

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού
Περιβάλλοντος



Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Μελέτη της Κατανομής του Μικροκλίματος σε Θερμοκήπιο με Υγρή
Παρειά και Ανεμιστήρες**

Φοιτητής: Βασιλειάδης Γρηγόριος

AEM: 01574

Επιβλέπων: Κατσούλας Νικόλαος

Αναπληρωτής καθηγητής

ΒΟΛΟΣ 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στήριξε όλα αυτά τα χρόνια.

Στη συνέχεια την τριμελή επιτροπή:

κ. Νικόλαο Κατσούλα (Αναπληρωτή καθηγητή), επιβλέποντα της πτυχιακής μου διατριβής, για τις χρήσιμες συμβουλές του.

κ. Χρήστο Λύκα (Επίκουρο καθηγητή)

κ. Σπύρο Πετρόπουλο (Επίκουρο καθηγητή)

και τέλος τον Αντώνη Τζούνη (υποψήφιο διδάκτορα) για τη συνολική του βοήθεια.

Περιεχόμενα

Εικόνες.....	1
Διαγράμματα.....	2
Πίνακες.....	3
Περίληψη.....	4
Abstract.....	5
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	
1.1 Γενικά.....	6
1.1.1 Ιστορική Αναδρομή.....	6
1.1.2 Τα Θερμοκήπια στην Ελλάδα.....	7
1.1.3 Δυνατότητες και Προοπτικές Εξάπλωσης των Θερμοκηπίων στην Ελλάδα.....	8
1.2 Το Μικροκλίμα.....	10
1.2.1 Ρύθμιση του Περιβάλλοντος των Θερμοκηπίων.....	10
1.2.2 Παράγοντες του Μικροκλίματος που Επηρεάζουν τα Φυτά.....	10
1.2.3 Η Θερμοκρασία του Θερμοκηπίου.....	11
1.2.4 Η Θέρμανση του Θερμοκηπίου.....	12
1.3 Κατανομή του Μικροκλίματος στο Θερμοκήπιο.....	13
1.3.1 Κατανομή με βάση τη Θερμοκρασία και την Σχετική Υγρασία.....	13
1.3.2 Κατανομή με βάση την Επίδραση της Ολικής Ακτινοβολίας στη Θερμοκρασία.....	15
1.4 Επίδραση των Συστημάτων Κλιματισμού και Θέρμανσης των Θερμοκηπίων στην Κατανομή του Μικροκλίματος.....	17
1.4.1 Επίδραση της Κάλυψης και Θέρμανσης στο Μικροκλίμα.....	17
1.5 Η Διαπνοή και Παράγοντες που την Επηρεάζουν.....	17
1.5.1 Διαπνοή και Μικροκλίμα.....	18
1.5.2 Οφέλη Επίγνωσης της Διαπνοής.....	18
1.6 Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων στη Γεωργία Ακριβείας.....	19
1.6.1 Εξυπνη Γεωργία – Γεωργία Ακριβείας.....	19
1.7 Στόχος της Εργασίας.....	20

Κεφάλαιο 2: Υλικά και Μέθοδοι	
2.1 Το Θερμοκήπιο.....	21
2.2 Η Καλλιέργεια.....	22
2.3 Το Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων.....	22
2.4 Το Πείραμα.....	27
2.5 Υπολογισμοί.....	29
Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα	
3.1 Κατανομή της Θερμοκρασίας.....	30
3.1.1 Ημέρα, Νύχτα, Χάραμα, Διαφορετικές Ώρες, Διαφορετικά Συστήματα Κλιματισμού σε Λειτουργία.....	30
3.2 Κατανομή Σχετικής Υγρασίας.....	32
3.2.1 Ημέρα, Νύχτα, Χάραμα, Διαφορετικές Ώρες, Διαφορετικά Συστήματα Κλιματισμού σε Λειτουργία.....	32
3.3 Κατανομή Θερμοκρασίας Φύλλων Καλλιέργειας.....	34
3.3.1 Ημέρα, Νύχτα, Χάραμα, Διαφορετικές Ώρες, Διαφορετικά Συστήματα Κλιματισμού σε Λειτουργία.....	34
3.4 Κατανομή Διαπνοής της Καλλιέργειας.....	36
3.4.1 Κατανομή με βάση την Ιδανική Διαπνοή.....	36
3.4.1.1 Ημέρα, Νύχτα, Χάραμα, Διαφορετικές Ώρες, Διαφορετικά Συστήματα Κλιματισμού σε Λειτουργία.....	36
3.4.2 Κατανομή με βάση την Πραγματική Διαπνοή.....	38
3.4.2.1 Ημέρα, Νύχτα, Χάραμα, Διαφορετικές Ώρες, Διαφορετικά Συστήματα Κλιματισμού σε Λειτουργίας.....	38
Κεφάλαιο 4: Συζήτηση & Συμπεράσματα.....	40
Βιβλιογραφία.....	42

Εικόνες

Εικόνα 1. Εξέλιξη της έκτασης των θερμοκηπίων στην Ελλάδα.....	9
Εικόνα 2. Έκταση των θερμοκηπίων στην Ελλάδα ανά περιφέρεια.....	9
Εικόνα 3. Χωρική αναπαράσταση της μέσης θερμοκρασίας σε θερμοκήπιο. (a) καλοκαίρι-ημέρα (b) καλοκαίρι-νύχτα (c) χειμώνας-ημέρα (d) χειμώνας-νύχτα.....	14
Εικόνα 4. Χωρική αναπαράσταση της μέσης σχετικής υγρασίας σε θερμοκήπιο. (a) καλοκαίρι-ημέρα (b) καλοκαίρι-νύχτα (c) χειμώνας-ημέρα (d) χειμώνας-νύχτα.....	14
Εικόνα 5. Χάρτες διανομής της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου σαν αποτέλεσμα των εξωτερικών επιπέδων της ολικής ακτινοβολίας. (a) $177,2 \text{ Wm}^{-2}$ (b) $177,2-380,9 \text{ Wm}^{-2}$ (c) $380,9-566,8 \text{ Wm}^{-2}$ (d) $566,8-752,8 \text{ Wm}^{-2}$ (e) $>752,8 \text{ Wm}^{-2}$. Οι χάρτες αντιπροσωπεύουν την οριζόντια διανομή σε απόσταση 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους.....	16
Εικόνα 6. Λήψη από δορυφόρο του πειραματικού θερμοκηπίου.(Google Earth)....	21
Εικόνα 7. Το ασύρματο υποσύστημα XBee 868LP.....	23
Εικόνα 8. Ο αισθητήρας Sensirion SHT75.....	24
Εικόνα 9. Ο αισθητήρας Zytemp TN9.....	26
Εικόνα 10. Προσομοίωση του θερμοκηπίου και της θέσης των αισθητήρων. Το βελάκι υποδεικνύει την είσοδο, ενώ στα δεξιά κατά την είσοδο είναι η υγρή παρειά και απέναντι οι ανεμιστήρες.....	27

Διαγράμματα

Διάγραμμα 1. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας (νύχτα).....	31
Διάγραμμα 2. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας (χάραμα).....	31
Διάγραμμα 3. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας (μέρα).....	31
Διάγραμμα 4. Χωρική διαμόρφωση μέσης σχετικής υγρασίας (νύχτα).....	33
Διάγραμμα 5. Χωρική διαμόρφωση μέσης σχετικής υγρασίας (χάραμα).....	33
Διάγραμμα 6. Χωρική διαμόρφωση μέσης σχετικής υγρασίας (μέρα).....	33
Διάγραμμα 7. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας φύλλου (νύχτα).....	35
Διάγραμμα 8. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας φύλλου (χάραμα).....	35
Διάγραμμα 9. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας φύλλου (μέρα).....	35
Διάγραμμα 10. Χωρική διαμόρφωση μέσης ιδανικής διαπνοής (νύχτα).....	37
Διάγραμμα 11. Χωρική διαμόρφωση μέσης ιδανικής διαπνοής (χάραμα).....	37
Διάγραμμα 12. Χωρική διαμόρφωση μέσης ιδανικής διαπνοής (μέρα).....	37
Διάγραμμα 13. Χωρική διαμόρφωση μέσης πραγματικής διαπνοής (νύχτα).....	39
Διάγραμμα 14. Χωρική διαμόρφωση μέσης πραγματικής διαπνοής (χάραμα).....	39
Διάγραμμα 15. Χωρική διαμόρφωση μέσης πραγματικής διαπνοής (μέρα).....	39

Πίνακες

Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά του ασύρματου κόμβου.....	22
Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά αισθητήρων SHT Sensirion.....	25
Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά υπέρυθρου θερμομέτρου Zytemp TN9.....	26
Πίνακας 4. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) θερμοκρασιών για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους νύχτας, μέρας και χαράματος. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσων όρων, οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων και η μέση σχετική απόκλιση (MRD) των μέσων όρων.....	30
Πίνακας 5. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) σχετικής υγρασίας για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους νύχτας, μέρας και χαράματος. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσων όρων, οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων και η μέση σχετική απόκλιση (MRD) των μέσων όρων.....	32
Πίνακας 6. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) θερμοκρασίας φύλλου για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους νύχτας, μέρας και χαράματος. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσων όρων, οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων και η μέση σχετική απόκλιση (MRD) των μέσων όρων.....	34
Πίνακας 7. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) ιδανικής διαπνοής για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους νύχτας, μέρας και χαράματος. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσων όρων, οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων και η μέση σχετική απόκλιση (MRD) των μέσων όρων.....	36
Πίνακας 8. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) θερμοκρασίας φύλλου για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους νύχτας, μέρας και χαράματος. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσων όρων, οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων και η μέση σχετική απόκλιση (MRD) των μέσων όρων.....	38

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των μικρολιματικών χαρακτηριστικών ενός εμπορικού θερμοκηπίου παραγωγής αγγουριού, με σκοπό την εξαγωγή μιας ακριβέστερης εικόνας για το περιβάλλον εντός του θερμοκηπίου και το κατά πόσο αυτό είναι ομοιόμορφο σε όλη την έκταση του. Για την πραγματοποίηση του πειράματος, χρησιμοποιήθηκαν 6 (έξι) ασύρματοι αισθητήρες οι οποίοι έπαιρναν μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας καθώς και θερμοκρασίας φύλλου. Η συχνότητα των μετρήσεων ήταν κάθε 15 λεπτά και το πείραμα εκτελέστηκε τους μήνες Οκτώβριο και Νοέμβριο. Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων, έγινε υπολογισμός της διαπνοής των φυτών, ώστε να βρεθούν οι υδατικές τους απώλειες και να αξιοποιηθούν για τη χορήγηση μιας ακριβέστερης δόσης άρδευσης. Στο πρώτο μέρος της εργασίας (εισαγωγή), παρουσιάζεται βιβλιογραφική ανασκόπηση και ανάλυση βασικών όρων που πραγματεύεται η συγκεκριμένη έρευνα. Στο δεύτερο μέρος (υλικά και μέθοδοι) γίνεται λεπτομερής ανάλυση του τρόπου, του χώρου και των μέσων που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή του πειράματος. Στο τρίτο μέρος (αποτελέσματα) γίνεται ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν κατά την επεξεργασία των μετρήσεων. Στο τέταρτο και τελευταίο μέρος (συζήτηση και συμπεράσματα) γίνεται μια ανασκόπηση του συνόλου του πειράματος και παρουσιάζονται χρήσιμα συμπεράσματα που εξήχθησαν από αυτό αλλά και πώς αυτά θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν πρακτικά προς όφελος του περιβάλλοντος και της γεωργίας.

Abstract

For the purpose of this study, measurements of the microclimatic characteristics of a commercial greenhouse which produces cucumbers were taken in order to provide a more precise description of the environment found in the greenhouse and the degree this environment is uniform across the whole greenhouse. To conduct this experiment, 6 wireless sensors were used. The sensors carried out air temperature measurements, relative humidity measurements as well as leaf temperature measurements. The frequency of measurements was every 15 minutes and the experiment was conducted in October and November. According to the results obtained from the sensors, plant transpiration was calculated in order to detect the water loss and make good use of it for the provision of a more exact irrigation dose.

The first chapter of this paper (introduction) provides a detailed literature review and analysis of important terms that are relevant to this research. In the second chapter (materials and methods) a detailed analysis of the procedure, location and materials used during the experiment is given. The third part (results) presents the data collected after processing the measurements taken. Finally, the last chapter (discussion) reviews the whole experiment and presents the conclusions that were drawn as a result of the analysis of the data. Also, this chapter mentions possible and plausible ways in which the results can be used in the interests of the environment and agriculture.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Ο ολοένα και αυξανόμενος πληθυσμός του πλανήτη ο οποίος σύμφωνα με υπολογισμούς θα ανέρχεται στα 9 δισεκατομμύρια περίπου το 2050 (έναντι των 7,35 δισεκατομμυρίων το 2017) καθιστά ευκόλως αντιληπτό, ότι η σημερινή παραγωγή τροφής θα πρέπει να αυξηθεί σημαντικά για να καλύψει τις ανάγκες όλων αυτών των ανθρώπων.

Ακόμη, οι κλιματικές αλλαγές, που επιφέρει το φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, που οδηγεί στο λιώσιμο των πάγων προκαλώντας έτσι άνοδο της στάθμης της θάλασσας, έχουν ως συνέπεια να μειώνονται συνεχώς οι καλλιεργήσιμες καθώς και κατοικήσιμες εκτάσεις. Ταυτόχρονα λόγω της εισχώρησης της θάλασσας σε ηπειρωτικές περιοχές αυξάνεται και η εκεί αλατότητα των εδαφών μετατρέποντας τα σε άγονη γη. Συνέπεια, επίσης, της αύξησης της θερμοκρασίας είναι η ερημοποίηση πολλών περιοχών οι οποίες προγενέστερα μπορούσαν να αξιοποιηθούν ως καλλιεργήσιμη γη.

Εξαιτίας όλων των παραπάνω έπρεπε να βρεθεί ένας τρόπος καλλιέργειας που θα μπορούσε να ανταπεξέλθει σε αυτά τα νέα δεδομένα. Μια λύση λοιπόν αποτελούν οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες. Πρόκειται για καλλιέργειες οι οποίες αναπτύσσονται υπό κάλυψη (γυαλί ή πολυεστέρα) και δίνουν τη δυνατότητα στον άνθρωπο να ελέγχει το μικροκλίμα (θερμοκρασία, υγρασία, φωτισμό, CO₂) μέσα σε αυτές και έτσι να παρέχει το ιδανικό για τα φυτά περιβάλλον για την ανάπτυξη τους.

Έτσι μπορούμε να παράγουμε πλέον σε πολύ μεγαλύτερο εύρος κλιματικών συνθηκών ανά τον πλανήτη αλλά και με μεγαλύτερες αποδόσεις για την κάλυψη των αναγκών του ολοένα και αυξανόμενου πληθυσμού στον κόσμο.

1.1.1 Ιστορική Αναδρομή

Αναφορές που παραπέμπουν στη χρήση των πρώτων θερμοκηπίων πρωτοεμφανίζονται στην αρχαία Ελλάδα ήδη από τον 5^ο αιώνα π.χ.. Αναφορές συναντάμε σε κείμενα του Πλάτωνα όπου τα χαρακτηρίζει ως “κήπους του Άδωνη” αλλά και σε γραπτά του Θεόφραστου.

Πέραν της Ελλάδας φαίνεται πως και άλλοι λαοί του αρχαίου κόσμου είχαν αναπτύξει κάποιες μορφές θερμοκηπίων. Στην Πομπηία κάλυπταν τις καλλιέργειες με κάποια μορφή προγενέστερου γυαλιού για διατήρηση της θερμοκρασίας. Στην Κίνα

συνήθιζαν να καλλιεργούν κοντά σε τοίχους που ήταν κατασκευασμένοι από πλίνθους οι οποίοι θερμαίνονταν κατά τη διάρκεια της ημέρας και μπορούσαν να εκπέμπουν θερμότητα κατά τη διάρκεια της νύχτας, ακόμη κάλυπταν με λαδόχαρτο την καλλιέργεια δημιουργώντας έτσι ένα μικροκλίμα στο χώρο των φυτών. Τέλος οι Ρωμαίοι καλλιεργούσαν μέσα σε πήλινα δοχεία καλυμμένα με διάφανες επιφάνειες του ορυκτού μίκα.

