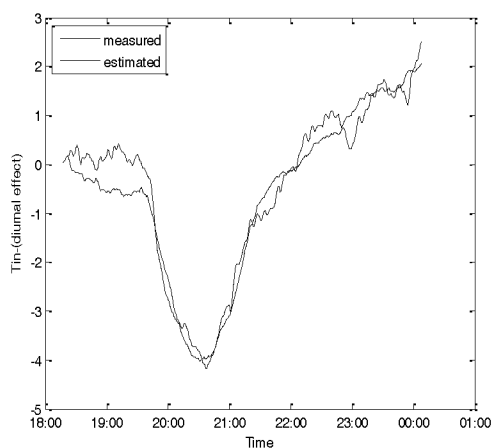
(γ)



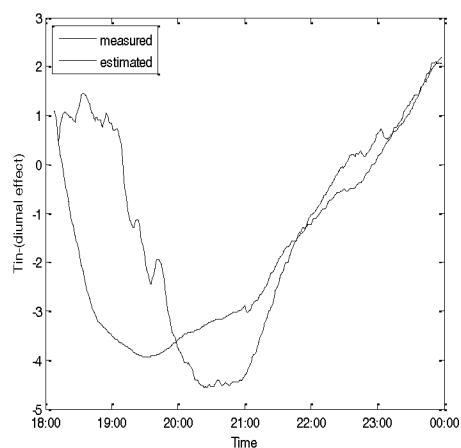
(δ)

Σχήμα 4.3.2. Καμπύλη της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα του αισθητήρα 4, μετρημένης και υπολογισμένης από το αντίστοιχο προσομοίωμα, έχοντας αφαιρεθεί η επίδραση ημέρας-νύχτας, για την υποομάδα «Κλείσιμο θέρμανσης». (α) ημέρα 1, (β) ημέρα 2, (γ) ημέρα 3, (δ) ημέρα 4.

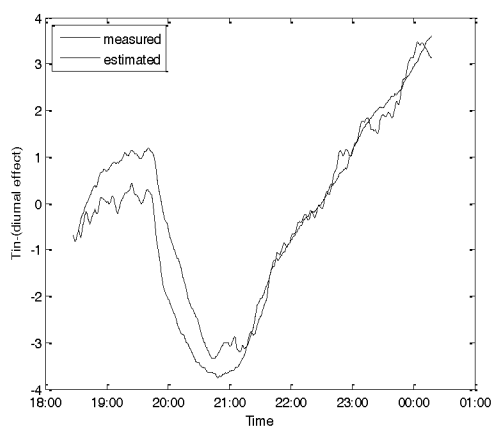
Αντίστοιχα, για τα δεδομένα του αισθητήρα 4 της δεύτερης υποομάδας, το προσομοίωμα που επιλέχθηκε υπολογίζει την θερμοκρασία αφού κλείσει το σύστημα θέρμανσης, με μεγάλη ακρίβεια.



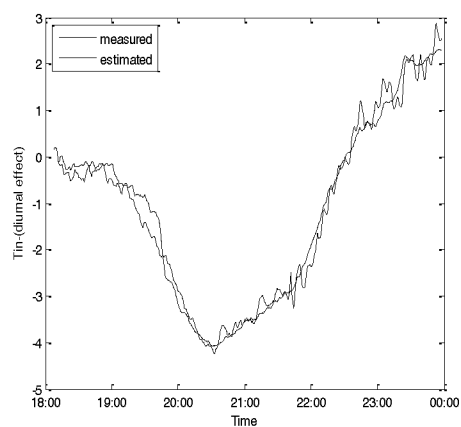
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 4.3.3. Καμπύλη της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα του αισθητήρα 7, μετρημένης και υπολογισμένης από το αντίστοιχο προσομοίωμα, έχοντας αφαιρεθεί η επίδραση ημέρας-νύχτας, για την υποομάδα «Άνοιγμα θέρμανσης». (α) ημέρα 1, (β) ημέρα 2, (γ) ημέρα 3, (δ) ημέρα 4.

Στο παραπάνω σχήμα, παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες των τεσσάρων ημερών, μετρημένες από τον αισθητήρα 7 και υπολογισμένες από το αντίστοιχο προσομοίωμα. Όπως φαίνεται, το προσομοίωμα αυτό δεν ανταποκρίθηκε εξίσου με ακρίβεια και στις τέσσερις ημέρες, γεγονός που αποδεικνύεται και από τις τιμές των R_T^2 και YIC του Πίνακα 4.6. Η μόνη «προβληματική» ημέρα ήταν η δεύτερη, στην οποία το προσομοίωμα παρουσίασε και χαμηλή τιμή για το R_T^2 (=0,89) αλλά και υψηλή τιμή για το YIC (=1,2). Έτσι, όπως φαίνεται από το σχήμα, οι καμπύλες της θερμοκρασίας όχι μόνο διέφεραν στα περισσότερα σημεία κατά 1,5°C, αλλά και η καμπύλη της υπολογισμένης από το προσομοίωμα θερμοκρασίας καθυστέρωσε να ακολουθήσει την καμπύλη της μετρημένης από τον αισθητήρα θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα τη μετατόπιση της πρώτης αριστερά της δεύτερης. Η διαφορά αυτή είναι σημαντική, γιατί έγκειται στο χρονικό διάστημα των 2 ωρών, όπως φαίνεται από τον άξονα του χρόνου στο διάγραμμα.

Επίσης, ελέγχθηκε αν κάποιο από τα προσομοιώματα αυτά μπορούσε να προβλέψει τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, για όλες τις ημέρες, είτε δούλευε το σύστημα θέρμανσης είτε όχι. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μόνο το προσομοίωμα του αισθητήρα 1 λειτούργησε κάτω από αυτές τις συνθήκες ικανοποιητικά.

4.3.3. Προσομοιώματα σχετικής υγρασίας

Στον Πίνακα 4.15 παρατίθενται τα προσομοιώματα της σχετικής υγρασίας του αέρα εντός του θερμοκηπίου.

Πίνακας 4.14. Προσομοιώματα της εσωτερικής σχετικής υγρασίας του αέρα με τα χαρακτηριστικά τους.

Θέρμανση	Αισθητήρες	Δομή προσομοιώματος	R_T^2	YIC
Άνοιγμα θέρμανσης	1	[1 2 2 3 0 0 1 0]	0.970- 0.993	(-6.330)-(-4.410)
	2	[2 2 3 1 1 2 3 0]	0.972- 0.991	(-7.549)-(-5.350)
	3	[2 2 2 2 1 0 1 0]	0.960- 0.995	(-5.716)-(-3.720)
	4	[2 2 2 1 1 0 1 0]	0.973- 0.982	(-6.905)-(-4.233)
	5	[2 2 1 3 0 2 0 0]	0.719- 0.889	0.024- 8.648

	6	[1 2 2 2 0 0 2 0]	0.944- 0.974	(-4.537)- (-1.817)
	7	[2 2 2 3 1 0 1 0]	0.949- 0.990	(-5.436)- 1.102
	8	[1 3 3 2 0 2 3 0]	0.945- 0.973	(-3.305)- 5.302
	9	[1 2 3 3 3 0 0 0]	0.955- 0.988	(-4.877)- 3.439
	10	[1 1 2 3 0 0 0 0]	0.882- 0.944	(-3.732)- (-1.429)
<i>Κλείσιμο θέρμανσης</i>	1	[1 2 2 2 1 0 2 0]	0.807- 0.990	(-4.614)- 0.262
	2	[2 1 3 2 1 0 0 0]	0.904- 0.980	(-4.204)- (-3.063)
	3	[1 2 3 2 1 2 0 0]	0.971- 0.992	(-3.678)- (-2.094)
	4	[1 1 3 2 1 2 0 0]	0.940- 0.989	(-3.944)- (-0.881)
	5	[1 2 3 2 2 0 0 0]	0.953- 0.962	(-2.819)- (-2.423)
	6	[2 1 3 2 0 0 1 0]	0.890- 0.951	(-4.913)- 3.821
	7	[1 2 3 2 3 0 0 0]	0.882- 0.985	(-3.692)- 0.034
	8	[1 2 3 2 1 0 0 0]	0.841- 0.981	(-3.381)- (-0.209)
	9	[1 2 2 2 1 0 0 0]	0.833- 0.987	(-4.345)- 2.731
	10	[2 2 2 1 2 2 2 0]	0.840- 0.934	(-2.290)- 2.927