Η εξέλιξη των θερμοκηπίων παρέμεινε στάσιμη έως τον 17^ο αιώνα οπότε και η χρήση τους κρίθηκε αναγκαία για την διατήρηση τροπικών φυτών τα οποία είχαν μεταφερθεί στην Ευρώπη από την εξερεύνηση του “νέου κόσμου”. Τον 18^ο αιώνα εισήχθη στα θερμοκήπια θέρμανση με τη χρήση ατμού προσδίδοντας πολλά πλεονεκτήματα. Οι μεγαλύτερες μεταρρυθμίσεις και καινοτομίες πάνω στην κατασκευή του θερμοκηπίου έγιναν τους 19^ο-20^ο αιώνα. Τότε εξελίχθηκαν τα υλικά του σκελετού, με αντικατάσταση του ξύλου με γαλβανισμένο σίδηρο και αλουμίνιο. Ακόμη ξεκίνησε η χρήση ελαστικών και μη φύλλων πολυαιθυλενίου ως υλικό κάλυψης πέρα από το γυαλί, με συνέπεια τη μείωση του κόστους κατασκευής. Στις μέρες μας η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας προσφέρει τη δυνατότητα χρήσης αυτοματισμών αλλά και μεθόδων για την καλύτερη και ακριβέστερη παρακολούθηση του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου με αποτέλεσμα την πολύ μεγάλη αύξηση της παραγωγής με τη χρήση όσο το δυνατόν λιγότερων πόρων (Μαυρογιαννόπουλος 2005).

1.1.2 Τα Θερμοκήπια στην Ελλάδα

Η ουσιαστική ανάπτυξη και η ευρεία χρήση των θερμοκηπίων ξεκίνησε πιο εντατικά στον Ελλαδικό χώρο το 1961. Η αντικατάσταση του γυαλιού με τα πολύ οικονομικότερα φύλλα πολυαιθυλενίου έδωσε τη δυνατότητα σε περισσότερους καλλιεργητές να δημιουργήσουν το δικό τους θερμοκήπιο για την παραγωγή κηπευτικών υπό κάλυψη πλέον. Έως το 2003 η θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις καταλάμβαναν έκταση 46.441 στρεμμάτων.

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η Ελλάδα, τα οποία οδήγησαν στην αύξηση των καλλιεργειών υπό κάλυψη είναι:

- Η γεωγραφική τοποθεσία της χώρας (μεσογειακό κλίμα)
- Περιοχές όπως η Κρήτη προσφέρουν το πλεονέκτημα χρήσης απλών θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων χωρίς προσθήκη θέρμανσης για το χειμώνα.

- Οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες αποδίδουν πολλαπλάσια παραγωγή ανά στρέμμα, με την προσθήκη πολύ λιγότερων εισροών, όπως νερού και φυτοφαρμάκων σε σχέση με τις υπαίθριες καλλιέργειες.
- Οι αυξανόμενες ανάγκες της εγχώριας αγοράς για προϊόντα θερμοκηπίου όλο το χρόνο.

(Μαυρογιαννόπουλος 2005).

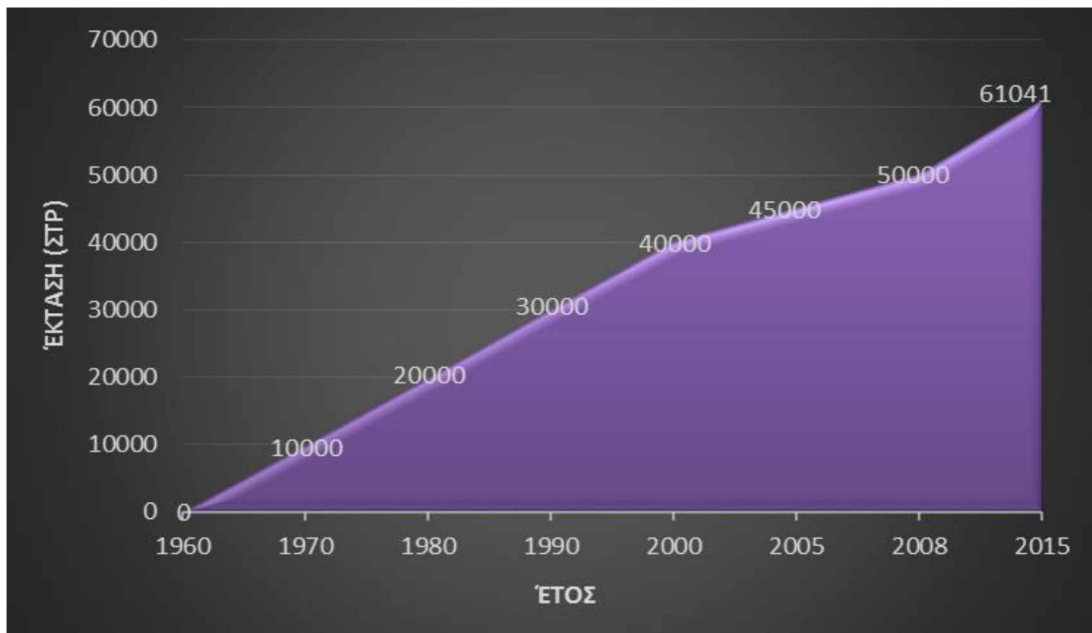
1.1.3 Δυνατότητες και Προοπτικές Εξάπλωσης Θερμοκηπίων στην Ελλάδα

Η παραγωγή προϊόντων υπό κάλυψη στην Ελλάδα δεν επιτυγχάνει την ανάπτυξη που θα μπορούσε να έχει, καθώς υπολείπεται σημαντικά (ενεργοβόρος, υπερβολική χρήση χημικών για λίπανση και φυτοπροστασία) σε σχέση με τις χώρες-ανταγωνιστές της (χώρες της μεσογειακής λεκάνης κυρίως).

Στην Ελλάδα το 1995 υπήρχαν 35,000 στρέμματα θερμοκηπιακών καλλιεργειών ενώ το παράδοξο είναι πως 20 χρόνια μετά αυξήθηκαν μονάχα σε 61,041 σε αντίθεση με άλλα μεσογειακά κράτη (Τουρκία-Ισπανία) που αριθμούν περίπου 400,000 και 600,000στρ. θερμοκηπιακών καλλιεργειών αντίστοιχα.

Από τα 61,041 στρ. καλλιεργήσιμων θερμοκηπίων τα 59,736 χρησιμοποιούνται για την παραγωγή λαχανοκομικών προϊόντων ενώ τα υπόλοιπα για παραγωγή ανθοκομικών. Στη λαχανοκομία τις μεγαλύτερες εκτάσεις καταλαμβάνουν η τομάτα και το αγγούρι με ποσοστό 80%, ενώ στα ανθοκομικά τα δρεπτά άνθη (τριαντάφυλλο, γαρύφαλλο, χρυσάνθεμο) με ποσοστό 65,5% του αντίστοιχου συνόλου.

(Katsoulas and Kittas 2011, Ελληνική Στατιστική Αρχή)



Εικόνα 1. Εξέλιξη της έκτασης των θερμοκηπίων στην Ελλάδα (Ελληνική Στατιστική Αρχή)



Εικόνα 2. Έκταση των θερμοκηπίων στην Ελλάδα ανά περιφέρεια (Ελληνική Στατιστική Αρχή)

1.2 Το Μικροκλίμα

Το μικροκλίμα είναι ένα τοπικό σύνολο ατμοσφαιρικών συνθηκών οι οποίες διαφέρουν από εκείνες των γύρω περιοχών, συχνά με μικρή διαφορά, αλλά ορισμένες φορές με ουσιαστική. Ο όρος μπορεί να αναφέρεται σε περιοχές τόσο μικρές όσο λίγα τετραγωνικά μέτρα (για παράδειγμα, ένα παρτέρι στον κήπο) ή τόσο μεγάλες όσο τετραγωνικά χιλιόμετρα ή τετραγωνικά μίλια. (Franklin 2013)

1.2.1 Ρύθμιση του Περιβάλλοντος των Θερμοκηπίων

Στην πλειοψηφία των μεσογειακών θερμοκηπίων, η διαχείριση του κλίματος έγκειται στη διατήρηση των επιθυμητών συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας για την ανάπτυξη των καλλιεργειών μέσω των συστημάτων θέρμανσης και αερισμού με τη χρήση θερμοστατών χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν ο αντίκτυπος της χρήσης αυτής της ενέργειας στο τελικό οικονομικό αποτέλεσμα (αύξηση παραγωγής, ανάπτυξη ασθενειών, κατανάλωση ενέργειας). Πολλές εργασίες έδειξαν πως η αύξηση και η ανάπτυξη πολλών λαχανοκομικών και ανθοκομικών ειδών, φαίνεται να επηρεάζεται περισσότερο από τη μέση ημερήσια θερμοκρασία παρά από την ακριβή πορεία εξέλιξης της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Η θέρμανση των θερμοκηπίων με βάση το άθροισμα των θερμοκρασιών (Integrated Temperature Control) κατά τη διάρκεια του εικοσιτετράωρου έχει ήδη εφαρμοστεί σε διάφορες καλλιέργειες επιτρέποντας εξοικονόμηση ενέργειας της τάξεως του 10–20 %. Τα πιο σύγχρονα θερμοκήπια χρησιμοποιούν σύνθετα συστήματα με τα οποία υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης διαφορικού σημείου ρύθμισης (set-point) ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας αλλά και αυτά δρουν μηχανικά. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας αναπτύσσονται πολυσύνθετα κέντρα ελέγχου στα οποία ο έλεγχος του κλίματος γίνεται με τη χρήση δυναμικών προσομοιωτών ανάπτυξης της καλλιέργειας και μεταβολής του μικροκλίματος. (Katsoulas and Kittas 2011)

1.2.2 Παράγοντες του Μικροκλίματος που Επηρεάζουν τα Φυτά

Στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες υπάρχουν πολλοί παράγοντες που συντελούν στην ανάπτυξη των φυτών, όπως θερμοκρασία, σχετική υγρασία, φως και ηλιακή ακτινοβολία. Από όλους τους κλιματικούς παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή λαχανικών η θερμοκρασία θεωρείται ο σημαντικότερος. Η θερμοκρασία επηρεάζει την αύξηση και ανάπτυξη των φυτών από άποψη βλαστικής ικανότητας σπόρου, ανάπτυξη

των οικονομικού ενδιαφέροντος μερών των φυτών, άνθησης, γονιμοποίησης, καρπόδεσης, ποιότητας παραγωγής και εμφάνισης ασθενειών και παρασίτων. Η αύξηση και ανάπτυξη των φυτών επηρεάζεται αντίστροφα σε θερμοκρασίες κάτω των 5 °C και άνω των 40 °C. (Jones and Briffa, 1992)

Επιπλέον το φως είναι από τους σημαντικότερους περιβαλλοντικούς παράγοντες που παρουσιάζει το θερμοκήπιο. Η ζωή των φυτών εξαρτάται απόλυτα από την ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο και η φωτοσύνθεση είναι η μόνη σημαντική βιολογική διαδικασία που μπορεί να συλλέξει αυτή την ενέργεια υπό τη μορφή υδρογονανθράκων. Πέρα από τη φωτοσύνθεση υπάρχουν κι άλλες πτυχές της ανάπτυξης του φυτού που επηρεάζονται από το φως όπως η σύνθεση χλωροφύλλης, η φωτοπερίοδος και η φωτομορφογένεια. (Semida, Ammar and Sawah 2017)

1.2.3 Η θερμοκρασία στο Θερμοκήπιο

Μέση ημερήσια θερμοκρασία: Η μέση ημερήσια θερμοκρασία (24h) ελέγχει τον ρυθμό ανάπτυξης των φυτών αλλά επίσης τροποποιεί και των ρυθμό αύξησης. Έχει αποδειχθεί ότι ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης, μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους συνδυασμούς θερμοκρασιών ημέρας και νύχτας, αρκεί να διατηρείται ένας σταθερός ημερήσιος μέσος όρος.

Θερμοκρασίες ημέρας και νύχτας: Η διαφορά ανάμεσα στη μέση ημερήσια και τη μέση βραδινή θερμοκρασία παίζει σημαντικό ρόλο στον έλεγχο της συμπεριφοράς του φυτού. Ακόμη επιτρέπει την εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς το να ληφθεί υψηλή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι φθηνότερο από ότι τη νύχτα εξαιτίας της φυσικής θέρμανσης από τον ήλιο και την υψηλότερη εξωτερική θερμοκρασία. Επιπλέον η μέγιστη διαφορά ανάμεσα στη μέση θερμοκρασία ημέρας και νύχτας αυξάνεται με την προβλεπόμενη ηλιακή ακτινοβολία επειδή επιτρέπει υψηλότερη φυσική θερμοκρασία ημέρας.

Προφανώς, η μέση ημερήσια θερμοκρασία (24h), η μέση ηλιοφάνεια και η μέση νυχτερινή θερμοκρασία συνδέονται αφού η μέση ημερήσια θερμοκρασία είναι το μέσο των θερμοκρασιών ημέρας και νύχτας.

Θερμοκρασίες νύχτας και πριν το χάραμα: Η μέση θερμοκρασία νύχτας είναι το αποτέλεσμα των θερμοκρασιών κατά τις βραδινές ώρες και το χρονικό διάστημα πριν το χάραμα. Υποδεικνύεται ακόμη πως η μέση βραδινή θερμοκρασία θα πρέπει να είναι χαμηλότερη από αυτήν του χαράματος η οποία με την σειρά της θα πρέπει να είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη της ημέρας. (Tchamitchian et al. 2006)

1.2.4 Η Θέρμανση του Θερμοκηπίου

Στα θερμαινόμενα θερμοκήπια των μεσογειακών χωρών, η θέρμανση γίνεται συνήθως με καυστήρες ορυκτών καυσίμων (πετρελαίου ή μαζούτ) και με συστήματα διανομής με επιδαπέδιους πλαστικούς σωλήνες, μέσα στους οποίους κυκλοφορεί νερό σε υψηλή θερμοκρασία ή και με αερόθερμα. Η χρησιμοποίηση εναλλακτικών καυσίμων (βιομάζα) έχει αρχίσει να υιοθετείται τελευταία, με προβλήματα όμως στην εξασφάλιση της πρώτης ύλης και στη λειτουργία των καυστήρων. Μερικά απλά παθητικά ηλιακά συστήματα με σωλήνες νερού για αποθήκευση της θερμότητας, μπορούν να εφαρμοστούν με μειωμένη όμως αποτελεσματικότητα όταν αυξάνεται η φυλλική επιφάνεια των καλλιεργειών. Τα τελευταία χρόνια ευρεία εφαρμογή στο χώρο των θερμοκηπίων βρήκε η χρήση της θερμοκουρτίνας η οποία βελτιώνοντας την ενεργειακή συμπεριφορά του θερμοκηπίου οδηγεί σε μείωση του κόστους θέρμανσης και σε επιμήκυνση της καλλιεργητικής περιόδου.

Σήμερα η διαχείριση της θέρμανσης των περισσότερων θερμοκηπίων γίνεται μέσω του προσδιορισμού δύο επιθυμητών θερμοκρασιών ρύθμισης του θερμοστάτη (ημέρας και νύχτας), με βάση κυρίως την εμπειρία του παραγωγού. Η διαχείριση της θέρμανσης με προηγμένα συστήματα ελέγχου του μικροκλίματος τα οποία λαμβάνουν υπόψη και την απόκριση της καλλιέργειας και τα οποία είναι σε θέση να τροποποιούν τις απαιτήσεις σε θέρμανση ανάλογα με τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες και το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας, μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της αποτελεσματικότητας των συστημάτων θέρμανσης, σε μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων και σε περαιτέρω μείωση του κόστους θέρμανσης. (Katsoulas and Kittas 2011)

1.3 Κατανομή του Μικροκλίματος στο Θερμοκήπιο

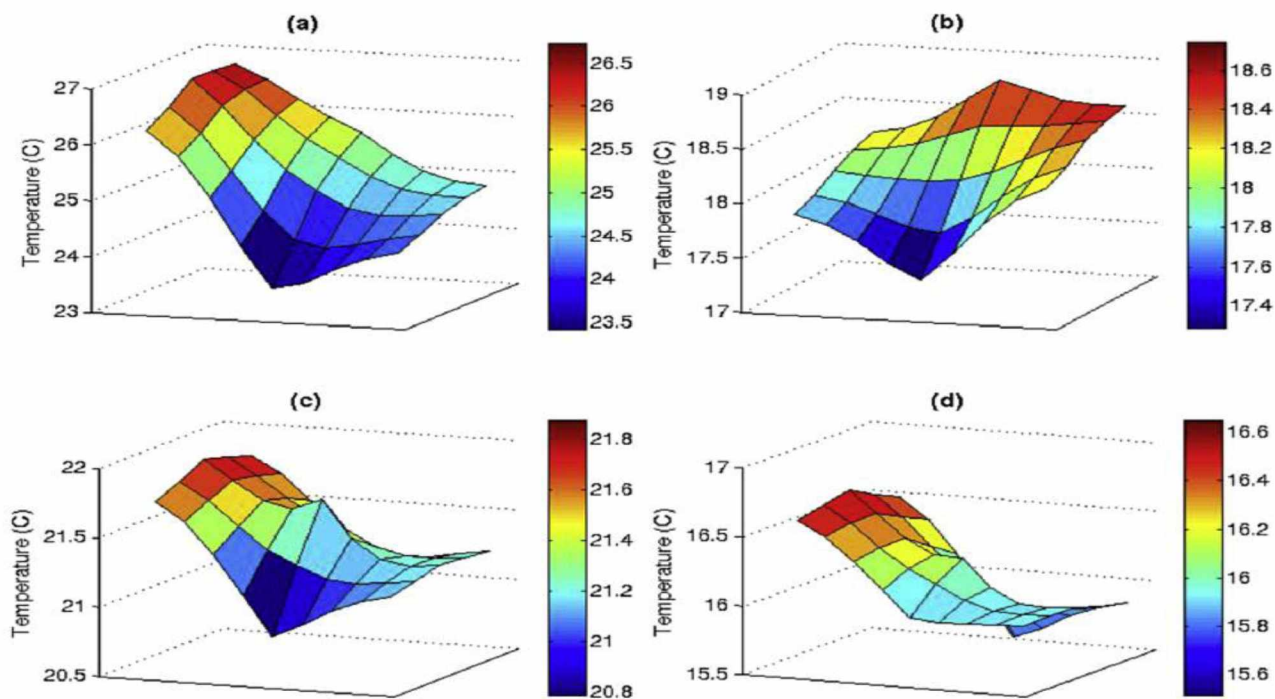
1.3.1 Κατανομή με βάση την Θερμοκρασία και την Σχετική Υγρασία

Οι περισσότεροι ερευνητές σε θερμοκήπια, θεωρούν το κλίμα μέσα στο θερμοκήπιο ως ομοιόμορφο χωρίς διαφοροποίηση του όγκου των φυτών και του όγκου πάνω από αυτά. (Kittas and Bartzanas 2007)

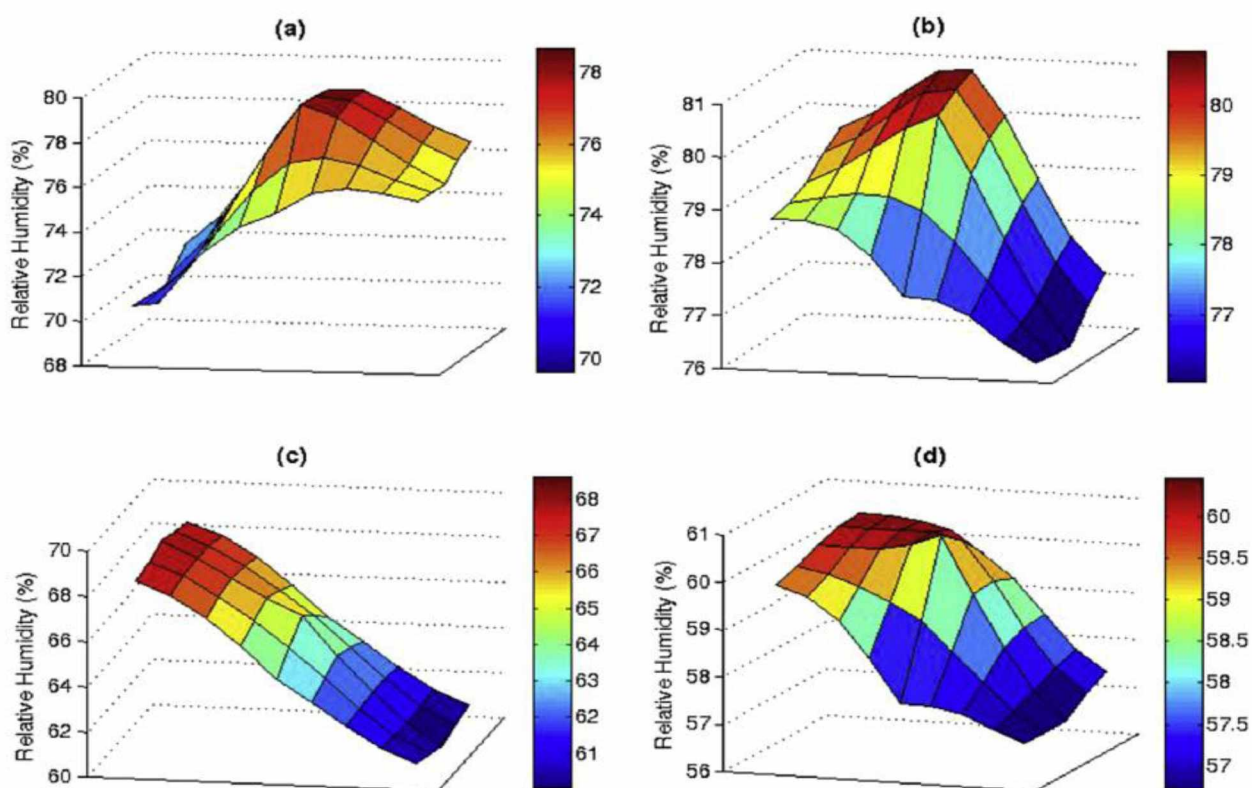
Σύμφωνα με μετρήσεις χωρικής μεταβλητότητας θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας σε θερμοκήπιο, βρέθηκε ότι η μεγαλύτερη ομοιομορφία εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας την καλοκαιρινή περίοδο, πράγμα που οφείλεται κυρίως στα συστήματα δροσισμού. Οι αντίστοιχες τιμές κατά τη διάρκεια της νύχτας την καλοκαιρινή περίοδο και κατά τη διάρκεια της ημέρας και νύχτας το χειμώνα ήταν πολύ χαμηλότερες. Ως εκ τούτου, τόσο η μεταβλητότητα της θερμοκρασίας όσο και της σχετικής υγρασίας σε αυτές τις περιόδους είναι πολύ μικρότερη.

Στην περίπτωση της σχετικής υγρασίας η υψηλότερη χωρική μεταβλητότητα εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και για τις δύο περιόδους. Παρόλο που η θερμοκρασία φαίνεται να επηρεάζεται από την παρειά προς τους ανεμιστήρες η σχετική υγρασία διαφοροποιείται κατά μήκος της κατεύθυνσης του θερμοκηπίου από τον βορρά προς τον νότο. Κατά τη διάρκεια της νύχτας η σχετική υγρασία παρουσιάζει αρκετή ομοιομορφία με τη λειτουργία των ανεμιστήρων για ανακύκλωση του αέρα.

Είναι εμφανές πως υπάρχουν διαφορές ανάμεσα στη θερμοκρασία και την υγρασία μεταξύ των εποχών και των περιόδων μέρας και νύχτας. Ωστόσο υπάρχει μια γενική ομοιομορφία ανάμεσα στις τιμές της ημέρας και της νύχτας για κάθε εποχή και για τη θερμοκρασία και για τη σχετική υγρασία. Γενικώς, υπάρχει η παραδοχή πως μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις εμφανίζονται μεταξύ ημέρας και νύχτας παρά μεταξύ καλοκαιριού και χειμώνα σε ότι αφορά και τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία. (Ferentinos et al. 2016)



Εικόνα 3. Χωρική αναπαράσταση της μέσης θερμοκρασίας σε θερμοκήπιο.
 (a) καλοκαίρι-ημέρα (b) καλοκαίρι-νύχτα (c) χειμώνας-ημέρα (d) χειμώνας-νύχτα.
 (Ferentinos et al. 2016)

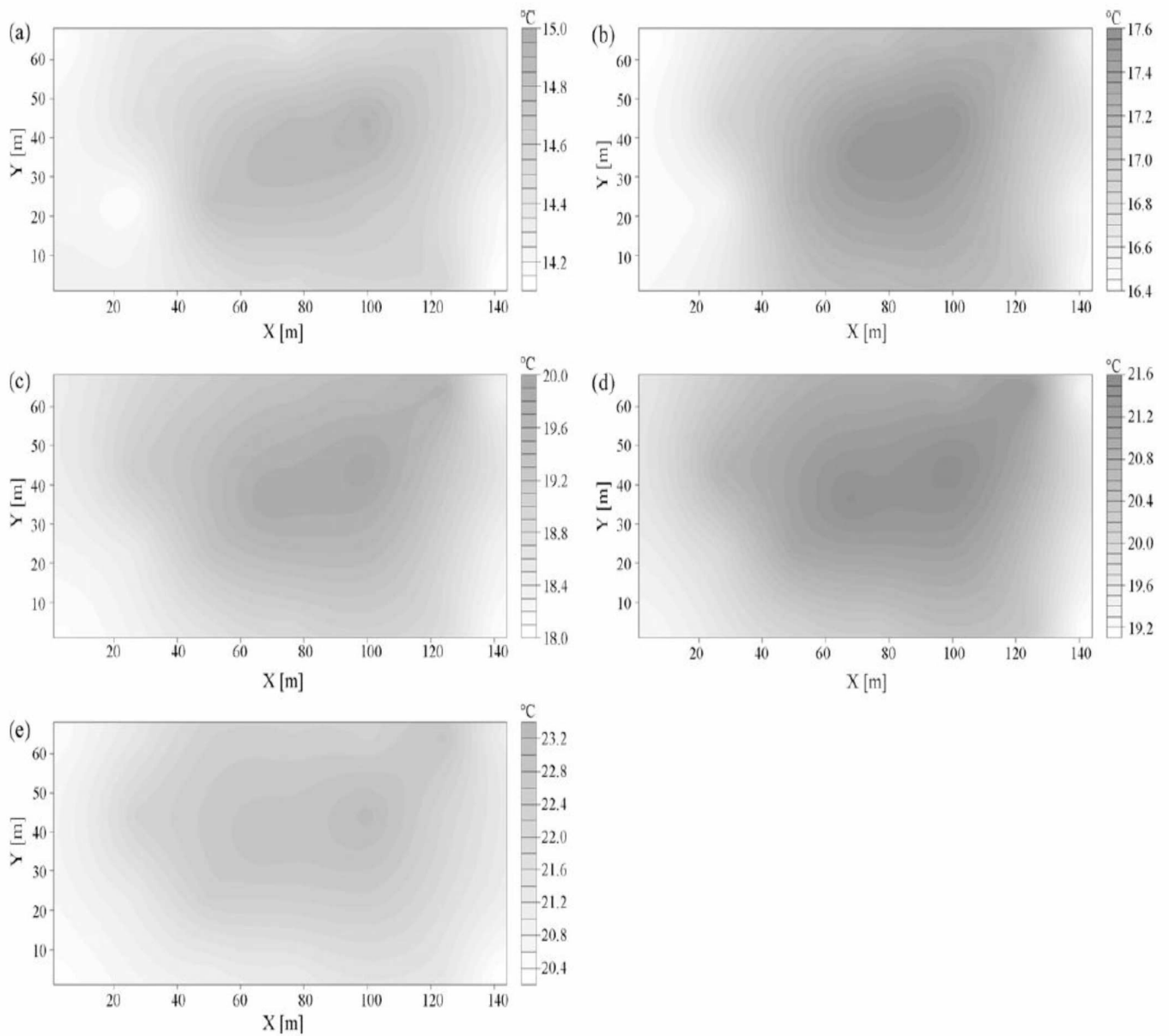


Εικόνα 4. Χωρική αναπαράσταση της μέσης σχετικής υγρασίας σε θερμοκήπιο.
 (a) καλοκαίρι-ημέρα (b) καλοκαίρι-νύχτα (c) χειμώνας-ημέρα (d) χειμώνας-νύχτα.
 (Ferentinos et al. 2016)

1.3.2 Κατανομή με βάση την Επίδραση της Ολικής Ακτινοβολίας στη Θερμοκρασία

Από έρευνα που διεξήχθη παρατηρήθηκαν το αυξανόμενο όριο (sill) και εύρος (range) μαζί με τις προσαυξήσεις στην ένταση της ολικής ακτινοβολίας. Οι υψηλότερες τιμές ορίου (sill) αντιπροσωπεύουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα χωρικής θερμοκρασίας. Τα χαμηλά επίπεδα ολικής ακτινοβολίας σχετίζονται με μία πιο ομοιογενή συνθήκη θερμοκρασίας αέρα μέσα στο θερμοκήπιο. Παρά τις προσαυξήσεις του εύρους ως λειτουργία της ακτινοβολίας, οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα στις απόλυτες τιμές σε διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας ήταν αναλογικά χαμηλότερα από αυτά που παρατηρήθηκαν για το όριο (sill). Σε χαμηλότερα επίπεδα ακτινοβολίας, η απόσταση στην οποία η θερμοκρασία σε οποιοδήποτε σημείο σχετίζεται με άλλο ήταν μικρότερη από εκείνες που υπολογίσθηκαν σε υψηλότερα επίπεδα ακτινοβολίας.

Με βάση τα αποτελέσματα του πειράματος παρατηρήθηκαν εκτιμώμενες διαφορές μέσης θερμοκρασίας που δεν ξεπερνούσαν τον $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ σε εντάσεις ακτινοβολίας χαμηλότερες των 170 Wm^{-2} , αλλά όταν η ολική ακτινοβολία έφτασε επίπεδα υψηλότερα των 752.8 Wm^{-2} , οι διακυμάνσεις της μέσης θερμοκρασίας έφτασαν τους $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ένα σταθερό μοτίβο κατανομής της θερμοκρασίας μπορεί να παρατηρηθεί για όλους τους χάρτες πρόβλεψης. Υψηλότερες θερμοκρασίες αναμένονταν περίπου στο κέντρο αλλά με μικρή μετατόπιση στην πάνω αριστερή ζώνη του θερμοκηπίου. Ψυχρότερες ζώνες φαίνεται να εδραιώνονται κοντά στους τοίχους του θερμοκηπίου. Η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στις ακραίες τοποθεσίες, αν και ήταν μόνο κατά $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ υψηλότερη κατά τη διάρκεια της μέρας, μπορεί να καθορίσει διαφοροποιημένες συμπεριφορές στην ανάπτυξη και την εξέλιξη των φυτών. Η χωρική εξάρτηση (εύρος) αυξήθηκε με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Συνεπώς, η εκτιμώμενη θερμοκρασία σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία επηρεάζεται από ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων στο χώρο. (Ricardo, Gil, and Cooman 2008)



Εικόνα 5. Χάρτες κατανομής της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου σαν αποτέλεσμα των εξωτερικών επιπέδων της ολικής ακτινοβολίας. (a) $177,2 \text{ Wm}^{-2}$ (b) $177,2\text{-}380,9 \text{ Wm}^{-2}$ (c) $380,9\text{-}566,8 \text{ Wm}^{-2}$ (d) $566,8\text{-}752,8 \text{ Wm}^{-2}$ (e) $>752,8 \text{ Wm}^{-2}$. Οι χάρτες αντιπροσωπεύουν την οριζόντια διανομή σε απόσταση 1,5 m από την επιφάνεια του εδάφους. (Ricardo, Gil, and Cooman 2008)

1.4 Επίδραση των Συστημάτων Κλιματισμού και Θέρμανσης των Θερμοκηπίων στην Κατανομή του Μικροκλίματος

1.4.1 Επίδραση της Κάλυψης και Θέρμανσης στο Μικροκλίμα

Η παρουσία ενός καλύμματος αποτελεί χαρακτηριστικό των θερμοκηπίων και προκαλεί αλλαγή στις εσωτερικές κλιματικές συνθήκες σε σχέση με τις εξωτερικές. Η ακτινοβολία και η ταχύτητα του αέρα μειώνονται, η θερμοκρασία και η πίεση των ατμών του αέρα αυξάνει και οι μεταβολές στη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα είναι πολύ μεγαλύτερες. Καθεμία από τις παραπάνω μεταβολές έχει αντίκτυπο στην αύξηση, παραγωγή και ποιότητα των καρπών του θερμοκηπίου.