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, τα προσομοιώματα που επιλέχθηκαν λειτουργούν με μεγάλη ακρίβεια, εφόσον οι τιμές του R_T^2 είναι πάνω από 0,75, εκτός του αισθητήρα 5 της πρώτης υποομάδας. Όσον αφορά στην πρώτη υποομάδα με την ένδειξη «Άνοιγμα θέρμανσης», οι τιμές του R_T^2 ήταν πάνω από 0,90, γεγονός που υποδεικνύει μεγάλη ακρίβεια του προσομοιώματος, εκτός των αισθητήρων 5 και 10 που παρουσίασαν τιμές μικρότερες του 0,90 για κάποιες ημέρες. Όσον αφορά στην δεύτερη υποομάδα με την ένδειξη «Κλείσιμο θέρμανσης», οι τιμές του R_T^2 ήταν πάνω από 0,90, γεγονός που υποδεικνύει μεγάλη ακρίβεια του προσομοιώματος, με κάποιες εξαιρετικές περιπτώσεις, όπως οι αισθητήρες 6, 7, 8, 9 και 10 που παρουσίασαν για κάποιες ημέρες μικρότερη ακρίβεια, αλλά πάλι εντός των αποδεκτών ορίων. Οι τιμές του YIC κριτηρίου ήταν για τα περισσότερα προσομοιώματα αρκετά αρνητικές (γεγονός που υποδεικνύει μεγάλη προσαρμοστικότητα του προσομοιώματος σε διαφορετικές συνθήκες), με κάποιες εξαιρετικές περιπτώσεις όπου οι τιμές ήταν θετικές και επηρέασαν αρκετά την ακρίβεια των προσομοιωμάτων στις συγκεκριμένες ημέρες.

Όσον αφορά στη δομή των προσομοιωμάτων, στην πρώτη υποομάδα παρατηρείται ότι τα δεδομένα όλων των αισθητήρων ακολουθούν προσομοιώματα πρώτης τάξεως, εκτός των αισθητήρων 2, 3, 4, 5, 7 των οποίων τα δεδομένα ακολουθούν προσομοιώματα δεύτερης τάξεως, αποτελέσματα παρόμοια με αυτά της θερμοκρασίας. Οι αισθητήρες αυτοί, εκτός του 5, βρίσκονταν στο κατώτερο επίπεδο του θερμοκηπίου, 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους, όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο σχήμα σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ο αισθητήρας 5 βρισκόταν στα 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους. Συνεπώς τα χαρακτηριστικά του αέρα στις θέσεις αυτές ακολουθούν διαφορετική πορεία αλλαγής τους όταν ο αέρας θερμαίνεται από το σύστημα θέρμανσης. Αντίστοιχα για την δεύτερη υποομάδα, τα δεδομένα των αισθητήρων που δεν ακολουθούν προσομοιώματα πρώτης τάξεως είναι των 2, 6 και 10. Οι αισθητήρες αυτοί, εκτός του 2, βρίσκονταν στο επίπεδο 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους.

Συνεπώς, η σχετική υγρασία συμπεριφέρεται με παρόμοιο τρόπο με τη θερμοκρασία, όταν ο αέρας θερμαίνεται και ψύχεται, λόγω της επίδρασης του συστήματος θέρμανσης. Οι βασικές διαφορές εντοπίζονται στα δεδομένα των αισθητήρων 2 και 10 που παρουσίασαν πολύπλοκη συμπεριφορά για τη σχετική υγρασία και όχι για τη θερμοκρασία. Γενικότερα, υπάρχει όμοια συμπεριφορά μεταξύ των δύο μεταβλητών, γεγονός απολύτως λογικό, αφού η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία είναι χαρακτηριστικά αλληλένδετα.

Από τα παραπάνω προσομοιώματα, κανένα δεν αποδείχθηκε ικανό να προβλέψει την εσωτερική σχετική υγρασία για όλες τις ημέρες, ανεξαρτήτου συστήματος θέρμανσης. Το γεγονός αυτό είναι φυσιολογικό, καθώς τα προσομοιώματα δημιουργήθηκαν μόνο για πρόβλεψη κατά τη λειτουργία του συστήματος θέρμανσης, όπως αποδείχθηκε και για τη θερμοκρασία.

Γενικά, όπως φαίνεται και στο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, δεν έχουν γίνει πειράματα για τη δημιουργία προσομοιωμάτων κατά τη λειτουργία του συστήματος θέρμανσης. Τα περισσότερα προσομοιώματα που έχουν μελετηθεί αφορούν στην πρόβλεψη και εκτίμηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του θερμοκηπίου, για μεγάλο χρονικό διάστημα (συνεχόμενες ημέρες) και για συστήματα όπως ο φυσικός αερισμός του θερμοκηπίου.

Οι Bouzo et al. (2006) δημιούργησαν προσομοίωμα ικανό να προβλέπει και να υπολογίζει την ωριαία εξέλιξη της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό θερμοκηπίου, στην περιοχή της Αργεντινής, καθώς στην περιοχή αυτή μετά το χειμώνα παρατηρούνται απότομες αυξήσεις στη θερμοκρασία, που δημιουργούν ανεπανόρθωτες ζημιές στην καλλιέργεια και στην ποιότητα του προϊόντος.

Στο Μεξικό, οι Lopez-Cruz et al. (2005), μετά από πειραματικές μελέτες δημιούργησαν ARX προσομοιώματα για την πρόβλεψη της εσωτερικής θερμοκρασίας του θερμοκηπίου. Ως ανεξάρτητες μεταβλητές στο σύστημα, χρησιμοποιήθηκαν η ηλιακή ακτινοβολία, η εξωτερική θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου και η σχετική υγρασία στο εξωτερικό μέρος του θερμοκηπίου.

Επίσης, οι Youssef et al. (2009) δημιούργησαν προσομοιώματα βάσης δεδομένων, που να μπορούν να περιγράψουν την εσωτερική θερμοκρασία στο εσωτερικό διαφόρων τύπων θερμοκηπίου και σε διαφορετικές περιοχές. Πραγματοποίησαν πειράματα στο Βέλγιο και στην Ελλάδα, και για δύο τύπους θερμοκηπίων και τα αποτελέσματα που πήραν ήταν ικανοποιητικά, αν και παρατηρήθηκε ότι για τις δύο χώρες τα προσομοιώματα ήταν διαφορετικής τάξεως, καθώς οι κλιματικές συνθήκες αυτών διαφέρουν αρκετά.

Κεφάλαιο 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1. Συμπεράσματα

Βασική λειτουργία των συστημάτων κλιματισμού του θερμοκηπίου είναι να διατηρούνται τα χαρακτηριστικά του αέρα στα επιθυμητά επίπεδα για τη μέγιστη απόδοση της καλλιέργειας. Εκτός από τη θέρμανση του αέρα είναι σημαντικό η θερμοκρασία της καλλιέργειας να είναι κοντά στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα καθώς επίσης να μη δημιουργούνται υγροποιήσεις ούτε στην καλλιέργεια αλλά ούτε και στο υλικό κάλυψης του θερμοκηπίου. Για τη μεγιστοποίηση της φυτικής παραγωγής του θερμοκηπίου πρέπει στην επιφάνεια των φύλλων των φυτών να πετύχουμε συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο άριστο επίπεδο. Σε ένα θερμοκήπιο που θερμαίνεται με ένα σύστημα θέρμανσης και παράλληλα αναδύεται συνεχώς ο αέρας του με δυναμικά μέσα στο επίπεδο των φυτών διατηρούνται θερμοκρασίες πιο ομοιόμορφες. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα γενικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την χρήση των συστημάτων θέρμανσης και δροσισμού, παράλληλα με την χρήση του συστήματος κυκλοφορίας του αέρα.

5.1.1. ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Την περίοδο λειτουργίας **μόνο των συστημάτων θέρμανσης**, η κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα παρατηρείται ότι μειώνεται κατά $0,3^{\circ}\text{C}$ καθώς απομακρυνόμαστε από το πάνω μέρος της καλλιέργειας. Δηλαδή, στο 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους η μέση τιμή της κυμαίνεται στους $13,8^{\circ}\text{C}$ ενώ πάνω από τη επιφάνεια των φυτών αυξάνεται στους $14,1^{\circ}\text{C}$. Παρόλα αυτά, υπάρχουν σημεία μέσα στην καλλιέργεια που έχουν μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας σε σχέση με τη συνολική κατανομή που υπάρχει. Υπάρχουν μετρήσεις που δείχνουν μία διαφορά 4°C με χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας στους 12°C και υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας στους 16°C κατά μήκος του θερμοκηπίου. Αντίστοιχα οι μέσες τιμές της σχετικής υγρασίας παρουσιάζουν μία διαφορά 2% όσο απομακρυνόμαστε από την καλλιέργεια. Δηλαδή παρατηρείται μία μέση τιμή σχετικής υγρασίας 88% στο επίπεδο των φυτών και 86% στο επίπεδο πάνω από τα φυτά. Μέσω του συντελεστή μεταβλητότητας, αποδείχθηκε μια σχετική ομοιομορφία στην κατανομή της

θερμοκρασίας, αλλά μια σχετική ανομοιομορφία στην κατανομή της σχετικής υγρασίας.