(Bakker 1995)

Ο τελικός σκοπός του ελέγχου του περιβάλλοντος είναι να μεγιστοποιήσουμε την παραγωγή. Οι περισσότερες ενέργειες ελέγχου στα θερμοκήπια βασίζονται στον έλεγχο της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας που λαμβάνονται από ένα αντιπροσωπευτικό ύψος. (Gieling & Schurer, 1995)

Η παρουσία μεμονωμένων ελεγχόμενων συστημάτων θέρμανσης επιτρέπει την τοπική θέρμανση για κάθε φυτό και επηρεάζει την ανάπτυξη των καρπών. Επιπλέον, ο βαθμός ανάπτυξης σε πολλά φυτά ανταποκρίνεται σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών γραμμικά με τη θερμοκρασία. (Marcelis & De Koning, 1995)

Κατά συνέπεια, η τοπική θέρμανση της καλλιέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το διαχωρισμό της βιομάζας ή για τη βελτίωση της ανάπτυξης.

(Kempkes, Braak, and Bakker 2000)

1.5 Η Διαπνοή και Παράγοντες που την Επηρεάζουν

Διαπνοή, είναι η εξάτμιση νερού με τη μορφή υδρατμών από την επιφάνεια των φύλλων μέσω των στομάτων. Αποτελεί την αναπόφευκτη συνέπεια της ανάγκης για αφομοίωση του CO₂ της ατμόσφαιρας. (Καραμπουρνιώτης et al. 2014)

Η διαπνοή εξαρτάται από τη διαφορά στη συγκέντρωση υδρατμών μεταξύ μεσοκυττάρων χώρων του φύλλου και του εξωτερικού αέρα και από την αντίσταση σε αυτή την οδό, η οποία συνίσταται από τη στοματική αντίσταση και την αντίσταση του οριακού στρώματος υδρατμών. (Lincoln and Eduardo 2015)

1.5.1 Διαπνοή και Μικροκλίμα

Στη μεσογειακή λεκάνη, ο ανεπαρκής αερισμός κατά την περίοδο του καλοκαιριού και η έλλειψη θέρμανσης το χειμώνα οδηγεί σε ακατάλληλη θερμοκρασία και σχετική υγρασία για την ανάπτυξη των φυτών και μπορεί να προκαλέσει εξαιρετικές διακυμάνσεις στην εξάτμιση η οποία άμεσα επηρεάζει τον ρυθμό διαπνοής των φυτών. Υπό αυτές τις συνθήκες η καλλιέργεια παίζει κυρίαρχο ρόλο στη δημιουργία του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου, ιδίως μέσω του βαθμού διαπνοής ο οποίος αποτελεί την κύρια διαδικασία δροσισμού των φυτών. (Seginer 1994)

Το θερμοκήπιο περιορίζει την ανταλλαγή υδρατμών με τον εξωτερικό αέρα προκαλώντας μια ανάδραση, καθώς μια αλλαγή στη διαπνοή των φυτών μεταβάλλει την περιεκτικότητα σε υδρατμούς στον αέρα του θερμοκηπίου που επηρεάζει το ρυθμό της διαπνοής. (Aubinet et al. 1989)

Οι κλιματικές συνθήκες κατά τον κύκλο ανάπτυξης των φυτών επηρεάζουν την ανταλλαγή αερίων των φύλλων. Τα φύλλα που αναπτύσσονται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες του επιθυμητού τείνουν να είναι λιγότερο λειτουργικά και η γήρανση τους μπορεί να επιταχυνθεί. Το μοτίβο της γήρανσης των φύλλων μπορεί να μεταβληθεί εάν κάποια φύλλα σκιάζονται από άλλα. (Lorenzo et al., 2003)

1.5.2 Οφέλη Γνώσης της Διαπνοής

Η γνώση της διαπνοής των φυτών στη διάρκεια του χρόνου μπορεί να χρησιμεύσει στη βελτίωση του ελέγχου της άρδευσης στις υδροπονικές καλλιέργειες καθώς απαιτείται ακριβής και δυναμικός έλεγχος της παροχής νερού για την κάλυψη των αναγκών των φυτών, λόγω της χαμηλής ικανότητας συγκράτησης νερού ορισμένων υποστρωμάτων. (Medrano et al. 2005)

Η ελεγχόμενη από ηλεκτρονικό υπολογιστή άρδευση επιτρέπει τη χρήση περισσότερο ή λιγότερο απλοποιημένων αλγορίθμων για τον υπολογισμό του ποσού διαπνοής βάσει περιβαλλοντικών και φυσιολογικών παραγόντων. Η διαπνοή των φυτών μπορεί αποτελεσματικά να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση Penman-Monteith. (J.L. Monteith 1990)

1.6 Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων στη Γεωργία Ακριβείας

Το Διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things, IoT) αποτελεί το δίκτυο επικοινωνίας πληθώρας συσκευών, οικιακών συσκευών, αυτοκινήτων καθώς και κάθε αντικειμένου που ενσωματώνει ηλεκτρονικά μέσα, λογισμικό, αισθητήρες αλλά πρωτίστως δυνατότητα δικτύωσης ώστε να επιτρέπεται η σύνδεση και η ανταλλαγή δεδομένων με άλλες συσκευές. Η φιλοσοφία του IoT, σε αντίθεση με το ίντερνετ έτσι όπως το γνωρίζουμε σήμερα, είναι η διασύνδεση συσκευών μεταξύ τους. Η διασύνδεση μπορεί να γίνεται είτε σε τοπικό δίκτυο είτε μέσω του διαδικτύου (παγκόσμιος ιστός) και διαφέρει στο γεγονός πως υπάρχει επικοινωνία και ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ συσκευών/ μηχανών (Machine-to-Machine, M2M) αντί για επικοινωνία συσκευών (π.χ. υπολογιστών ή διακομιστών) με φυσικούς χρήστες (ανθρώπους) που παράγουν ή καταναλώνουν πληροφορία.

Στη γεωργία, το Internet of Things μπορεί να έχει πρακτική εφαρμογή μέσω της διασύνδεσης πληθώρας αισθητήρων οι οποίοι λαμβάνουν μετρήσεις θερμοκρασίας, υγρασίας, βροχόπτωσης, περιεκτικότητας σε θρεπτικά του εδάφους καθώς και εντομολογικών προσβολών με συσκευές που επιδρούν στην κατάσταση της καλλιέργειας (π.χ. εξοπλισμός ελέγχου κλίματος, άρδευσης, λίπανσης κ.ο.κ.). Αξιοποιώντας τις πληροφορίες αυτές είμαστε σε θέση να δημιουργήσουμε αυτοματισμούς ή/και να κάνουμε καίριες επεμβάσεις στην καλλιέργεια την κατάλληλη χρονική στιγμή, διασφαλίζοντας την ποιότητα των αγροτικών προϊόντων, εξοικονομώντας πόρους (νερό, φυτοφάρμακα, λιπάσματα) και επιβαρύνοντας πολύ λιγότερο το περιβάλλον κινούμενοι στο ευρύτερο πλαίσιο των πρακτικών της γεωργίας ακριβείας.

1.6.1 Έξυπνη Γεωργία – Γεωργία Ακριβείας

Η έξυπνη γεωργία στην πράξη περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα σύγχρονων τεχνολογιών πληροφορίας και επικοινωνιών (ΤΠΕ) που βρίσκουν εφαρμογή στην γεωργία. Τέτοιες τεχνολογίες είναι ο εξοπλισμός άρδευσης και λίπανσης ακριβείας, το διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things – IoT), ασύρματοι και ενσύρματοι αισθητήρες και ενεργοποιητές (sensor, actuators), τα συστήματα γεω-εντοπισμού (GPS), τα μεγάλα δεδομένα (Big Data), κλπ.

Η έξυπνη γεωργία έχει τη δυνατότητα να δώσει πιο παραγωγική και βιώσιμη γεωργική παραγωγή, η οποία θα βασίζεται σε μια προσέγγιση πιο ακριβούς και αποδοτικής χρήσης των πόρων και έγκαιρης διάγνωσης καθώς και πρόβλεψης πιθανών κινδύνων με λήψη των ανάλογων μέτρων διασφάλισης της καλλιέργειας.

Η γεωργία ακριβείας είναι η διαχείριση της χωρικής και χρονικής μεταβολής για τη βελτίωση της οικονομικής απόδοσης σε συνδυασμό με τη μείωση των εισροών και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Περιλαμβάνει συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (Decision Support Systems, DSS) για ολόκληρη την διαχείριση των γεωργικών εκμεταλλεύσεων με στόχο την βελτιστοποίηση των αποδόσεων επί των εισροών με παράλληλη διατήρηση των πόρων, τα οποία χαρακτηρίζονται από την ευρεία χρήση των συστημάτων γεω-εντοπισμού (GPS, GNSS), αεροφωτογραφιών από UAVs/Drones και την τελευταία γενιά των υπερχρονικών εικόνων που παρέχονται από τους δορυφόρους Sentinel, που έχουν σαν συνέπεια τη δημιουργία χαρτών χωρικής παραλλακτικότητας διαφόρων μεταβλητών που μπορεί να μετρηθούν (π.χ. απόδοση των καλλιεργειών, χαρακτηριστικά του εδάφους / τοπογραφία, περιεκτικότητα σε οργανική ύλη, επίπεδα υγρασίας, επίπεδα αζώτου, κλπ.).

1.7 Στόχος της Εργασίας

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν, ο έλεγχος και η χωρική απεικόνιση της ομοιογένειας του περιβάλλοντος και της διαπνοής φυτών αγγουριού υδροπονικής καλλιέργειας, με βάση τη θερμοκρασία αέρα, τη σχετική υγρασία και τη θερμοκρασία φύλλου στο μικροκλίμα γύρο από αυτά. Η γνώση των περιβαλλοντικών συνθηκών στο θερμοκήπιο μας επιτρέπει τη ρύθμισή του ώστε να επιτύχουμε τις ιδανικές για το φυτό συνθήκες, περιορίζοντας έτσι ασθένειες και κατά συνέπεια επεμβάσεις με φυτοφάρμακα. Η γνώση της διαπνοής των φυτών μας προσφέρει ουσιαστικά τη δυνατότητα υπολογισμού της ακριβούς δόσης άρδευσης που πρέπει να εφαρμόσουμε καθώς με βάση αυτή γνωρίζουμε τις ακριβείς απώλειες των φυτών σε νερό. Η πρακτική αυτή είναι πολύ μεγάλης σημασίας τόσο από περιβαλλοντική όσο και οικονομική άποψη καθώς γίνεται τεράστια εξοικονόμηση νερού και λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος.

Κεφάλαιο 2: Υλικά και Μέθοδοι

2.1 Το Θερμοκήπιο

Το θερμοκήπιο στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις κατασκευάστηκε το 2010. Ο τύπος του θερμοκηπίου είναι πολλαπλό τροποποιημένο τοξωτό, με σκελετό από γαλβανισμένο χάλυβα, κάλυψη από γυαλί στις πλαϊνές πλευρές και μονό φύλλο πολυαιθυλένιο στην οροφή.



Εικόνα 6. Λήψη από δορυφόρο του πειραματικού θερμοκηπίου. (Πηγή: Google Earth)

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θερμοκηπίου είναι: μήκος 105 m, πλάτος 48 m, ύψος κορφιά 7.5 m, ύψος υδρορροής 4,5 m. Η συνολική έκταση του θερμοκηπίου είναι 5040 m².

Το θερμοκήπιο είναι εξοπλισμένο με σύστημα υγρής παρειάς και ανεμιστήρων τοποθετημένα στην επιμήκη πλευρά του, παράθυρα οροφής, σύστημα θέρμανσης με θερμαντικούς σωλήνες τόσο στο επίπεδο του εδάφους όσο και στο επίπεδο των φυτών καθώς και με ανεμιστήρες ανακύκλωσης του αέρα τοποθετημένους 4 m πάνω από το έδαφος.

Γεωγραφικά βρίσκεται στην κεντρική Ελλάδα (39° 55' N, 22° 35' E) και πιο συγκεκριμένα στον Πυργετό του Νομού Λαρίσης στους πρόποδες του ανατολικού Ολύμπου με υψόμετρο 160 m και απόσταση από την πόλη της Λάρισας 36km.

2.2 Η Καλλιέργεια

Το πείραμα διεξήχθη σε καλλιέργεια αγγουριού (*Cucumis sativus*) ποικιλίας *litoral* σε θερμοκηπιακή καλλιέργεια ανοικτού υδροπονικού συστήματος, πάνω σε υπόστρωμα πετροβάμβακα. Οι σειρές των φυτών ήταν παράλληλες στην επιμήκη πλευρά του θερμοκηπίου (Βορράς-Νότος) και κάθετες στο ρεύμα αέρα που παραγόταν από το σύστημα δροσισμού. Στη διάρκεια του έτους υπάρχουν δύο καλλιεργητικές περιόδους, μία τον Ιούνιο και μια τον Ιανουάριο. Η συγκεκριμένη καλλιέργεια εγκαταστάθηκε περί τα τέλη Ιουνίου με την πρώτη συγκομιδή να πραγματοποιείται στα μέσα Ιουλίου. Επομένως, τις περιόδους διεξαγωγής του πειράματος (Οκτώβριο-Νοέμβριο) τα φυτά βρίσκονταν σε πλήρη παραγωγή.

Τα φυτά είχαν αποστάσεις φύτευσης 1,6 m μεταξύ των γραμμών και 33 cm επί της γραμμής. Η συχνότητα άρδευσης και η σύσταση του θρεπτικού διαλλείματος εξαρτώνται από το στάδιο ανάπτυξης των φυτών αλλά και από τα Joule ενέργειας που εισέρχονται καθημερινά στο θερμοκήπιο.

2.3 Το Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων

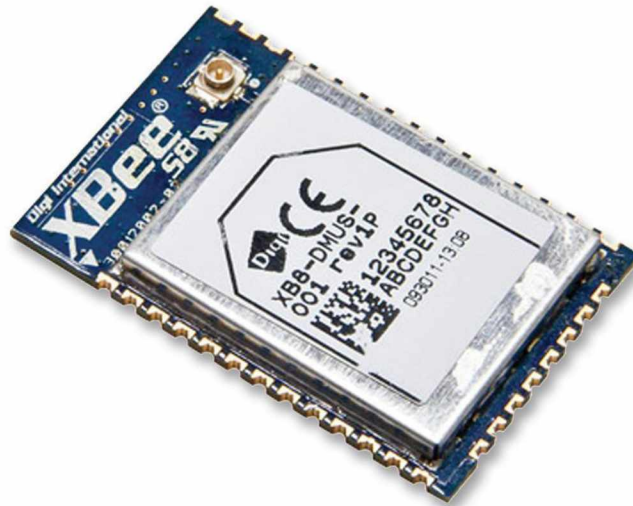
Το δίκτυο δημιουργήθηκε με κόμβους χαμηλής κατανάλωσης βασισμένους σε προγραμματιζόμενα ενσωματωμένα συστήματα της Digi και πιο συγκεκριμένα το μοντέλο Xbee 868LP¹. Η επιλογή των συγκεκριμένων ασύρματων κόμβων έγινε όχι μόνο γιατί έχουν πολύ χαμηλή κατανάλωση ρεύματος, αλλά και γιατί εκπέμπουν σε συχνότητες κάτω από 1GHz κάτι που τους προσδίδει αρκετά καλή ικανότητα επικοινωνίας μέσα από εμπόδια, όπως τα φυτά μέσα σε ένα θερμοκήπιο. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ασύρματου κόμβου:

Πίνακας 1.