Την περίοδο που λειτούργησαν **ταυτόχρονα τα συστήματα θέρμανσης και το σύστημα κυκλοφορίας του αέρα (ανεμομίκτης)**, προκύπτουν μέσες τιμές θερμοκρασιών 14,4°C και 14°C στα 2,5 m και στα 1 m, με αντίστοιχες τιμές σχετικής υγρασίας 89,7% και 92%. Δηλαδή, η κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα μειώνεται κατά 0,4°C καθώς απομακρυνόμαστε από το πάνω μέρος της καλλιέργειας, ενώ της σχετικής υγρασίας 2,3%. Στο επίπεδο της καλλιέργειας (1,5 m), παρουσιάζεται μια ομοιογένεια θερμοκρασίας, στο μικροκλίμα με την διαφορά της χαμηλότερης (13,7°C) από την υψηλότερη (14,6°C) θερμοκρασία να είναι 0,9°C. Στο επίπεδο πάνω από την καλλιέργεια (2,5 m), η σχετική υγρασία δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφορές κατά μήκος του θερμοκηπίου. Στην μεταχείριση που πραγματοποιήθηκε στις 11/12 αν αφαιρέσουμε την τιμή 81% (αισθητήρας 9) που βρίσκεται ακριβώς μπροστά από το αερόθερμο, η διαφορά της αμέσως επόμενης μικρότερης (85%) από την υψηλότερη (89%) είναι 4%. Από πειραματικές μελέτες γνωρίζουμε ότι μέσα σ' ένα θερμοκήπιο που θερμαίνεται, με ένα σύστημα θέρμανσης, και παράλληλα αναδεύεται συνεχώς ο αέρας του με δυναμικά μέσα, στο επίπεδο των φυτών, διατηρούνται θερμοκρασίες πιο ομοιόμορφες, και το σύστημα θέρμανσης καταναλώνει λιγότερη ενέργεια. Επίσης η σχετική υγρασία του χώρου είναι μικρότερη, απ' ό,τι μέσα σε ένα θερμοκήπιο που θερμαίνεται μόνο, χωρίς δυναμική κίνηση του αέρα. (Μαυρογιαννόπουλος, 2005)

Την περίοδο λειτουργίας των **συστημάτων θέρμανσης και του συστήματος ανάμιξης του αέρα, ανά δεκάλεπτο λειτουργίας**, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα. Προκύπτουν μέσες τιμές θερμοκρασιών 14°C και 13,7°C στα 2,5 m και στα 1,5 m, με αντίστοιχες τιμές σχετικής υγρασίας 82,5% και 84,5%. Δηλαδή, η κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα μειώνεται κατά 0,3°C καθώς απομακρυνόμαστε από το πάνω μέρος της καλλιέργειας, ενώ της σχετικής υγρασίας κατά 2%. Στην συγκεκριμένη μεταχείριση παρατηρήθηκαν αρκετά μεγάλες διαφορές στην κατανομή της σχετικής υγρασίας, στο επίπεδο ενδιάμεσα στα φυτά. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η διαφορά της υψηλότερης με τη χαμηλότερη τιμή της σχετικής υγρασίας, ενδιάμεσα στα φυτά ήταν 16,5%. Πάνω από το επίπεδο της καλλιέργειας, επικρατούσε μία καλύτερη ομοιογένεια της σχετικής υγρασίας. Όσον αφορά στην κατανομή της θερμοκρασίας, διαπιστώνεται, μία ομοιομορφία στην

κατανομή των θερμοκρασιών χωρίς μεγάλες αποκλίσεις, στο επίπεδο των φυτών, αλλά και στο επίπεδο πάνω από την καλλιέργεια.

Για την ανοιχτή οριζόντια, μετακίνηση του αέρα μέσα στο χώρο του θερμοκηπίου, θεωρείται αρκετή μια εγκατάσταση ανεμιστήρων συνολικής παροχής $\frac{1}{4}$ του όγκου του θερμοκηπίου ανά λεπτό. Μελέτη του πανεπιστημίου του Kentucky αναφέρει ότι η ευνοϊκή διάμετρος των ανεμιστήρων είναι περίπου 30cm και τοποθετούνται πλησίον της οροφής με μία κλίση $10^\circ - 15^\circ$ προς το εσωτερικό του θερμοκηπίου. Εάν το μήκος ενός στενού (έως 8 m πλάτος) θερμοκηπίου είναι μικρότερο από 20m, απαιτούνται 1 έως 2 ανεμιστήρες που τοποθετούνται διαγώνια στις δύο γωνίες. Εάν το μήκος είναι μεγαλύτερο από 20 m, απαιτούνται επί πλέον ανεμιστήρες ενδιάμεσα. Για διπλάσιο πλάτος θερμοκηπίου απαιτούνται διπλάσιοι ανεμιστήρες. (Μαυρογιανόπουλος, 2005)

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένας ανεμιστήρας, για την ανάδευση του εσωτερικού αέρα στο θερμοκήπιο και παρουσιάστηκαν τα παραπάνω αποτελέσματα. Με την χρήση και 2^{ου} ανεμιστήρα, τοποθετημένου στην άλλη γωνία του θερμοκηπίου, σύμφωνα με βιβλιογραφία, τα αποτελέσματα θα ήταν καλύτερα και θα επιτυγχάνονταν μεγαλύτερη ομοιογένεια στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου.

Συμπερασματικά, προκύπτει ότι η συνδυασμένη λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης και του ανεμομίκτη, είναι προτιμότερη αφού δημιουργείται ομοιόμορφο μικροκλίμα, κατά μήκος του θερμοκηπίου. Έτσι επιτυγχάνουμε:

- Ομοιόμορφη θερμοκρασία αέρα, κατά μήκος του θερμοκηπίου
- Ομοιόμορφη κατανομή της σχετικής υγρασίας, ευκολότερη μείωσή της
- Καλύτερη φυσιολογική λειτουργία της καλλιέργειας
- Μείωση του ρυθμού υγροποιήσεων στην επιφάνεια των φύλλων

5.1.2. ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΡΟΣΙΣΜΟΥ

Προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές συνθήκες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, πρέπει να αφαιρέσουμε μια ποσότητα θερμότητας με τη χρήση κάποιου συστήματος δροσίσιμου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο δροσίσιμος προερχόταν από έναν νεφελοψεκαστήρα του οποίου η παροχή ρυθμίζονταν ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε μεταχείρισης.

Κατά την **1^η μέτρηση**, φαίνεται ότι η συμπεριφορά της σχετικής υγρασίας, όσον αφορά στην κατανομή της στο χώρο, διαφέρει στα δύο επίπεδα των μετρήσεων. Στο πρώτο επίπεδο 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους, όπου βρίσκεται και ο νεφελοψεκαστήρας, επιτυγχάνεται πιο εύκολα μεγαλύτερη ομοιομορφία στο χώρο και με πιο σταθερό ρυθμό. Αντιθέτως, στο δεύτερο επίπεδο 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους, η ομοιομορφία επιτυγχάνεται με μεγαλύτερη δυσκολία, αν και τελικά η τιμή του CV και στα δύο επίπεδα καταλήγει να είναι η ίδια.

Κατά τη **2^η μέτρηση**, παρατηρήθηκε ότι όταν ξεκινά να λειτουργεί ο νεφελοψεκαστήρας στο 80% της μέγιστης παροχής του, η ομοιομορφία της κατανομής της σχετικής υγρασίας στο χώρο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, αλλά όχι τόσο πολύ όσο όταν το μηχάνημα λειτουργεί στο 100% της παροχής του. Στις 21:00 ο νεφελοψεκαστήρας σταμάτησε να λειτουργεί, ενώ άνοιξαν τα παράθυρα, και στη συνέχεια στις 21:30 άρχισε πάλι να λειτουργεί στο 100% της παροχής τους. Όπως παρατηρείται, η ομοιομορφία δεν αυξήθηκε πολύ ομαλά και στα δύο επίπεδα, εφόσον δεν ακολούθησε αύξουσα σταθερή πορεία. Παρόλ' αυτά, αυξήθηκε πολύ περισσότερο απ' ότι όταν ο νεφελοψεκαστήρας λειτουργούσε με μικρότερη ισχύ.

Στην **3^η μέτρηση**, παρατηρήθηκε ότι όταν ξεκινά να λειτουργεί ο νεφελοψεκαστήρας στο 80% της μέγιστης παροχής του, η ομοιομορφία της κατανομής της σχετικής υγρασίας στο χώρο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, αλλά όχι τόσο πολύ όσο όταν το μηχάνημα λειτουργεί στο 100% της παροχής του. Στις 21:00 ο νεφελοψεκαστήρας σταμάτησε να λειτουργεί, ενώ άνοιξαν τα παράθυρα, και στη συνέχεια στις 21:30 άρχισε πάλι να λειτουργεί στο 100% της παροχής τους. Όπως παρατηρείται, η ομοιομορφία δεν αυξήθηκε πολύ ομαλά και στα δύο επίπεδα, εφόσον δεν

ακολούθησε αύξουσα σταθερή πορεία. Παρόλ' αυτά, αυξήθηκε πολύ περισσότερο απ' ότι όταν ο νεφελοψεκαστήρας λειτουργούσε με μικρότερη ισχύ.

Κατά την **4^η μέτρηση**, διαπιστώθηκε ότι η κατανομή της σχετικής υγρασίας στο επίπεδο 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους παρουσιάζει μεγάλη ομοιομορφία από τη στιγμή που ξεκινά να λειτουργεί ο νεφελοψεκαστήρας μέχρι να σταματήσει στις 22:00, αν και αρχικά αυξάνει απότομα η ομοιομορφία ($CV=5$) και στη συνέχεια μειώνεται και παραμένει σταθερή στο $CV=6$, μέχρι να αυξηθεί και πάλι στο $CV=4$. Παρόμοια μείωση της ομοιομορφίας παρατηρείται και στη δεύτερη φάση των μετρήσεων, από τις 22:30 που τίθεται πάλι σε λειτουργία ο νεφελοψεκαστήρας, ενώ στο τέλος πάλι αυξάνει στο $CV=5$. Για το δεύτερο επίπεδο 2,5m από την επιφάνεια του εδάφους, παρατηρείται μεγαλύτερη ανομοιογένεια, από κάθε άλλη μέτρηση και των προηγούμενων ημερών. Αρχικά, στις 19:50 η ομοιομορφία της κατανομής είναι υψηλή ($CV=6$), ενώ μετά από 10 λεπτά μειώνεται απότομα ($CV=19$) και αυξάνει πάλι απότομα ($CV=13$ και $CV=4$), μέχρι να σταθεροποιηθεί στο $CV=5$. Στη δεύτερη φάση των μετρήσεων, από τις 22:30 παρουσιάζεται ομαλότερος ρυθμός μεταβολής της ομοιομορφίας, με σταθεροποίηση στο $CV=4$.

Η διαφορετική αυτή συμπεριφορά της κατανομής της σχετικής υγρασίας στο χώρο του θερμοκηπίου, έγκειται στην μικρότερη ισχύ με την οποία λειτουργούσε ο νεφελοψεκαστήρας. Λόγω της μικρότερης αυτής ισχύος, τα σταγονίδια του νεφελοψεκαστήρα κινούνταν με μικρότερη ταχύτητα στο χώρο και μεταφέρονταν σε όλη την επιφάνεια του θερμοκηπίου με πιο αργό ρυθμό. Επομένως, ήταν δύσκολο να δημιουργηθεί μεγάλη ομοιομορφία σε σύντομο χρονικό διάστημα και ομαλά.

Τέλος στην **5^η μέτρηση**, παρατηρήθηκε ότι η κατανομή της σχετικής υγρασίας στο επίπεδο 1,5m από την επιφάνεια του εδάφους ξεκινά ανομοιογενώς στις 19:10 ($CV=11$), έπειτα η ομοιογένεια μειώνεται για τα επόμενα 20 λεπτά και στη συνέχεια αυξάνει πολύ αλλά με πιο αργό ρυθμό από τις προηγούμενες μετρήσεις ($CV=3$ στις 22:00). Στη δεύτερη φάση των μετρήσεων, από τις 22:20, ενώ έχουν ανοίξει τα παράθυρα, η ομοιομορφία δεν μειώνεται πάρα πολύ, αφού η τιμή του CV αυξάνει μόνο κατά 1 μονάδα. Έπειτα ο CV μειώνεται αργά και σταθερά μέχρι την τιμή 2. Στο δεύτερο επίπεδο 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους, η σχετική υγρασία συμπεριφέρεται με τελείως διαφορετικό τρόπο από τις μετρήσεις των προηγούμενων ημερών, καθώς η ομοιομορφία αυξάνει σταδιακά και με σταθερό ρυθμό, χωρίς να

ελαττωθεί αμέσως μετά την έναρξη λειτουργίας των μηχανημάτων. Επίσης, όπως και στο κατώτερο επίπεδο, παρατηρείται κατά τη δεύτερη φάση των μετρήσεων, μικρή μείωση της ομοιομορφίας, μετά το άνοιγμα των παραθύρων (CV=2 στις 22:30).

Συμπερασματικά, από τις μετρήσεις της σχετικής υγρασίας τις 5 αυτές ημέρες, παρουσιάζεται μεγάλη και γρήγορη ομοιομορφία στην κατανομή της όταν ο νεφελοψεκαστήρας λειτουργεί στο 100% της μέγιστης παροχής του, ενώ φαίνεται μεγάλη αλλά αργή μεταβολή της ομοιομορφίας, όταν λειτουργεί με μικρότερη ισχύ. Επίσης, όταν λειτουργεί στο 100% της μέγιστης παροχής του, προστίθεται στον αέρα μεγαλύτερη ποσότητα υγρασίας, η οποία κατανέμεται σε όλο το χώρο, με αποτέλεσμα, μόλις ανοίξουν τα παράθυρα, η υγρασία αυτή να χάνεται στον εξωτερικό χώρο γρήγορα και βίαια. Έτσι, στη δεύτερη φάση των μετρήσεων, όταν τίθεται πάλι σε λειτουργία ο νεφελοψεκαστήρας, η ομοιομορφία της σχετικής υγρασίας στο χώρο έχει χαθεί, εφόσον οι τιμές του CV είναι και πάλι υψηλές. Αντιθέτως, όπως παρατηρείται στις μετρήσεις με μικρότερες παροχές του νεφελοψεκαστήρα, η υγρασία που προστίθεται στο χώρο από τα σταγονίδια του νεφελοψεκαστήρα είναι λιγότερη, επομένως όταν ανοίγουν τα παράθυρα χάνεται μικρότερη ποσότητα αυτής στο περιβάλλον εκτός του θερμοκηπίου. Έτσι, στη δεύτερη φάση των μετρήσεων η αρχική ομοιομορφία είναι πάντοτε καλύτερη, αφού έχει χαθεί μικρότερη ποσότητα υγρασίας αργά και όχι βίαια. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι όταν ο νεφελοψεκαστήρας λειτουργούσε με υψηλότερη ισχύ, τότε η διάρκεια αερισμού του θερμοκηπίου ήταν μεγαλύτερη από αυτή, όταν λειτουργούσε με μικρότερη ισχύ.

Επομένως, σε περιπτώσεις όπου η εξωτερική θερμοκρασία του αέρα δεν είναι επικίνδυνα υψηλή, η καλύτερη κατανομή που επιτυγχάνεται στο θερμοκήπιο για τη σχετική υγρασία, είναι με την ισχύ του νεφελοψεκαστήρα μειωμένη στο 80 ή 60%. Με την ισχύ αυτή, από τη μια παρέχεται η επιθυμητή ποσότητα υγρασίας στο χώρο, για τη δημιουργία ευνοϊκότερου κλίματος για τα φυτά, αλλά και από την άλλη, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας, σε σχέση με την περίπτωση ισχύος στο 100%, όπου το μηχάνημα απαιτεί περισσότερη ενέργεια για να λειτουργήσει στο μέγιστο των δυνατοτήτων του και σε σχέση με την περίπτωση ισχύος στο 40%, που απαιτείται μεγαλύτερη διάρκεια λειτουργίας του για να μεταφερθεί η επιθυμητή ποσότητα υγρασίας στο χώρο.