Συχνότητα Λειτουργίας	863-870MHz (Ευρωπαϊκό μοντέλο)
Συνθήκες Λειτουργίας	-40 – 85°C
Ψηφιακά I/O	13 (5 SPI/ outputs)
Αναλογικά I/O	4 (10-bit inputs)
Δικτύωση	Mesh, point-to-point, point-to-multipoint, peer-to-peer

¹ <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90002126.pdf>

Δυνατότητα κρυπτογράφησης	128-Bit (AES)
Εύρος επικοινωνίας σε κλειστό χώρο/αστικό περιβάλλον	112μ. με 2.1dBi κεραία, 14μ. με ενσωματωμένη κεραία
Εύρος επικοινωνίας σε ανοιχτό χώρο με οπτική επαφή	8.4χλμ. με 2.1dBi κεραία, 640μ. με ενσωματωμένη κεραία
Ταχύτητα επικοινωνίας	80kb/s – max/ 10kb/s – min

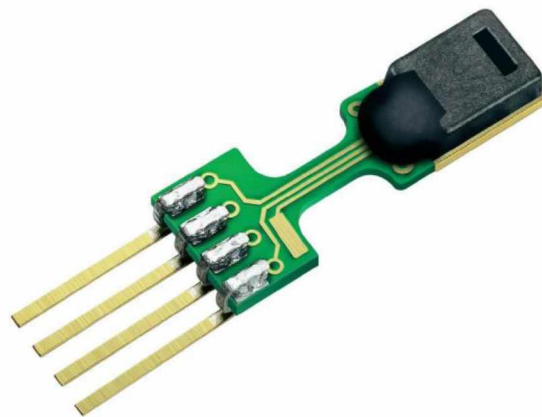


Εικόνα 7. Το ασύρματο υποσύστημα XBee 868LP.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν στους ασύρματους κόμβους:

SHT15 Sensirion – Θερμοκρασία/ Σχ. Υγρασία

Πρόκειται για μια οικογένεια αισθητήρων μέτρησης σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας. Συνδυάζουν αισθητήρια μαζί με επεξεργασία σήματος σε μια συσκευή με πολύ μικρό αποτύπωμα και προσφέρουν πλήρως καλιμπραρισμένο σήμα εξόδου. Ένας χωρητικός αισθητήρας (capacitive sensor) αναλαμβάνει τη μέτρηση της σχετικής



Εικόνα 8. Ο αισθητήρας Sensirion SHT75.

υγρασίας, ενώ για τη θερμοκρασία χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας τάσης αναφοράς (band-gap). Η χρησιμοποιούμενη CMOSens® τεχνολογία εγγυάται εξαιρετική αξιοπιστία και σταθερή απόδοση για μεγάλο χρονικό διάστημα. Και οι δυο παραπάνω αισθητήρες είναι συνδεδεμένοι σε ένα 14-bit μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό και σε ένα σειριακό κύκλωμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ανώτερη ποιότητα σήματος, ταχύτατους χρόνους απόκρισης και ανθεκτικότητα στις εξωτερικές διαταραχές. Η ταχύτητα απόκρισης, η χαμηλή κατανάλωση και η ανθεκτικότητα στις εξωτερικές καιρικές συνθήκες καθιστούν την οικογένεια αισθητήρων SHT ιδανική λύση για χρήση σε περιβάλλον θερμοκηπίου.

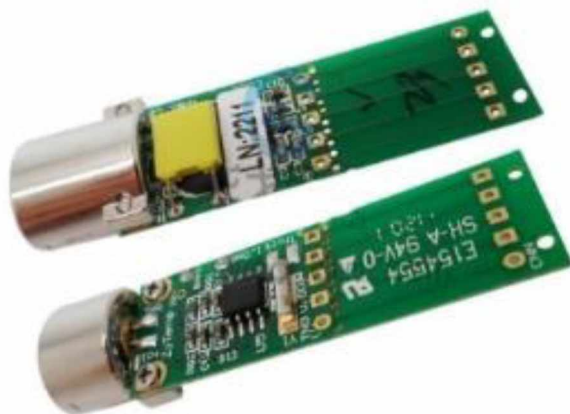
Χαρακτηριστικά Αισθητήρα

Πίνακας 2.

Πηγή τροφοδοσίας	min 2.4 / typ 3.3 / max 5.5 V
Κατανάλωση ενέργειας	Κατάσταση ύπνωσης: typ 2 / max 5 μ W Κατάσταση μέτρησης: 3mW M.O.: 90 μ W
Επικοινωνία	ψηφιακή διασύνδεση 2-καλωδίων
Συνθήκες/ εύρος λειτουργίας	10 – 50°C (0 – 125°C peak), 0 – 99%RH
Ευσαιθησία/ Ακρίβεια	Ανάλυση: min 0.4 / typ 0.05 / max 0.05 %RH Ακρίβεια: typ \pm 1.8 %RH / max \pm 4 %RH/ typ \pm 0.3 °C / max \pm 1.7 °C Επαναληπτικότητα: \pm 0.1 %RH/ \pm 0.1 °C Υστέρηση: \pm 1 %RH
Μη γραμμικότητα	raw data \pm 3 %RH / linearized <1 %RH
Χρόνος απόκρισης	tau 63% / typ 8s
Μακροπρόθεσμη ολίσθηση (σε κανονική λειτουργία)	< 0.5 %RH/year, < 0.04 °C/year

Zytemp TN9, Υπέρυθρο Θερμοζεύγος – Θερμοκρασία Φύλλου - Αέρα

Το Zytemp TN9 είναι ένα υπέρυθρο θερμόμετρο που έχει τη δυνατότητα μέτρησης της θερμοκρασίας επιφανειών από απόσταση. Ο αισθητήρας αυτός δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης της θερμοκρασίας του φυτού, καθώς μπορεί να εστιάσει σε μεγαλύτερες επιφάνειες ανάλογα με την απόσταση (σε εκατοστά από το φυτό) που τον τοποθετούμε. Η μέτρηση γίνεται με μη παρεμβατικό τρόπο που δεν βλάπτει ούτε επηρεάζει το ίδιο το φυτό. Οι μετρήσεις θερμοκρασίας του φυτού δίνουν τη δυνατότητα να υπολογίσουμε παραμέτρους όπως η διαπνοή, οι οποίες με τη σειρά τους μας βοηθούν να κάνουμε εκτιμήσεις με φυτο-κεντρικά κριτήρια.



Εικόνα 9. Ο αισθητήρας Zytemp TN9.

Χαρακτηριστικά Αισθητήρα

Πίνακας 3.

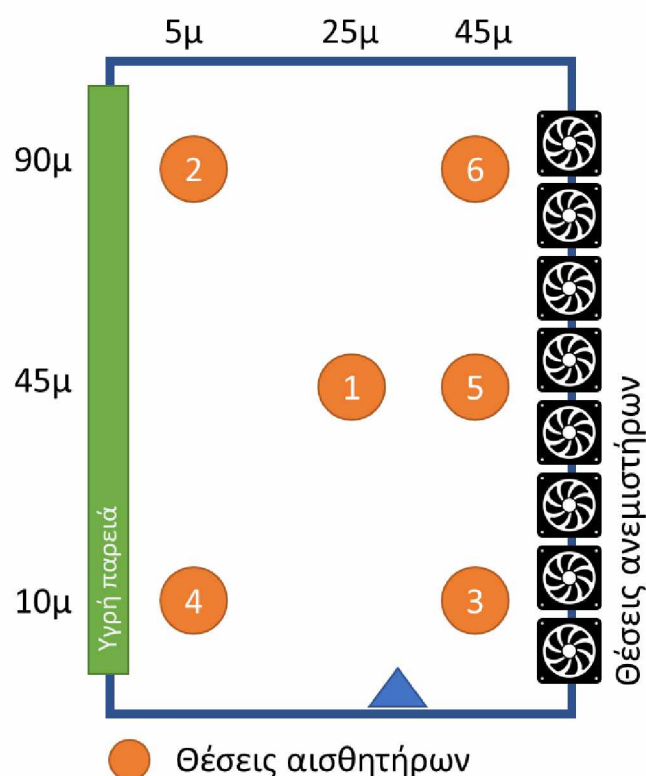
Πηγή τροφοδοσίας	2.5V min – 3.6V max
Κατανάλωση στα 3V	Σε λειτουργία: 4mA typ – 6mA max Σε αναμονή: 3μΑ typ. – 3μΑ max
Εύρος μέτρησης	-33 – 220°C
Εύρος λειτουργίας	-10 – 50 °C
Ακρίβεια μέτρησης επιφάνειας/αντικειμένου	+/- 0.6 °C (για θερμοκρασίες αντικειμένου 15-35 °C σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25 °C)
Ανάλυση	1/16 °C (0.0626 °C)
Χρόνος απόκρισης	1 sec.

2.4 Το Πείραμα

Το πείραμα εκτελέστηκε σε θερμοκήπιο καλλιέργειας αγγουριού σε ανοικτό υδροπονικό σύστημα. Οι περίοδοι εκτέλεσης του πειράματος ήταν από τις δέκα Οκτωβρίου 2017 (10/10/2017) έως τριάντα μια Οκτωβρίου 2017 (31/10/2017) και από δέκα Νοεμβρίου 2017 (10/11/2017) έως τριάντα Νοεμβρίου 2017 (30/11/2017).

Για την πραγματοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν 6 (έξι) αισθητήρες (όπως περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 2.3) για τη μέτρηση της θερμοκρασίας αέρα, της θερμοκρασίας φύλλου καθώς και της σχετικής υγρασίας στο μικροπεριβάλλον γύρω από τα φυτά.

Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε έξι διαφορετικές τοποθεσίες μέσα στο χώρο του θερμοκηπίου (Εικόνα 10) για την εξαγωγή μιας ολιστικής εικόνας σχετικά με το περιβάλλον του θερμοκηπίου. Πιο συγκεκριμένα δύο αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε μια γραμμή που βρίσκεται κοντά στην υγρή παρειά, ένας κοντά στην αρχή και ένας κοντά στο τέλος της γραμμής. Δύο αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε κεντρικές γραμμές της καλλιέργειας στο μέσο περίπου αυτών και οι δύο τελευταίοι τοποθετήθηκαν



Εικόνα 10. Γραφική αναπαράσταση του θερμοκηπίου και της θέσης των αισθητήρων. Το βελάκι υποδεικνύει την είσοδο, ενώ στα αριστερά κατά την είσοδο είναι η υγρή παρειά και απέναντι οι ανεμιστήρες.

κοντά στο απέναντι άκρο από την υγρή παρειά, ο ένας στην κοντά στην αρχή και ο άλλος κοντά στο τέλος της γραμμής.

Οι αισθητήρες δέθηκαν με σχοινί στο σύστημα ανάρτησης των φυτών και σε ύψος 1,8 m περίπου ώστε να βρίσκονται στην καρδιά της βλάστησης. Η συχνότητα λήψης των μετρήσεων ήταν ανά 15 (δέκα πέντε) λεπτά για 24 (είκοσι τέσσερις) ώρες τη μέρα.

Για την καλύτερη κατανομή των μετρήσεων, χωρίσαμε τη μέρα σε τρεις περιόδους:

- Νύχτα (19:00-5:45)
- Χάραμα (6:00-7:00)
- Μέρα (7:15-18:45)

Για τη λήψη των μετρήσεων οι αισθητήρες ήταν συνδεδεμένοι στο δίκτυο του θερμοκηπίου μέσω του οπίου τις λαμβάναμε σε πραγματικό χρόνο.

Επιπλέον στο χώρο του θερμοκηπίου παίρναμε θερμοκρασίες υγρού (Twet) και ξηρού θερμομέτρου (Tdry), σχετικής υγρασίας (RH) καθώς και της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (Rn). Ακόμη, έχουν καταγραφεί οι περίοδοι λειτουργίας των συστημάτων κλιματισμού και σκίασης όπως η θέση των παραθύρων, το επίπεδο του δυναμικού αερισμού (Fan State), η αντλία δροσισμού (Water Panel), η θέρμανση (Heat), οι αεριστήρες ανακυκλοφορίας (Circular Fans) και η θέση της κουρτίνας.

Παράλληλα λαμβάναμε μετρήσεις από μετεωρολογικό σταθμό για τις περιβαλλοντικές συνθήκες εξωτερικά του θερμοκηπίου όπως θερμοκρασία υγρού και ξηρού θερμομέτρου, σχετική υγρασία, ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμων καθώς και τα επίπεδα βροχόπτωσης.

Οι παραπάνω μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή ενός πιο ασφαλούς συμπεράσματος σχετικά με τη διαμόρφωση του μικροκλίματος γύρω από τα φυτά και πως αυτή επηρεάζεται από τα συστήματα κλιματισμού και τις εξωτερικές παραμέτρους του περιβάλλοντος.

2.5 Υπολογισμοί

Όλα τα δεδομένα που μετρήθηκαν από τους αισθητήρες επεξεργάστηκαν στο Excel ώστε να γίνουν ευκολότερα διαχειρίσιμα και για την εξαγωγή ευκολότερα ερμηνεύσιμων συμπερασμάτων. Αρχικά υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι των μετρήσεων της θερμοκρασίας αέρα, της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας φύλλου για κάθε ημέρα από όλους τους αισθητήρες.

Στη συνέχεια με βάση τα παραπάνω δεδομένα, έγινε ο υπολογισμός της διαπνοής (Tr) με τη χρήση ενός απλού μοντέλου που χρησιμοποιείται για φυτά ντομάτας για το οποίο ισχύει:

$$Tr = a * R + b * VPD$$

Tr = Transpiration, W m⁻²

a = 0.8 (constant), dimensionless

b = 0.2 (constant), W m⁻² kPa⁻¹

R = Radiation intensity, W m⁻²

VPD = Vapour pressure deficit, kPa

Όπου VPD = ((100 - RH)/100)*SVP

RH = Relative humidity, %

SVP = Saturated vapour pressure, Pa

Όπου SVP = 610.7 * 10^{7.5T/(237.3+T)}

T = Temperature, °C

Μετά τον υπολογισμό της διαπνοής, τόσο με τη χρήση της θερμοκρασίας αέρα (ιδανική διαπνοή) όσο και με τη χρήση της θερμοκρασίας φύλλου (πραγματική διαπνοή), υπολογίσαμε τις μέσες τιμές, την τυπική απόκλιση, τη μέγιστη διαφορά μεταξύ των μέσων τιμών, τις τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων και τη μέση σχετική απόκλιση (MRD) των μέσων όρων για κάθε αισθητήρα για καθένα από τα μετρημένα δεδομένα μας (θερμοκρασία αέρα και φύλλου, σχετική υγρασία, ιδανική διαπνοή, πραγματική διαπνοή).

Εν συνεχεία, με χρήση διαγραμμάτων επιφάνειας (contour plots) προσεγγίσαμε μια πιο οπτικοποιημένη μέθοδο για την παρουσίαση της χωροτακτικής κατανομής των δεδομένων μας, κατά τις περιόδους νύχτας, χαράματος και ημέρας.

Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα

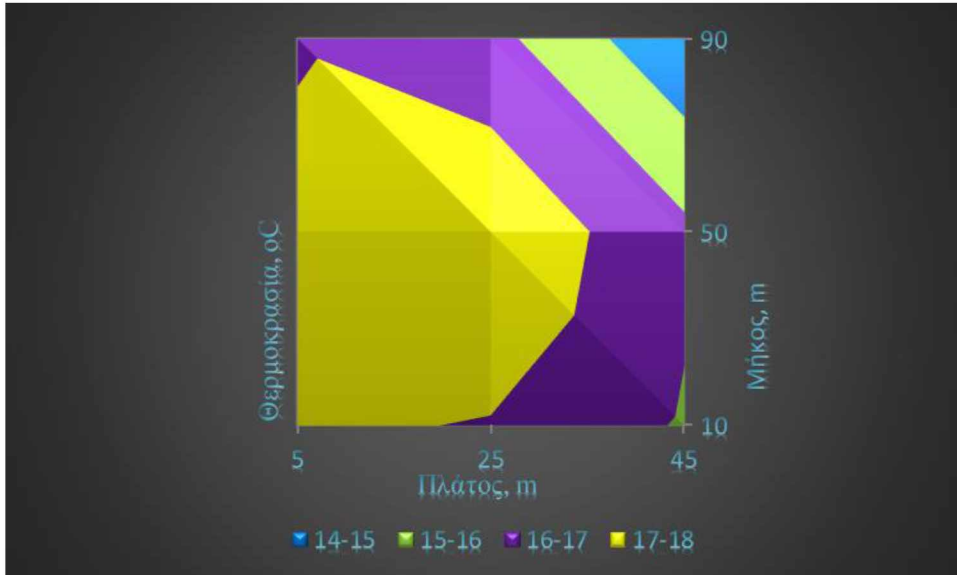
3.1 Κατανομή της Θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία εντός του θερμοκηπίου φαίνεται να παρουσιάζει ιδιαίτερη ομοιογένεια κατά τη διάρκεια της ημέρας ενώ τις περιόδους νύχτας και χαράματος συναντάμε μεγαλύτερες αποκλείσεις.

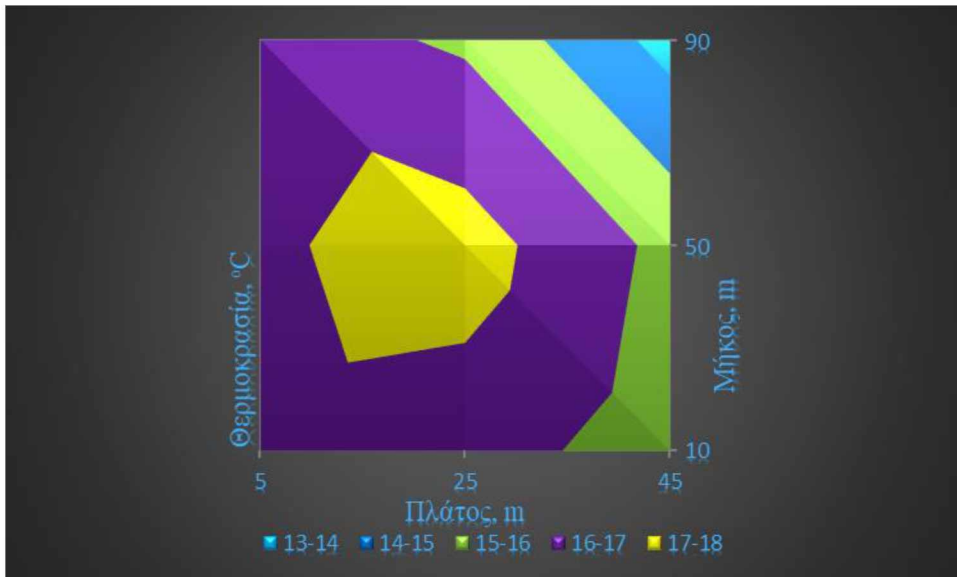
3.1.1 Νύχτα, Χάραμα, Μέρα, Διαφορετικές Ώρες, Διαφορετικά Συστήματα Κλιματισμού σε Λειτουργία

Σύμφωνα με τις μέσες τιμές των μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα καθώς και από την τυπική απόκλιση, παρατηρείται μεγαλύτερη θερμοκρασιακή ομοιογένεια κατά τη διάρκεια της ημέρας με μέγιστη απόκλιση μεταξύ των αισθητήρων τους 2,3 °C. Ελαφρώς πιο χαμηλές τιμές παρατηρούνται στους αισθητήρες που βρίσκονταν κοντά στην πλευρά των ανεμιστήρων. Μεγαλύτερες αποκλείσεις μεταξύ των αισθητήρων παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια του χαράματος και της νύχτας με 3,8 °C και 3,6 °C αντίστοιχα.

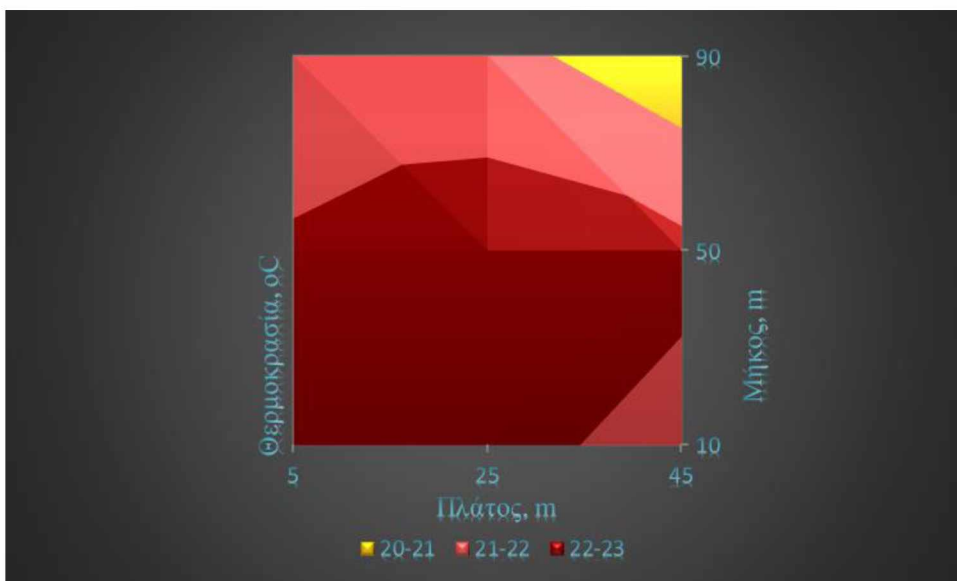
Sensors	Νύχτα		Χάραμα		Μέρα	
	Average	Std	Average	Std	Average	Std
Sensor 1	17,8	1,7	17,4	1,9	22,5	3,0
Sensor 2	17,1	1,9	16,6	2,2	22,5	3,5
Sensor 3	14,1	2,1	13,6	2,4	20,2	3,9
Sensor 4	16,9	1,6	16,5	1,8	21,3	2,9
Sensor 5	16,2	2,3	15,7	2,6	22,2	4,2
Sensor 6	15,9	2,2	15,4	2,5	21,7	4,0
Max diff.	3,6		3,8		2,3	
Avg. Std	1,29		1,31		0,88	
Avg. MRD	0,057		0,061		0,030	



Διάγραμμα 1. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας (νύχτα)



Διάγραμμα 2. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας (χάραμα)



Διάγραμμα 3. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας (μέρα)

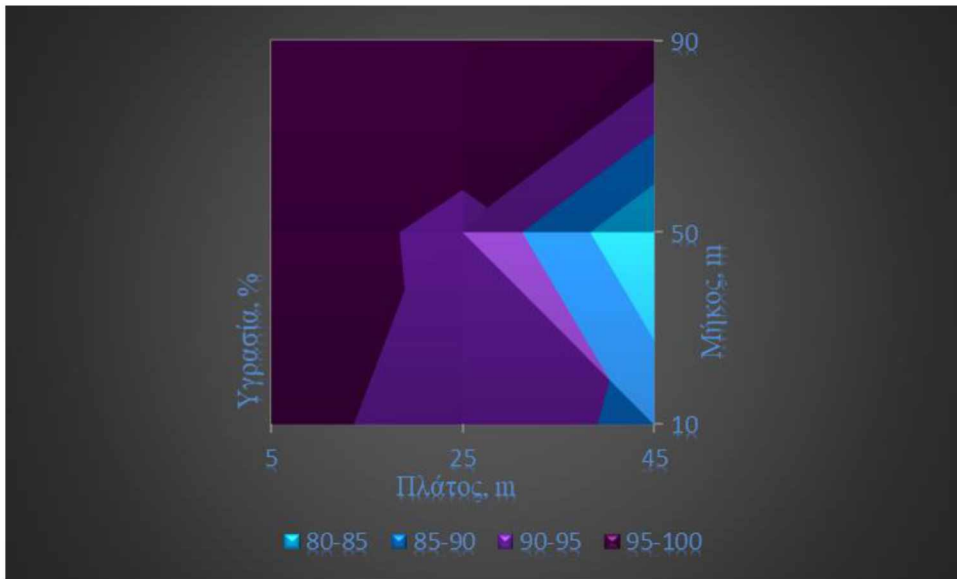
3.2 Κτανομή Σχετικής Υγρασίας

Ιδιαίτερα μεγάλες αποκλίσεις παρατηρούνται στις τιμές της σχετικής υγρασίας με τις μεγαλύτερες διαφορές να εντοπίζονται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Μεγαλύτερη ομοιογένεια εμφανίζεται επί των σειρών ενώ μεγαλύτερη παραλλακτικότητα μεταξύ αυτών, δηλαδή από την ανατολική προς τη δυτική πλευρά του θερμοκηπίου.

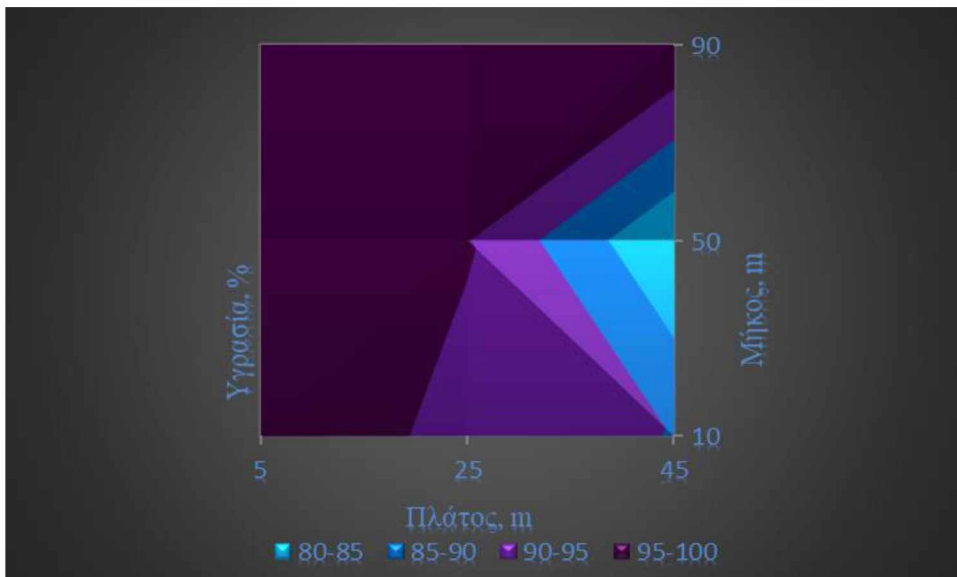
3.2.1 Νύχτα, Χάραμα, Μέρα, Διαφορετικές Ώρες, Διαφορετικά Συστήματα Κλιματισμού σε Λειτουργία

Στην περίπτωση της σχετικής υγρασίας παρατηρούμε μεγαλύτερο ποσοστό διασποράς στις μετρήσεις των αισθητήρων και κατά συνέπεια μεγαλύτερη τυπική απόκλιση. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της ημέρας βρέθηκαν διαφορές μεταξύ των μετρήσεων της τάξεως του 22,9% ενώ σε νύχτα και χάραμα 18,8% και 19,1% αντίστοιχα. Για ακόμη μια φορά οι χαμηλότερες τιμές εντοπίζονται στους αισθητήρες που ήταν τοποθετημένοι στην πλευρά των ανεμιστήρων.

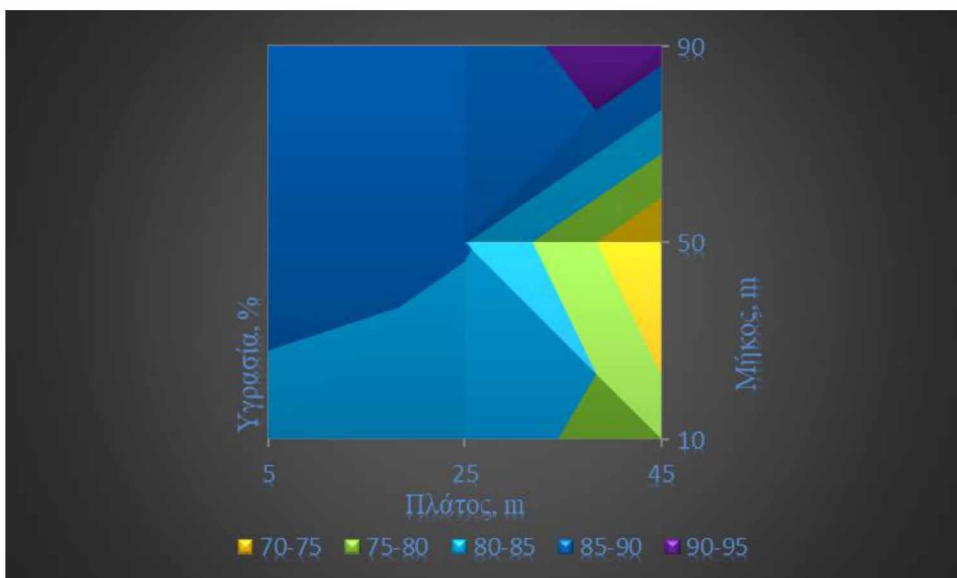
Πίνακας 5. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) σχετικής υγρασίας για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους νύχτας, μέρας και χαράματος. Ακόμη, περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσων όρων, οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων και η μέση σχετική απόκλιση (MRD) των μέσων όρων.						
Sensors	Νύχτα		Χάραμα		Μέρα	
	Average	Std	Average	Std	Average	Std
Sensor 1	94,3	2,7	95,2	2,7	85,3	7,0
Sensor 2	96,4	2,6	97,3	2,5	84,4	9,6
Sensor 3	99,1	1,9	99,3	1,7	92,3	5,4
Sensor 4	97,9	2,0	98,4	2,4	87,5	8,2
Sensor 5	80,3	5,8	80,2	6,5	69,4	9,7
Sensor 6	88,7	3,5	89,8	3,4	77,4	8,8
Max diff.	18,8		19,1		22,9	
Avg. Std	7,12		7,28		8,12	
Avg. MRD	0,059		0,060		0,075	



Διάγραμμα 4. Χωρική διαμόρφωση μέσης σχετικής υγρασίας (νύχτα)



Διάγραμμα 5. Χωρική διαμόρφωση μέσης σχετικής υγρασίας (χάραμα)



Διάγραμμα 6. Χωρική διαμόρφωση μέσης σχετικής υγρασίας (μέρα)

3.3 Κατανομή Θερμοκρασίας Φύλλων Καλλιέργειας

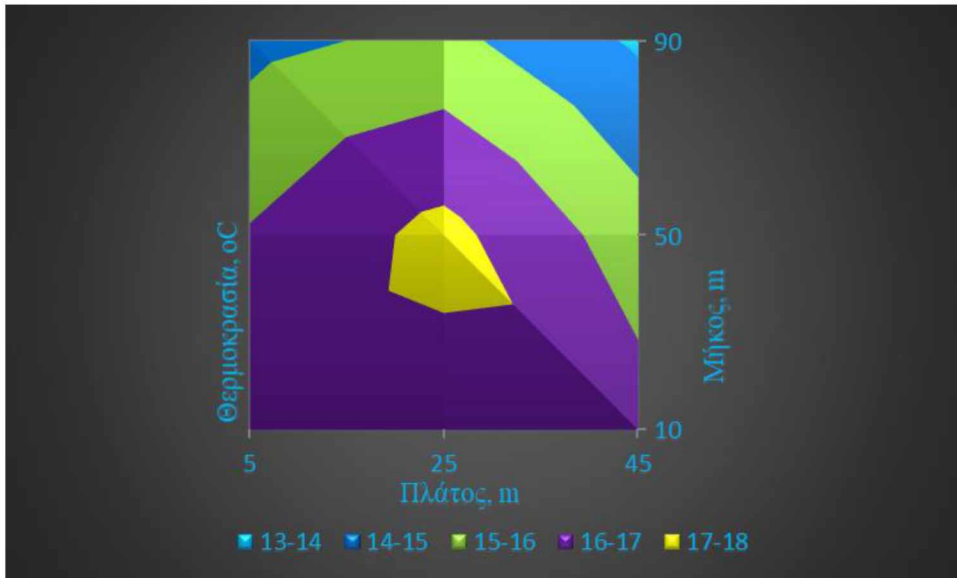
Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας φύλλου πάρθηκαν μετρήσεις από τέσσερις αισθητήρες λόγω τεχνικών προβλημάτων που παρουσιάστηκαν στους δύο από τους έξι. Μεγαλύτερη ομοιογένεια εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας όπως και στην περίπτωση της θερμοκρασίας του αέρα ενώ μεγαλύτερες είναι οι διακυμάνσεις τις περιόδους νύχτας και χαράματος.