5.1.3. ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

Ένας άλλος τρόπος παρατήρησης της ομοιομορφίας του κλίματος μέσα στο θερμοκήπιο, είναι αυτός με τη χρήση προσομοιωμάτων. Επίσης, με τα προσομοιώματα είναι δυνατή και η μελέτη της συμπεριφοράς του κλίματος.

Όσον αφορά στην εσωτερική θερμοκρασία του θερμοκηπίου, τα προσομοιώματα που επιλέχθηκαν λειτουργούν με μεγάλη ακρίβεια, εφόσον οι τιμές του R_T^2 είναι πάνω από 0,75 που θεωρείται το κατώτερο επιτρεπτό όριο ακρίβειας. Όσον αφορά στην πρώτη υποομάδα με την ένδειξη «Άνοιγμα θέρμανσης», οι τιμές του R_T^2 ήταν πάνω από 0,90, γεγονός που υποδεικνύει μεγάλη ακρίβεια του προσομοιώματος. Όσον αφορά στην δεύτερη υποομάδα με την ένδειξη «Κλείσιμο θέρμανσης», οι τιμές του R_T^2 ήταν πάνω από 0,90, γεγονός που υποδεικνύει μεγάλη ακρίβεια του προσομοιώματος, με κάποιες εξαιρετικές περιπτώσεις, όπως οι αισθητήρες 5, 7, 9 και 10 που παρουσίασαν για κάποιες ημέρες μικρότερη ακρίβεια, αλλά πάλι εντός των αποδεκτών ορίων. Οι τιμές του YIC κριτηρίου ήταν για τα περισσότερα προσομοιώματα αρκετά αρνητικές (γεγονός που υποδεικνύει μεγάλη προσαρμοστικότητα του προσομοιώματος σε διαφορετικές συνθήκες), με κάποιες εξαιρετικές περιπτώσεις όπου οι τιμές ήταν θετικές και επηρέασαν αρκετά την ακρίβεια των προσομοιωμάτων στις συγκεκριμένες ημέρες.

Μια άλλη σημαντική παρατήρηση στα παραπάνω αποτελέσματα είναι και η δομή των προσομοιωμάτων, η οποία χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά του αέρα στα διάφορα σημεία του θερμοκηπίου. Στην πρώτη υποομάδα παρατηρείται ότι τα δεδομένα όλων των αισθητήρων ακολουθούν προσομοιώματα πρώτης τάξεως, εκτός των αισθητήρων 3, 4, 5, 7 των οποίων τα δεδομένα ακολουθούν προσομοιώματα δεύτερης τάξεως. Οι αισθητήρες αυτοί, εκτός του 5, βρίσκονταν στο κατώτερο επίπεδο του θερμοκηπίου, 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους, όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο σχήμα σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ο αισθητήρας 5 βρισκόταν στα 2,5m από την επιφάνεια του εδάφους. Συνεπώς τα χαρακτηριστικά του αέρα στις θέσεις αυτές ακολουθούν διαφορετική πορεία αλλαγής τους όταν ο αέρας θερμαίνεται από το σύστημα θέρμανσης. Αντίστοιχα για την δεύτερη υποομάδα, τα δεδομένα των αισθητήρων που δεν ακολουθούν προσομοιώματα πρώτης τάξεως είναι των 6 και 8. Οι αισθητήρες αυτοί βρίσκονταν στο επίπεδο 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους. Συνεπώς, όταν

ο αέρας θερμαίνεται, τα σημεία που βρίσκονται κοντά στο σύστημα θέρμανσης συμπεριφέρονται με πιο πολύπλοκο τρόπο (δεύτερης τάξεως προσομοιώματα) από αυτά που είναι πιο απομακρυσμένα από αυτό. Επίσης, όταν ο αέρας επανέρχεται στα φυσικά χαρακτηριστικά του, συμπεριφέρεται διαφορετικά, εφόσον τα σημεία που ακολουθούν δεύτερης τάξεως προσομοιώματα, είναι αυτά που βρίσκονται κοντά στο σύστημα θέρμανσης, αλλά σε υψηλότερα σημεία του θερμοκηπίου.

Όσον αφορά στη σχετική υγρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, τα προσομοιώματα που επιλέχθηκαν λειτουργούν με μεγάλη ακρίβεια, εφόσον οι τιμές του R_T^2 είναι πάνω από 0,75, εκτός του αισθητήρα 5 της πρώτης υποομάδας. Όσον αφορά στην πρώτη υποομάδα με την ένδειξη «Άνοιγμα θέρμανσης», οι τιμές του R_T^2 ήταν πάνω από 0,90, γεγονός που υποδεικνύει μεγάλη ακρίβεια του προσομοιώματος, εκτός των αισθητήρων 5 και 10 που παρουσίασαν τιμές μικρότερες του 0,90 για κάποιες ημέρες. Όσον αφορά στην δεύτερη υποομάδα με την ένδειξη «Κλείσιμο θέρμανσης», οι τιμές του R_T^2 ήταν πάνω από 0,90, γεγονός που υποδεικνύει μεγάλη ακρίβεια του προσομοιώματος, με κάποιες εξαιρετικές περιπτώσεις, όπως οι αισθητήρες 6, 7, 8, 9 και 10 που παρουσίασαν για κάποιες ημέρες μικρότερη ακρίβεια, αλλά πάλι εντός των αποδεκτών ορίων. Οι τιμές του YIC κριτηρίου ήταν για τα περισσότερα προσομοιώματα αρκετά αρνητικές (γεγονός που υποδεικνύει μεγάλη προσαρμοστικότητα του προσομοιώματος σε διαφορετικές συνθήκες), με κάποιες εξαιρετικές περιπτώσεις όπου οι τιμές ήταν θετικές και επηρέασαν αρκετά την ακρίβεια των προσομοιωμάτων στις συγκεκριμένες ημέρες.

Όσον αφορά στη δομή των προσομοιωμάτων, στην πρώτη υποομάδα παρατηρείται ότι τα δεδομένα όλων των αισθητήρων ακολουθούν προσομοιώματα πρώτης τάξεως, εκτός των αισθητήρων 2, 3, 4, 5, 7 των οποίων τα δεδομένα ακολουθούν προσομοιώματα δεύτερης τάξεως, αποτελέσματα παρόμοια με αυτά της θερμοκρασίας. Οι αισθητήρες αυτοί, εκτός του 5, βρίσκονταν στο κατώτερο επίπεδο του θερμοκηπίου, 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους, όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο σχήμα σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ο αισθητήρας 5 βρισκόταν στα 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους. Συνεπώς τα χαρακτηριστικά του αέρα στις θέσεις αυτές ακολουθούν διαφορετική πορεία αλλαγής τους όταν ο αέρας θερμαίνεται από το σύστημα θέρμανσης. Αντίστοιχα για την δεύτερη υποομάδα, τα δεδομένα των αισθητήρων που δεν ακολουθούν προσομοιώματα πρώτης τάξεως είναι των 2, 6 και

10. Οι αισθητήρες αυτοί, εκτός του 2, βρίσκονταν στο επίπεδο 2,5 m από την επιφάνεια του εδάφους.

Συνεπώς, η σχετική υγρασία συμπεριφέρεται με παρόμοιο τρόπο με τη θερμοκρασία, όταν ο αέρας θερμαίνεται και ψύχεται, λόγω της επίδρασης του συστήματος θέρμανσης. Οι βασικές διαφορές εντοπίζονται στα δεδομένα των αισθητήρων 2 και 10 που παρουσίασαν πολύπλοκη συμπεριφορά για τη σχετική υγρασία και όχι για τη θερμοκρασία. Γενικότερα, υπάρχει όμοια συμπεριφορά μεταξύ των δύο μεταβλητών, γεγονός απολύτως λογικό, αφού η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία είναι χαρακτηριστικά αλληλένδετα.

Γενικά, αποδείχθηκε ότι τα προσομοιώματα αυτά που ήταν ικανά να περιγράψουν τη συμπεριφορά του αέρα κατά τη διάρκεια λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης, αδυνατούσαν να περιγράψουν τη συμπεριφορά του αέρα καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας ή ακόμη και για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα.

Εφόσον επιτυχάνθηκε η δημιουργία και επαλήθευση τόσο εξειδικευμένων προσομοιωμάτων, ένα βήμα παραπέρα στην έρευνα θα μπορούσε να αποτελέσει η ανάλυση των παραμέτρων τους, ώστε να εκμαιεύσουμε περισσότερες πληροφορίες για τη συμπεριφορά του αέρα, αλλά και η ενσωμάτωση των προσομοιωμάτων σε συστήματα ελέγχου του μικροκλίματος, με σκοπό την μεγαλύτερη ακρίβεια στη διαχείριση των μεταβλητών του μικροκλίματος, αλλά και την εξοικονόμηση ενέργειας των συστημάτων θέρμανσης. Η έρευνα από διάφορους μελετητές έχει αποδείξει ότι χρησιμοποιούνται ήδη πολλά “black-box” προσομοιώματα, για τον έλεγχο του κλίματος του θερμοκηπίου και την πρόβλεψη αυτού, χωρίς βέβαια να εξειδικεύονται σε συγκεκριμένα συστήματα όπως στην παρούσα διατριβή.

Παρόλ' αυτά, η εξέλιξη της έρευνας είναι πολύ ενθαρρυντική αφού μετά από χρόνια θα έχει καταστεί δυνατός ο συνδυασμός όλων των προαναφερθέντων μεθόδων για τη μελέτη της κατανομής του μικροκλίματος, την μελέτη της ομοιομορφίας της, την πρόβλεψή της με ακρίβεια, αλλά και την συνολική εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Acock, B., Charles-Edwards, D.A, Hand, D.W., 1976. An analysis of some effects of humidity on photosynthesis by a tomato canopy under winter light conditions and a range of carbon dioxide concentrations. *Journal of Experimental Botany*, 27,100:933 – 941.
- Alhama, F., Alarcón, M. and González Fernández, C., 2000. A Transient Greenhouse Climate Control Model by the Network Simulation Method. In: V International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates: Current Trends for Sustainable Technologies 559, 457-463, ISHS.
- Andersson, N.E., 2009. The impact of overhead heating system height on greenhouse air temperature, air movement, and canopy temperature.
- Assaf, G. and Zieslin, N., 1996. Night water consumption by rose plants. *Journal of Horticultural Science*, 71(4), 673-678.
- Bailey, B. J., 1984. Limiting the relative humidity in insulated greenhouses at night. *Acta Horticulturae*, 148, 411-419.
- Bailey, B. J., 1975. The design of ducted-air heating systems. *Acta Horticulturae*, 46, 41-54.
- Baille, A., 1995. Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61,37-48.
- Baille, M., Delmon, D., Jacquemont, R., Antonioletti, R., Baille, A., Sappe, G., 1983. Etude comparative de deux systemes de chauffage de serre: aérotherm et thermosiphon. *Aspects Energetiques et Microclimatiques. P.H.M. Revue. Horticulture*, 234, 39-42.
- Bakker, J C., Bot, G.P.A., Challa, H., Van de Braak N.J., 1995. Greenhouse climate control. An integrated approach. Wageningen Pers, Wageningen, The Netherlands, 279 ,ISBN 90-74134-17-3.
- Bakker, J.C. 2006. Model application for energy efficient greenhouses in the Netherlands: Greenhouse design, operational control and decision support systems. *Acta Horticulturae* 718, 191-201.,
- Bartzanas, T., Kittas, C., 2001. Optimisation of greenhouses ventilation performance with computational fluid dynamics. In: 2nd Southeastern Europe Fluent users Group Meeting, Bucharest Romania, CD-ROM, Simtec Eds, Thessaloniki, Greece.

- Bartzanas, T., Boulard, T., Kittas, C., 2004. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosystems Engineering*, 88(4), 479–490.
- Bartzanas, T., Boulard, T., Kittas, C., 2002. Numerical simulation of the airflow and temperature distributions in a tunnel greenhouse equipped with insect-proof screen in the openings. *Computers and Electronics in Agriculture* 34, 207–221.
- Bartzanas, T., Tchamitchian, M., Kittas, C., 2005. Influence of the heating method on greenhouse microclimate and energy consumption. *Biosystems Engineering*, 91(4), 487-499.
- Bennis, N., Duplaix, J., En_ea, G., Haloua, M. and Youlal, H., 2008. Greenhouseclimate modelling and robust control. *Computers and Electronics in Agriculture*.
- Berckmans, D. and Aerts, J.M., 2009. Course Biological response measurements for process management (-I0O82a-). Faculteit Bio- ingenieurswetenschappen (FBIW), K.U. Leuven, Leuven.
- Boaventura Cunha, J., Couto, C., Ruano, A., 1997. Real-time parameter estimation of dynamic temperature models for greenhouse environmental control. *Control Engineering Practice*, 5(10):,1473-1481.
- Bohanon, H.R., 1962. Air circulating and mixing fan. United States Patent Office. Patented August 28.
- Bot, G.P.A., 1983. Greenhouse climate: from physical process to a dynamic model. Ph.D. Thesis. Agricultural University of Wageningen, Wageningen, The Netherlands.
- Bot, G.P.A., Van de Braak, N.J., 1995. Transport phenomena. In: *Greenhouse Climate Control: An integrated Approach*. Wageningen Pers, Wageningen, 125-134.
- Boulard T., Baille A., Lagier J., Mermier M., Vanderschmitt E., 1989. Water vapour transfer in a plastic house equipped with a dehumidification heat pump. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 44:,191-204.
- Boulard, T., and Draoui, B., 1995. Natural ventilation of a greenhouse with continuous roof vents: measurement and data analysis. *J. Agric. Eng. Res.* 61, 27–36.
- Boulard, T., Haxaire, R., Lamrani, M.A., Roy, J.C., Jaffrin, A., 1999. Characterization and modelling of the air fluxes induced by natural ventilation in a greenhouse. *J. Agric. Eng. Res.* 74, 135–144.

- Boulard, T., Kittas, C., Papadakis, G., Mermier, M., 1998a. Pressure field and airflow at the opening of a naturally ventilated greenhouse. *J. Agric. Eng. Res.* 71, 93–102.
- Boulard, T., Lamrani, M.A., Roy, J.C., Jaffrin, A., Bouirden, L., 1998b. Natural ventilation by thermal effect in a 1/2 scale model mono-span greenhouse. *Trans. ASAE* 41 (3), 773–781.
- Boulard, T., Meneses, J.F., Papadakis, G., Mermier, M., 1996. The mechanism involved in the natural ventilation of greenhouse. *Agric. For. Meteorol.* 79, 61–77.
- Boulard, T., Papadakis, G., Kittas, C., Mermier, M., (1997). Air flow and associated sensible heat exchanges in a naturally ventilated greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 88:,121-135.
- Bouzo, C.A., Gariglio, N.F., Pilatti, R.A., Grenon, D.A., Favaro, J.C., Bouchet, E.R., Freyre, C., 2006. “InverSim”: A simulation model for a greenhouse. *Acta Horticulturae*, 719, 271-278.
- Bridges, T.C., Gates, R.S., Chao, K.L., Turner, L.W. and Minagawa, H. 1995. Techniques for development of swine performance response. *Trans. ASAE*, 38(5), 1505-1511.
- Campen, J.B., Bot, G.P.A., 2003. Determination of greenhouse-specific aspects of ventilation using three-dimensional computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering* 84 (1), 69–77.
- Ceulemans, R.J., 1985. Plant growth optimization by photosynthetic monitoring. *Acta Horticulturae*, 174: 309-312.
- Challa, H., 1981. Some remarks concerning the use of models in greenhouse climate research. *Acta Horticulturae*, 107, 117-120
- Challa, H., 1979. Some remarks concerning the use of models in greenhouse climate research. *Optimalisation of Plant Growth under Protected Cultivation through Microclimate Control* 107, 117-120.
- Cockshull, K.E., Graves, C.J., Hand, D.W., 1987. The effects of humidity on growth and nutrient composition of tomatoes. *G.C.R.I Report* 86-87, 76-77.
- Cunha, J., 2003. Greenhouse climate models: an overview. In: *Proc. of the EFITA2003 Conference*, pp. 5-9, Citeseer.
- Day, W., 1998. The value of crop and greenhouse models in greenhouse environmental control. *Acta Horticulturae*, 456, 295-303.