3.3.1 Νύχτα, Χάραμα, Μέρα, Διαφορετικές Ώρες, Διαφορετικά Συστήματα Κλιματισμού σε Λειτουργία

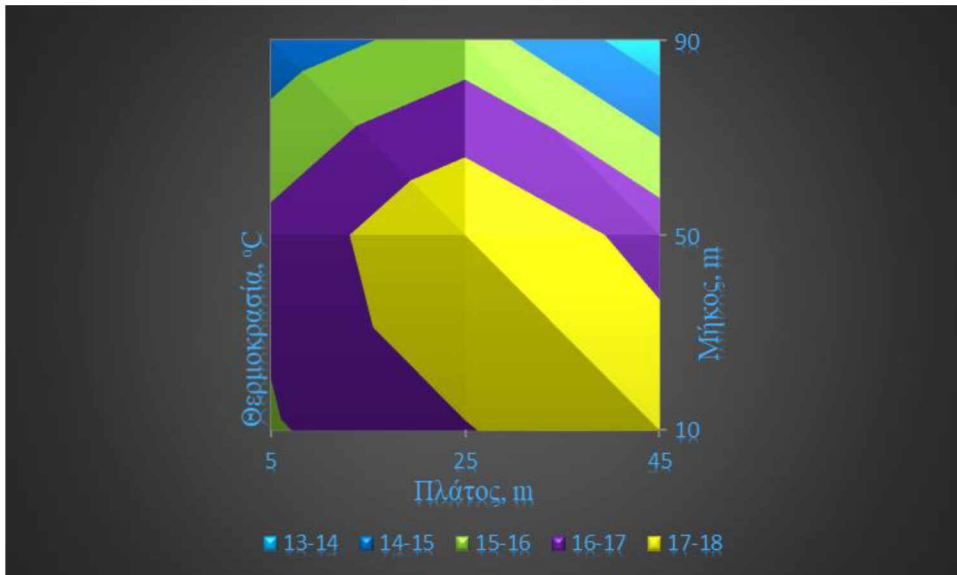
Η μεγαλύτερη ομοιογένεια και στην περίπτωση της θερμοκρασίας των φύλλων εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας με μέγιστη διαφορά μεταξύ των μετρήσεων τους 2,6 °C. Κατά τις περιόδους νύχτας και χαράματος οι μέγιστες διαφορές μεταξύ των μετρήσεων ήταν παρόμοιες με 3,5°C και 3,7°C αντίστοιχα.

Πίνακας 6. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) θερμοκρασίας φύλλου για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους νύχτας, μέρας και χαράματος. Ακόμη, περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσων όρων, οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων και η μέση σχετική απόκλιση (MRD) των μέσων όρων.

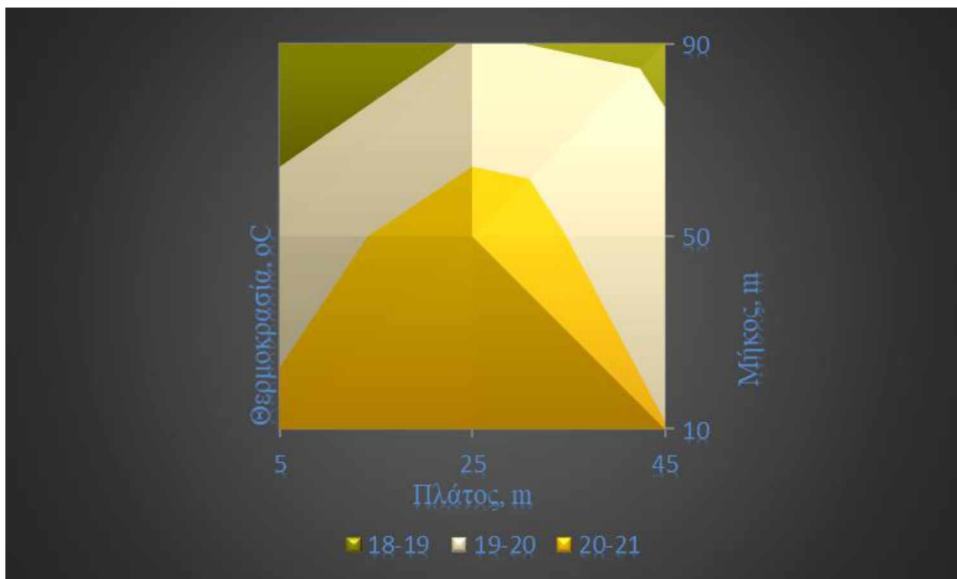
Sensors	Νύχτα		Χάραμα		Μέρα	
	Average	Std	Average	Std	Average	Std
Sensor 1	17,3	1,2	17,0	1,3	20,5	2,1
Sensor 2	16,2	1,4	15,9	1,6	20,2	2,6
Sensor 3	13,8	1,8	13,3	2,0	18,7	3,0
Sensor 4	14,7	1,2	14,4	1,3	17,9	2,1
Max diff.	3,5		3,7		2,6	
Avg. Std	1.55		1.62		1,23	
Avg. MRD	0,080		0,086		0,053	



Διάγραμμα 7. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας φύλλου (νύχτα)



Διάγραμμα 8. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας φύλλου (χάραμα)



Διάγραμμα 9. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας φύλλου (μέρα)

3.4 Κατανομή Διαπνοής της Καλλιέργειας

Η γνώση της διαπνοής των φυτών αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για τον υπολογισμό και της χορήγηση μιας ακριβούς δόσης άρδευσης. Η βελτιστοποίηση του προγράμματος άρδευσης ανάλογα με τη διαπνοή των φυτών μπορεί να αποτρέψει αχρείαστη σπατάλη νερού αλλά και χρημάτων για τον παραγωγό.

3.4.1 Κατανομή με βάση την Ιδανική Διαπνοή

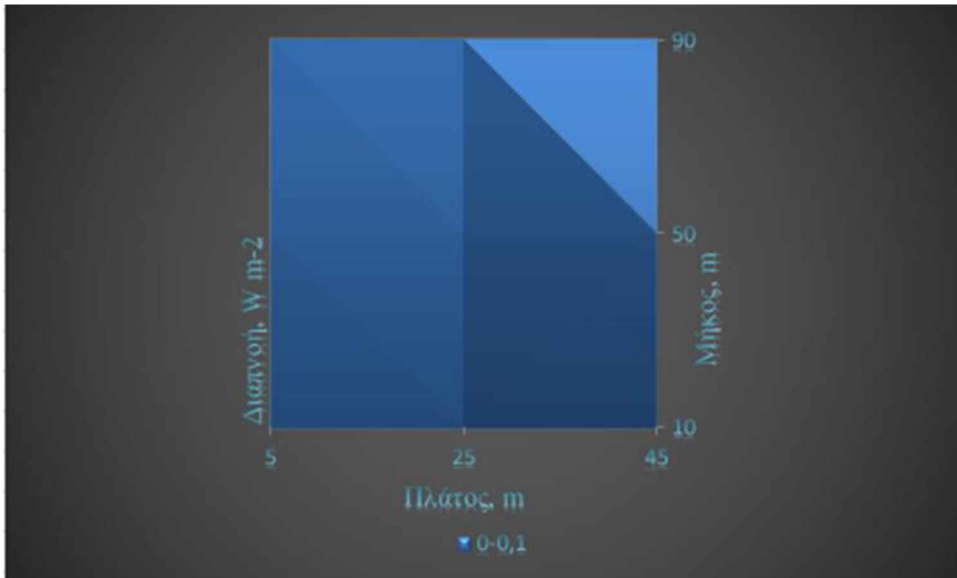
Ο πρώτος υπολογισμός της διαπνοής έγινε με τη βάση τη θερμοκρασία του αέρα και ισοδυναμεί με την ιδανική διαπνοή που θα μπορούσαν να έχουν τα φυτά.

Με βάση τους υπολογισμούς παρατηρείται πολύ μεγάλη ομοιογένεια σε όλες τις περιόδους με τη μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια της ημέρας.

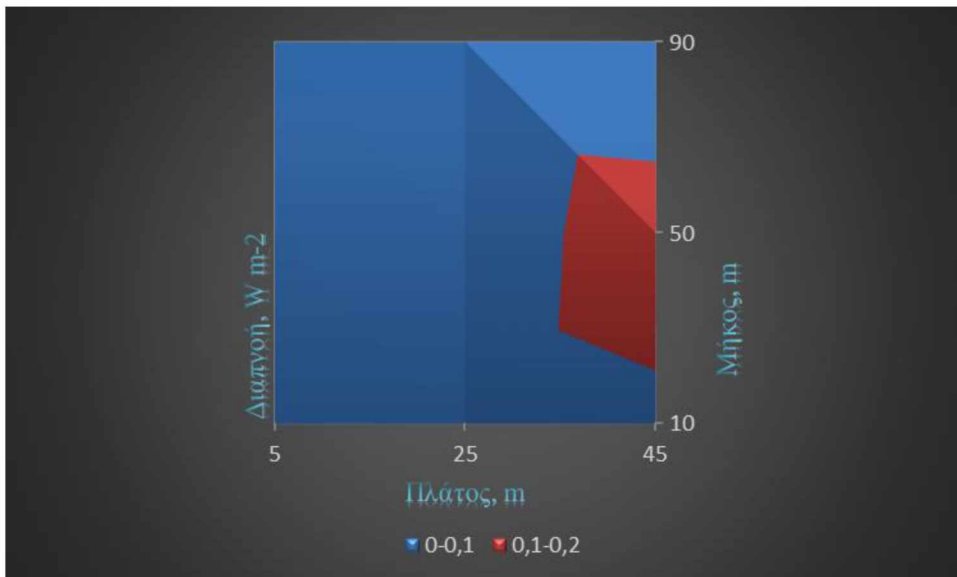
3.4.1.1 Νύχτα, Χάραμα, Μέρα, Διαφορετικές Ώρες, Διαφορετικά Συστήματα Κλιματισμού σε Λειτουργία

Όπως φαίνεται και από τις μέγιστες διαφορές των μέσων όρων οι οποίες είναι πολύ μικρές οι τιμές της ιδανική διαπνοή είναι πάρα πολύ κοντά μεταξύ τους. Κατά τη διάρκεια της ημέρας παρατηρούμε τα μεγαλύτερα ποσοστά διαπνοής με τεράστια διαφορά από αυτά της νύχτας και του χαράματος. Αυτό οφείλεται στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία όπως είναι λογικό είναι πολύ μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια της ημέρας.

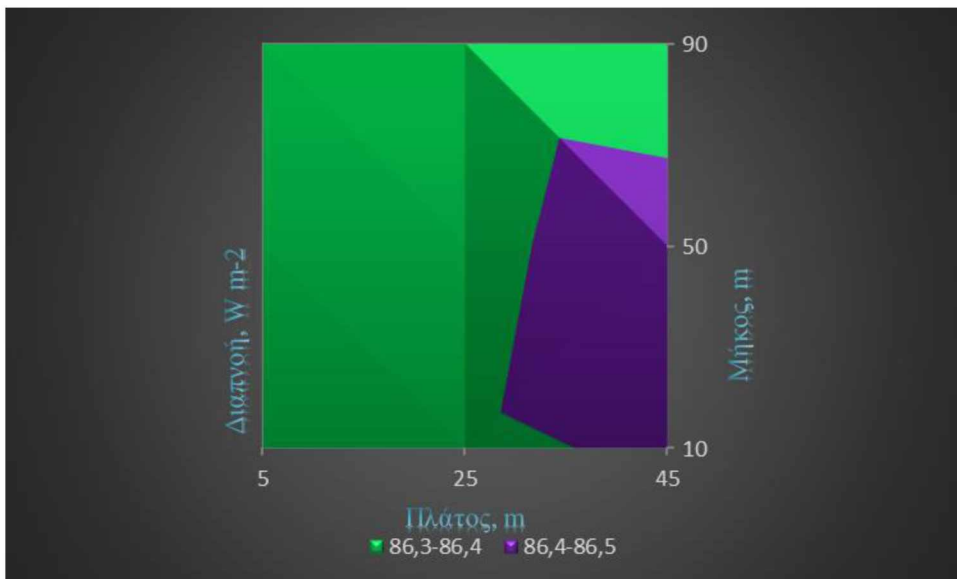
Sensors	Νύχτα		Χάραμα		Μέρα	
	Average	Std	Average	Std	Average	Std
Sensor 1	0,022	0,011	0,072	0,188	86,37	51,7
Sensor 2	0,014	0,010	0,063	0,188	86,38	51,7
Sensor 3	0,003	0,005	0,056	0,185	86,32	51,7
Sensor 4	0,008	0,008	0,059	0,187	86,35	51,7
Sensor 5	0,074	0,027	0,126	0,191	86,46	51,7
Sensor 6	0,041	0,014	0,090	0,190	86,41	51,7
Max diff.	0,033		0,036		0,14	
Avg. Std	0,026		0,026		0,048	
Avg. MRD	0,747		0,259		0,0004	



Διάγραμμα 10. Χωρική διαμόρφωση μέσης ιδανικής διαπνοής (νύχτα)



Διάγραμμα 11. Χωρική διαμόρφωση μέσης ιδανικής διαπνοής (χάραμα)



Διάγραμμα 12. Χωρική διαμόρφωση μέσης ιδανικής διαπνοής (μέρα)

3.4.2 Κατανομή με βάση την Πραγματική Διαπνοή

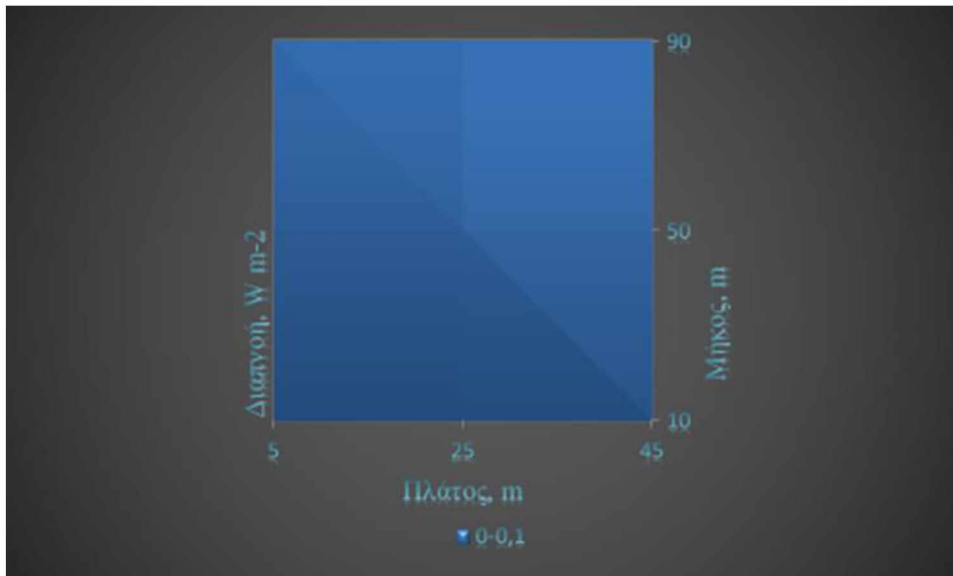
Η πραγματική διαπνοή υπολογίστηκε με τη χρήση της θερμοκρασίας φύλλου. Ακόμη η θερμοκρασία φύλλου μπορεί να αξιοποιηθεί για την εύρεση συμπύκνωσης στην επιφάνεια των φύλλων. Όταν η θερμοκρασία φύλλου είναι μικρότερη ή ίση με τη θερμοκρασία του αέρα, τότε παρατηρείται συμπύκνωση στην επιφάνεια των φύλλων. (Ferentinos et al. 2016)