- De Hallaux, D., Gauthier, L., 1998. Energy consumption due to dehumidification of greenhouses under Northern latitudes. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 69, 35–42.
- De Koning, A.N.M., 1994. Development and dry matter distribution in glasshouse tomato: a quantitative approach. Ph.D Thesis, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Dimokas, G., Katsoulas, N., Tchamitcian, M., Kittas, C. 2008. Validation of a climate simulator in Mediterranean greenhouses during winter period. Proceedings of the 4th International Conference of Hellenic Association of Information and Communication Technologies in Agriculture, Food and Environment. 18 – 20 September, Athens, Greece, 98-107.
- Fatnassi, H., Boulard, T., Bouirden, L., 2003. Simulation of climatic conditions in full scale greenhouse fitted with insect proof screens. *Agricultural and Forest Meteorology* 118, 97–111.
- Fatnassi, H., Boulard, T., Poncet, C., Chave, M., 2006. Optimisation of greenhouse insect screening with computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering* 93 (3), 301–312.
- Fernandez, J. E. and Bailey, B. J., 1992. Measurement and prediction of greenhouse ventilation rates. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58, 229-245.
- Fitz-Rodriguez, E., Kubota, C., Giacomelli, G.A., Tignor, M.E., Wilson, S.B., McMahon M., 2010. Dynamic modelling and simulation of greenhouse environments under several scenarios: A web-based application. *Computers and Electronics in Agriculture*, 70, 105-116.
- Frausto, U. and J.P., P., 2004. Modelling greenhouse temperature using system identification by means of neural networks. *Neurocomputing*, 56, 423-428.
- Gaafer, S. A., Yousef, M. S., Abou-Hadid, A. F., El-Beltagy, A. S., 1990. Water consumption for sweet pepper plant grown under heated and non-heated plastic house conditions. *Acta Horticulturae*, 287, 455-460.
- Hall A.J. and Milthorpe F.L., 1978. Assimilate source-sink relationships in *Capsicum annum* L. III. The effects of fruit excision on photosynthesis and leaf and stem carbohydrates. *Aust. J. Plant. Physiol.*, 5, 1-13.
- Hashimoto, Y., Morimoto, T. and Funada, S., 1982. Identification of water deficiency and photosynthesis I short-term plant growth under random variation of the

- environment. Proceedings of the 6th IFAC Symposium on Identification and System Parameters Estimation 1559-1564.
- Haxaire, R., Boulard, T., Mermier, M., 2000. Greenhouse natural ventilation by wind forces. *Acta Horticulturae* 534, 31-40.
- Jolliet, O., Bailey, B.J., 1992. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58, 43-62.
- Kacira, M., Short, T.H., Stowell, R.R., 1998. A CFD evaluation of naturally ventilated multi-span sawtooth greenhouse. *Trans. ASAE* 41 (3), 833–836.
- Karlsson, M. G., Heins, R. D., Gerberick, J. O., Hackmann, M. E., 1991. Temperature driven leaf unfolding rate in *Hibiscus rosa – sinensis*. *Scientia Horticulturae*, 45, 323-331.
- Kaufmann, M. R., 1982. Leaf conductance as a function of photosynthetic photon flux density and absolute humidity difference from leaf to air. *Plant Physiology*, 69, 1018 – 1022.
- Kempkes, F.L.K., Bakker, J.C., van de Braak, N.J., 1998. Control and modelling of vertical temperature distribution in greenhouse crops. *Acta Horticulturae*, 456, 313-323.
- Kindelan, M., 1980. Dynamic modelling of greenhouse of environment. *Trans. ASAE*. 23 1232-1237
- Kittas, C., Katsoulas, N., Baille, A., 2001. Transpiration and energy balance of a greenhouse rose crop in Mediterranean summer conditions. *Acta Horticulturae*: 559, 395-400.
- Kittas, C., Draoui, B., Boulard, T., 1995. Quantification of the ventilation of a greenhouse with a roof opening. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(1–2), 95–111.
- Kittas, C., Karamanis, M., Katsoulas, N., 2005. Air temperature regime in a forced ventilated greenhouse with rose crop. *Energy and Buildings*, 37, 807-812.
- 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.
- Kozai, T., Sase, S., 1978. A simulation of natural ventilation for a multi span greenhouse. *Acta Hortic.* 87, 339–348.

- Lake, J.V., Postlethwaite, J.D., Slack, J., Edwards, R.I., 1966. Seasonal variation in the transpiration of glasshouse plants. *Agriculture Meteorology*, 3, 187-196.
- Lamrani, M.A., Boulard, T., Roy, J.C., Jaffrin, A., 2001. Airflow and temperature patterns induced in a confined greenhouse. *J. Agric. Eng. Res.* 78, 75–88.
- Lee, I.B., Okushima, L., Ikeguchi, A., Sase, S., Short, T.H., 2000. Prediction of natural ventilation of multi-span greenhouses using CFD techniques and its verification with wind tunnel test. In: *Proceedings of the ASAE Annual International Meeting*, July 9–12, Milwaukee, WI. ASAE Paper 005003.
- Lee, I.B., Short, T.H., 1998. A cfd model of volumetric flow rates for a naturally ventilated, multi-span greenhouse. In: *Proceedings of the ASAE Annual International Meeting*, July 12–16, Orlando, FL. ASAE Paper 987011.
- Lee, I.B., Short, T.H., 2001. Verification of computational fluid dynamic temperature simulations in a full-scale naturally ventilated greenhouse. *Trans. ASAE* 44, 119–127.
- Ljung, L., 1987. *System identification theory for user*. Prentice-Hall, New Jersey.
- López-Cruz, I.L., Ramírez-Arias, A., Rojano-Aguilar, A. and Ruiz-García, A. 2008.
- López-Cruz, I., Van Willigenburg, L. and Van Straten, G., 2003. Efficient differential evolution algorithms for multimodal optimal control problems. *Applied Soft Computing*, 3(2), 97-122.
- López-Cruz, I.L., Rojano-Aguilar, A., Ojeeda-Bustamante, W., Salazar-Moreno, R., 2007. ARX models for predicting greenhouse air temperature: A methodology. *Agrociencia* 41, 181-192.
- Majdoubi, H., Boulard, T., Fatnassi, H., Bouirden, L., 2009. Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: An experimental and CFD assisted study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1050-1062.
- Mavrogianopoulos, G. N., Choustoulakis, P., 1993. Kyritsis S Tomato production in heated and unheated greenhouses. *Agricoltura Mediterranea*, 123, 30-34.
- Meneses, J. F., Monteiro, A. A., 1990. Ducted air heating systems in greenhouses: experimental results. *International Symposium on Simple Ventilation and Heating Methods for Greenhouses in Mild Winter Climates. Acta Horticulturae*, 263, 285-292.

- Mistriotis, A., Arcidiacono, C., Picuno, P., Bot, G.P.A., Scarascia-Mugnozza, G., 1997b. Computational analysis of ventilation in greenhouses at zero- and low-wind speeds. *Agric. For. Meteorol.* 88, 121–135.
- Mistriotis, A., Bot, G.P.A., Picuno, P., Scarascia-Mugnozza, G., 1997a. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Agric. For. Meteorol.* 85, 217–228.
- Modeling of greenhouse climate using evolutionary algorithms. *Acta Horticulturae*, 801, 401-408.
- Molina-Aiz, F.D., Valera, D.L., Alvarez, A.J., 2004. Measurement and simulation of climate inside Almeria-type greenhouses using computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology* 125, 33–51.
- Monteith J. L., 1973. Principles of environmental Physics. *Contemporary Biology*, Edward Arnold, London, UK, 241.
- Montero, J.I., Anton, A., Kamaruddin, R., Bailey, B.J., 2001. Analysis of thermally driven ventilation in tunnel greenhouse using small scale models. *J. Agric. Eng. Res.* 79, 213– 222.
- Morris, L.G., Neal, F.E., 1954. The infrared carbon dioxide gas analyzer and its use in glasshouse research. NIA Rep. Wrest Park, Silsoe, England.
- Munro, D. S., 1989. Stomatal conductances and surface conductance modelling in mixed wet-land forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 48: 235-249.
- Oca, J., Montero, J.I., Anton, A., Crespo, D., 1999. A method for studying natural ventilation by thermal effects in a tunnel greenhouse using laboratory-scale models. *J. Agric. Eng. Res.* 72, 93–104.
- Ohara, G., 1988. Improvement of the heating system control in protected cultivation. *Acta Horticulturae*, 230, 527-532.
- Okada, M., Takakura, T., 1973. Guide and data for greenhouse air conditioning: heat loss due to air infiltration of heated greenhouses. *J. Agric. Meteorol.* 28, 223–230.
- Okuya, A., Okuya, T., 1988. The transpiration of greenhouse tomato plants in rockwool culture and its relationship to climatic factors. *Acta Horticulturae*, 230, 307-311.
- Ould-Khaoua, S.A., Bournet, P.E. and Chasseriaux, G. 2006. Mathematical modelling of the inside a glasshouse during daytime including radioactive and convective heat transfers. *Acta Horticulturae*, 718, 255-262.

- Papadakis, G., Frangoudakis, A. and Kyritsis, S., 1994. Experimental investigation and modelling of heat and mass transfer between a tomato crop and the greenhouse environment. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 57(4), 217-227.
- Papadakis, G., Mermier, M., Meneses, J. F., Boulard, T., 1996. Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 63, 219–228.
- Pedregal, D. J., Taylor, C. J., Young, P. C., 2007. System Identification, Time Series Analysis and Forecasting. The Captain Toolbox. Handbook v02, Centre for Research on Environmental Systems and Statistics (CRES), Lancaster University, Lancaster, LA1 4YQ, United Kingdom.
- Pita, G.P.A., Pontes, M., Vargues, A., Marcelis, L.F.M., 1998. Mediterranean greenhouse energy balance. *Acta Horticulturae*, 456, 375-382.
- Popovski, K., 1986. Location of heating installations in greenhouses for low temperature heating fluids. In: *Industrial Thermal Effluents for Greenhouse Heating*. European Cooperative Networks on Rural Energy. CNRE Bulletin No. 15, 51-55. Proceedings of CNRE Workshop, Dublin, Ireland.
- Popovski, K., 1993. Heating greenhouses with geothermal energy. *Engineering Handbook*. International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy. Skopje, Macedonia. Published by the author.
- Reichrath, S., Davies, T.W., 2001. CFD modeling of the internal environment of commercial multi-span venlo-type glasshouses. In: *Proceedings of the ASAE Annual International Meeting*, July 30–August 1, Sacramento, CA. ASAE Paper 01-4054.
- Schulze, E. D., 1986. Carbon dioxide and water vapour exchange in response to drought in the atmosphere and in the soil. *Annual Review of Plant Physiology*, 37, 247-274.
- Seginer, I., 1993. Crop models in greenhouse climate control. *Acta Horticulturae* 328, 79–98.
- Seginer, I., Boulard, T. and Bailey, B., 1994. Neural network models of the greenhouse climate. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 59(3), 203-216.

- Sharma, P., Tiwari, G. and Sorayan, V., 1999. Temperature distribution in different zones of the micro-climate of a greenhouse: a dynamic model. *Energy Conversion and Management*, 40(3), 335.
- Stanghellini, C., 1983. Calculation of the amount of energy released by heating pipes in a greenhouse and its allocation between convection and radiation. IMAG, Wageningen.
- Tadj, N., Bartzanas, T., Fidaros, D., Draoui, B., Kittas, C., 2010. Influence of heating system on greenhouse microclimate distribution., *Research Report*, 83 (3), 20.
- Takakura, T., Jordan, K.A., Bailey, B.J., 1971. Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse. *Trans. ASAE*, 14(5), 964-971.
- Tantau, H.J., 1985. Analysis and synthesis of climate control algorithms. *Acta Hort.* 174, 375-380.
- Taylor, C.J., Pedregal, D.J., Young, P.C. and Tych, W. 2007. Environmental time series analysis and forecasting with the Captain toolbox. *Environmental Modelling & Software*, 22(6), 797-814.
- Teitel, M. and Tanny, J., 1999. Natural ventilation of greenhouses: experiments and model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 96, 59-70.
- Teitel, M., Segal, I., Shklyar, A., Barak, M., 1999. A comparison between pipe and air heating methods for greenhouses. *J. Agric. Engng Res.*, 72, 259-273.
- Uchida F. H. and Pieters, J.G.. 2004. Modelling of greenhouse temperature using system identification by means of neural networks. *Neurocomputing*, 56, 423-428.
- Uchida, F.H., Pieters, J.G. and Deltour, J.M. 2003. Modelling greenhouse temperature by means of auto regressive models. *Biosystems Eng.* 84(4), 147-157.
- Udink ten Cate, A.J., 1987. Analysis and synthesis of greenhouse climate controllers. In: *Computer Applications in Agricultural Environments* (Clark J.A.; Gregson K; Staffell R.A., eds), 1-19. Butterworths, London.
- Van de Braak, N. J., 1988. New methods of greenhouse heating. *Engineering and Economic Aspects of Energy Saving in Protected Cultivation. Acta Horticulturae*, 245, 149-157.
- Van de Braak, N. J., 1995. Heating equipment. In: *Greenhouse Climate Control an integrated approach.* (Bakker, J C; Bot, GPA; Challa, H; and van de Braak, NJ eds). Wageningen Press.

- Van Pee, M. and Berckmans, D., 1995. Speaking plant approach based on mathematical identification for environment control purposes. In: II International Symposium on Sensors in Horticulture 421, 129-136, ISHS.
- van Straten, G., Challa, H., Buwalda, F., 2000. Towards user accepted optimal control of greenhouse climate. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26 (3), 221–238.
- von Zabeltitz, C., 1999. Greenhouse structures. In: Zvi Enoch, H. (Ed.), *Greenhouse Ecosystems 20. Ecosystems of the World*. Elsevier, 17–69.
- Wang, S., Boulard, T., Haxaire, R., 1999. Air speed profiles in a naturally ventilated greenhouse with a tomato crop. *Agric. For. Meteorol.* 96, 181–188.
- Wang, S., Deltour, J., 1999a. Lee-side ventilation-induced air movement in large-scale multi-span greenhouse. *J. Agric. Eng. Res.* 74, 103–110.
- Wang, S., Deltour, J., 1999b. Airflow patterns and associated ventilation function in large-scale multi-span greenhouses. *Trans. ASAE* 2 (5), 1409–1414.
- Wells, C. M., Amos, N. D., 1994. Design of air distribution systems for closed greenhouses. *Acta Horticulturae*, 361, 93-104.
- Whittle, R.M., Lawrence, W.J.C., 1960. The climatology of glasshouses. II. Ventilation. *J. Agric. Eng. Res.* 5, 36–41.
- Yang X., Short T.H., Robert D.F. Bauerle W.L., 1990. Transpiration, leaf temperature and stomatal resistance of a cucumber crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 51, 197-209.
- Young P.C. and Lees, M.J., 1993. The Active Mixing Volume (AMV): A new concept in modelling environment systems. In: *Statistics for environment*. (Barnett, V. and Turkman, K.F., eds.), pp. 3-44 John Wiley and Sons Ltd., Chichester.
- Young, P.C., 1984. *Recursive estimation and time series analysis*. Springer-Verlag, Berlin.
- Youssef, A., Dekock, J., Ozcan, S.E., Berckmans, D., Katsoulas, N. and Kittas, C. 2011. Data-based approach to model the dynamic behaviour of greenhouse temperature. *Acta Horticulturae*, 893, 931-938.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γραφιαδέλλης Μ., 1987. Σύνχρονα Θερμοκήπια, Β' Έκδοση. Εκδόσεις Γαρτγάνη, Θεσσαλονίκη σελ. 328.
- Κατσούλας Ν., 2002. Επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος στη διαπνοή τριανταφυλλιάς υπό κάλυψη. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 220.
- Μανωλαράκη Χ., 2008. Αξιολόγηση της επίδρασης της χρήσης αντισταγονικών φύλλων κάλυψης θερμοκηπίων στο μικροκλίμα και την καλλιέργεια. Μεταπτυχιακή διατριβή.
- Μαυρογιαννόπουλος Γ.Ν., 2005. Θερμοκήπια. Περιβάλλον-Υλικά-Κατασκευή-Εξοπλισμός. Εκδόσεις Σταμούλη. Αθήνα.
- Μπαρτζάνας Θ., 2004. Διαχείριση της υψηλής υγραμετρίας σε ελληνικά θερμοκήπια. Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Ντόγρας Κ., 2001. Καλλιέργεια Λαχανικών στο θερμοκήπιο, Μέρος Α'. Τμήμα Εκδόσεων, Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο. Θεσσαλονίκη.
- Ολύμπιος, Χ.Μ., 2001. Η τεχνική της καλλιέργειας των κηπευτικών στα θερμοκήπια. Εκδόσεις Σταμούλη
- Παπαδήμας, Ο., 1995. Στατιστική. Μακεδονικές Εκδόσεις.

ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟ INTERNET

<http://www.google.gr/search>

http://www.moa.gov.cy/moa/agriculture.nsf/index_gr/index_gr?OpenDocument

(Υπουργείο Γεωργίας)

<http://www.ekk.aua.gr/seminar/seminar09.pdf>