3.4.2.1 Νύχτα, Χάραμα, Μέρα, Διαφορετικές Ώρες, Διαφορετικά Συστήματα Κλιματισμού σε Λειτουργία

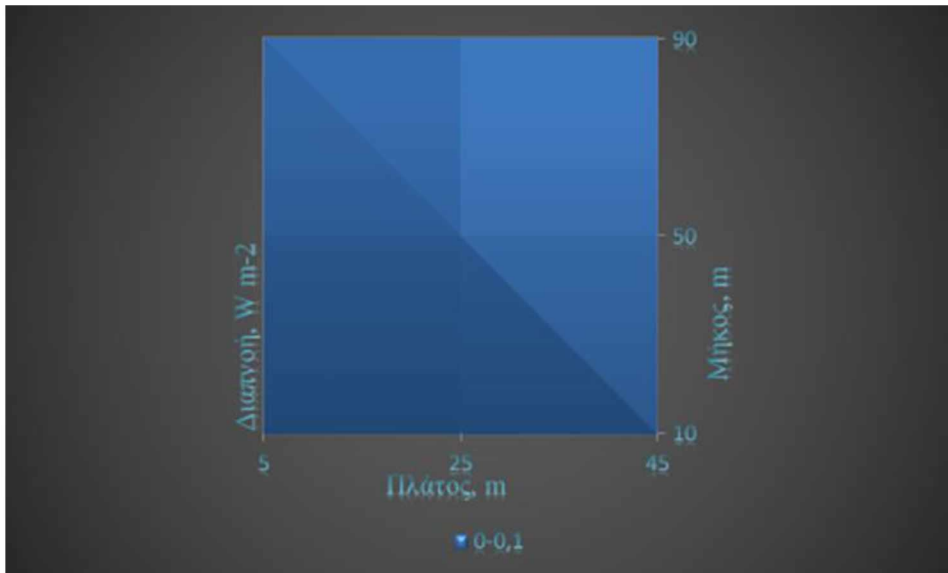
Η πραγματική διαπνοή φέρεται να έχει τιμές σχεδόν πανομοιότυπες με αυτές της ιδανικής διαπνοής. Αυτό συνέβη γιατί η θερμοκρασία των φύλλων σχεδόν ταυτιζόταν με αυτή του αέρα και καθώς όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές της εξίσωσης παραμένουν οι ίδιες έτσι και η ιδανική με την πραγματική διαπνοή τείνουν να ταυτιστούν.

Πίνακας 8. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) θερμοκρασίας φύλλου για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους νύχτας, μέρας και χαράματος. Ακόμη, περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσων όρων, οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων και η μέση σχετική απόκλιση (MRD) των μέσων όρων.

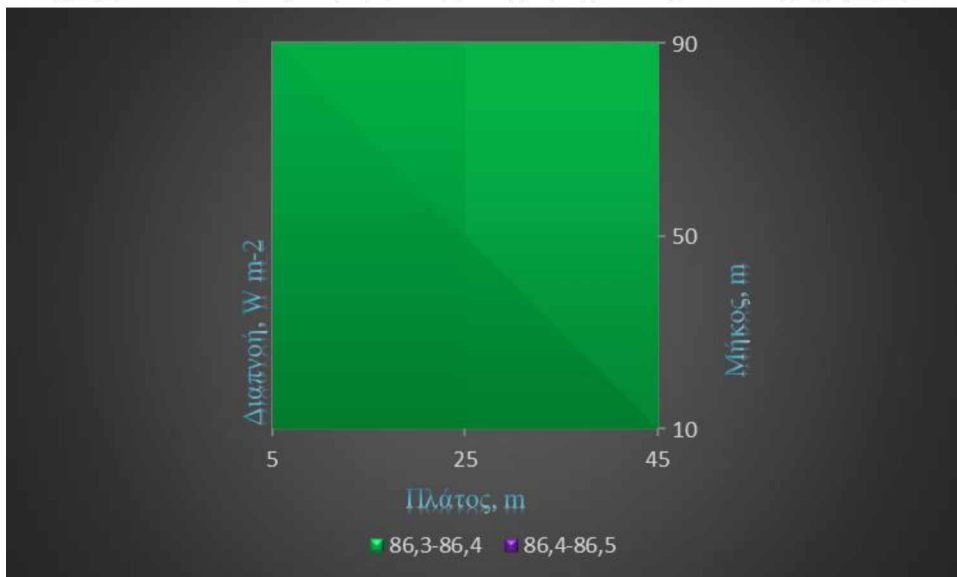
Sensors	Νύχτα		Χάραμα		Μέρα	
	Average	Std	Average	Std	Average	Std
Sensor 1	0,022	0,011	0,083	0,200	86,36	51,7
Sensor 2	0,013	0,010	0,063	0,188	86,36	51,7
Sensor 3	0,003	0,005	0,055	0,185	86,32	51,7
Sensor 4	0,007	0,007	0,058	0,186	86,34	51,7
Max diff.	0,019		0,020		0,020	
Avg. Std	0,008		0,012		0,019	
Avg. MRD	0.568		0.13		0,0001	



Διάγραμμα 13. Χωρική διαμόρφωση μέσης πραγματικής διαπνοής (νύχτα)



Διάγραμμα 14. Χωρική διαμόρφωση μέσης πραγματικής διαπνοής (χάραμα)



Διάγραμμα 15. Χωρική διαμόρφωση μέσης πραγματικής διαπνοής (μέρα)

Κεφάλαιο 4: Συζήτηση & Συμπεράσματα

Η παρούσα έρευνα είχε ως στόχο την εξεύρεση και παρουσίαση των μικροκλιματικών συνθηκών ενός εμπορικού θερμοκηπίου παραγωγής αγγουριού καθώς και της διαπνοής των φυτών με βάση τις συνθήκες αυτές. Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με το οποίο γινόντουσαν μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας καθώς και θερμοκρασίας φύλλου. Οι παραπάνω μετρήσεις αναλύθηκαν και αναπαραστάθηκαν γραφικά ώστε να δοθεί μια περισσότερο οπτικοποιημένη άποψη των συνθηκών που επικρατούν εντός του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με την ανάλυση των δεδομένων, η θερμοκρασία του αέρα και η θερμοκρασία φύλλου παρουσίασαν μεγαλύτερη ομοιογένεια κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ οι μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ των μέσων όρων εμφανίστηκαν την περίοδο του χαράματος με $3,8^{\circ}\text{C}$ και $3,7^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα. Αντιθέτως, η σχετική υγρασία παρουσίασε μεγαλύτερη ομοιογένεια κατά τη διάρκεια της νύχτας και μεγαλύτερη ανομοιογένεια τη μέρα, με μέγιστη διαφορά μεταξύ των μέσων όρων των μετρήσεων της τάξης του 22,9%.

Μικρή ανομοιογένεια παρατηρείτε μεταξύ της πλευράς που βρίσκετε κοντά στην υγρή παρειά και της απέναντι πλευράς που είναι κοντά στους ανεμιστήρες. Οι μετρήσεις στην πλευρά της υγρής παρειάς ήταν πιο ομοιόμορφες σε σχέση με αυτές της πλευράς απέναντι. Αυτό θεωρείτε κάπως αναμενόμενο καθώς η καλλιέργεια είναι φυτεμένη παράλληλα με τη υγρή παρειά οπότε είναι λογικό οι σειρές κοντά στην παρειά να επηρεάζονται περισσότερο.

Ακόμη, έγινε υπολογισμός της διαπνοής των φυτών, η γνώση της οποίας μας επιτρέπει τη δυνατότητα χορήγησης ακριβούς δόσης άρδευσης, θέμα μείζονος σημασίας για την επίτευξη αειφορικής χρήσης του νερού και εξοικονόμησης πόρων για τον παραγωγό. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έγιναν και τα δεδομένα που προέκυψαν, η διαπνοή των φυτών γίνεται σχεδόν εξολοκλήρου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό συμβαίνει λόγω της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την διαπνοή των φυτών και η οποία κατά τις περιόδους της νύχτας και του χαράματος είναι μηδενική ή σχεδόν μηδενική. Επιπροσθέτως, βάσει των αποτελεσμάτων, η χωρική κατανομή της διαπνοής παρουσιάζει πολύ μεγάλη ομοιογένεια πράγμα που πιθανός οφείλεται στη μεγάλη ομοιογένεια που παρουσιάζει η θερμοκρασία αλλά και η ηλιακή ακτινοβολία την περίοδο αυτή.

Ο υπολογισμός της διαπνοής έγινε δύο φορές. Την πρώτη φορά στον τύπο, έγινε χρήση της θερμοκρασίας του αέρα για τον υπολογισμό της ιδανικής διαπνοής, ενώ τη δεύτερη χρησιμοποιήθηκε η θερμοκρασία φύλλου για τον υπολογισμό της πραγματικής διαπνοής. Εκ του αποτελέσματος φάνηκε πώς οι διαφορές μεταξύ των δύο ήταν απειροελάχιστες γεγονός που αποδίδεται στη μεγάλη ομοιογένεια μεταξύ των μετρήσεων της θερμοκρασίας του αέρα και αυτών της θερμοκρασίας του φύλλου. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως δεν υπήρξαν και σημαντικά ποσοστά συμπύκνωσης στη επιφάνεια των φύλλων καθώς οι δύο θερμοκρασίες σχεδόν ταυτίζονταν.

Έχει βρεθεί ότι μη ομοιόμορφα περιβάλλοντα οδηγούν σε διαφορετικούς ρυθμούς ανάπτυξης των φυτών, προβλήματα με ασθένειες και απρόβλεπτες ορμονικές και διατροφικές διαταραχές, που επηρεάζουν τη διαχείριση του συστήματος παραγωγής των φυτών (Soni, Salokhe, and Tantau 2005). Επομένως, το κλίμα εντός του θερμοκηπίου μπορεί να χαρακτηριστεί ως κατάλληλο για την ανάπτυξη και ευημερία των φυτών, καθώς παρουσιάζει σημαντική ομοιογένεια ως προς τη θερμοκρασία κυρίως.

Συμπερασματικά, όλα τα παραπάνω δεδομένα μπορούν να αξιοποιηθούν για τη βελτίωση αρκετών στοιχείων εντός του θερμοκηπίου. Η επίγνωση των μικροκλιματικών συνθηκών εντός του θερμοκηπίου σε συνδυασμό με τη γνώση των ιδανικών για την ανάπτυξη του φυτού συνθηκών αλλά και με τη χρήση των ρυθμιστών κλίματος (συστήματα δροσισμού και θέρμανσης) μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ενός μοντέλου που να ελαχιστοποιεί τους αρνητικούς παράγοντες για το φυτό (ανάπτυξη ασθενειών) και να ευνοεί την παραγωγή ποιοτικότερων και ασφαλέστερων προϊόντων. Ακόμη, με τη χορήγηση ακριβούς δόσης άρδευσης επιτυγχάνουμε την παραγωγή τροφής με χρήση των ελάχιστων δυνατών πόρων και επομένως μια φιλικότερη προς το περιβάλλον και τον πλανήτη διαδικασία παραγωγής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aubinet, M., J. Deltour, D. de Halleux, and J. Nijskens. 1989. "Stomatal Regulation in Greenhouse Crops: Analysis and Simulation." *Agricultural and Forest Meteorology* 48(1-2): 21-44.
- Bakker, J.C. 1995. "Greenhouse Climate Control, Constraints and Limitations.Pdf."
- Ferentinos, Konstantinos P et al. 2016. "ScienceDirect Wireless Sensor Networks for Greenhouse Climate and Plant Condition Assessment." *Biosystems Engineering* 153: 70-81.
- Franklin, Thomas Bedford. 2013. *CLIMATES IN MINIATURE: A STUDY OF MICRO-CLIMATE AND ENVIRONMENT.*
- J.L. Monteith. 1990. "Principles of Environmental Physics."
- Katsoulas, Nikolaos, and Costas Kittas. 2011. "Γεωργία Και Κτηνοτροφία." *AGROTYPOS α.ε.*: 19-21.
- Kempkes, F L K, N J Van De Braak, and J C Bakker. 2000. "Effect of Heating System Position on Vertical Distribution of Crop Temperature and Transpiration in Greenhouse Tomatoes." (cx): 57-64.
- Kittas, C., and T. Bartzanas. 2007. "Greenhouse Microclimate and Dehumidification Effectiveness under Different Ventilator Configurations." *Building and Environment* 42(10): 3774-84.
- Lincoln, Taiz, and Zeiger Eduardo. 2015. *PLANT PHYSIOLOGY*. 5th ed. utopia.
- Medrano, Evangelina, Pilar Lorenzo, María Cruz Sánchez-Guerrero, and Juan Ignacio Montero. 2005. "Evaluation and Modelling of Greenhouse Cucumber-Crop Transpiration under High and Low Radiation Conditions." *Scientia Horticulturae* 105(2): 163-75.
- Ricardo, Carlos, Rodrigo Gil, and Alexander Cooman. 2008. "Original Papers Use of Geostatistical and Crop Growth Modelling to Assess the Variability of Greenhouse Tomato Yield Caused by Spatial Temperature Variations." 5: 219-27.
- Seginer, Ido. 1994. "Transpirational Cooling of a Greenhouse Crop with Partial Ground Cover." *Agricultural and Forest Meteorology* 71(3-4): 265-81.
- Semida, Wael M, Mohamed S Ammar, and Nevein A El Sawah. 2017. "Effects of Shade Level and Microenvironment on Vegetative Growth , Physiological and Biochemical Characteristics of Transplanted Cucumber (Cucumis Sativus)." 2(4): 361-68.
- Soni, Peeyush, V. M. Salokhe, and H. J. Tantau. 2005. "Effect of Screen Mesh Size on Vertical Temperature Distribution in Naturally Ventilated Tropical Greenhouses." *Biosystems Engineering* 92(4): 469-82.
- Tchamitchian, M. et al. 2006. "SERRISTE: A Daily Set Point Determination Software for Glasshouse Tomato Production." *Computers and Electronics in Agriculture* 50(1): 25-47.

- Ελληνική Στατιστική Αρχή. “Κηπευτική Γη. Εκτάσεις Γης Λαχανόκηπων Και Αγρών Που Φυτεύτηκαν Με Λαχανικά Και Λοιπές Κηπευτικές Καλλιέργειες, Κατά Περιφέρεια Και Περιφερειακή Ενότητα.” <http://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SPG06/2015> (September 10, 2018).
- Καραμπουρνιώτης, Γεώργιος, Αϊβαλάκης Γεώργιος, Λιακόπουλος Γεώργιος, and Κωνσταντίνος Φασσέας. 2014. *Λειτουργική Ανατομία Φυτών*. πρώτη έκδο. ed. Καραμπουρνιώτης Γεώργιος. ΕΜΒΡΥΟ.
- Μαυρογιαννόπουλος, Γεώργιος. 2005. *ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ. Δ ΕΚΔΟΣΗ. ΑΘ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ*.
- Jones, P.D.D. and Briffa, K.R.R. (1992). Global surface air temperature variations during the twentieth century: Part 1, spatial, temporal and seasonal details. *The Holocene*, 2: 165-179.
- Gieling Th H; Schurer K (1995). Sensors and measurement. In: Greenhouse Climate Control: An Integrated Approach (Bakker J C; Bot G P A; Challa H; Van de Braak N J eds), pp. 211}223. Wageningen Pers
- Marcelis L F M; De Koning A N M (1995). Biomass partitioning in plants. In: Greenhouse Climate Control: An Integrated Approach (Bakker J C; Bot G P A; Challa H; Van de Braak N J eds), pp. 84}92. Wageningen Pers.
- Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., García, M.L., Caparrós, I., Giménez, M., 2003. External greenhouse mobile shading: effect on microclimate, water use efficiency and yield of a tomato crop grown under different salinity levels of the nutrient solution. In: Pardossi, A., Serra, G., Tognoni, F. (Eds.), *Managing Greenhouse Crops in Saline Environment*. Acta Hort. 609, 181–186.