

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Σχολή Γεωπονικών Επιστημών

Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος

Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος

Πτυχιακή Διατριβή

**«Μελέτη της κατανομής του μικροκλίματος σε εμπορικό θερμοκήπιο με
καλλιέργεια αγγουριού»**



Επιβλέπων καθηγητής: Κατσούλας Νικόλαος

Γκασδρόγκας Αντώνιος

Βόλος, 2020

Μελέτη της κατανομής του μικροκλίματος σε εμπορικό θερμοκήπιο με καλλιέργεια
αγγουριού

Γκασδρόγκας Αντώνιος

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Ν. Κατσούλας, Αν. Καθηγητής, Γεωργικές Κατασκευές με έμφαση στα θερμοκήπια, Π.Θ.

Σ. Πετρόπουλος, Επ. Καθηγητής, Λαχανοκομία, Π.Θ.

Ε. Κίττα, ΕΔΠ, Π.Θ.

Ευχαριστίες

Για την πραγματοποίηση του πειράματος και την εκπόνηση της παρούσας ερευνητικής εργασίας, αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος και Διευθυντή του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών κ. Νικόλαο Κατσούλα του οποίου η βοήθεια ήταν πολύτιμη.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον ιδιοκτήτη των θερμοκηπίων ΚΑΛΛΙΑΤΖΗΣ Α.Ε. κ. Ιωάννη Καλλιατζή για την άριστη συνεργασία και βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Αντώνιο Τζούνη για την βοήθεια και το ευχάριστο κλίμα που δημιούργησε από την αρχή της διεξαγωγής του πειράματος.

Περίληψη

Η καλλιέργεια κηπευτικών σε σύγχρονα υδροπονικά θερμοκήπια είναι πλέον ευρύτατα διαδεδομένη και στη χώρα μας. Ένα σημαντικό κεφάλαιο για την λειτουργία των θερμοκηπίων είναι ο έλεγχος του κλίματος στο εσωτερικό τους. Μέχρι σήμερα ο έλεγχος του μικροκλίματος γίνεται κυρίως λαμβάνοντας κλιματικά δεδομένα από ένα σημείο, συνήθως στο κέντρο του θερμοκηπίου, θεωρώντας ότι οι συνθήκες είναι ομοιόμορφες στο σύνολο του θερμοκηπίου.

Στην παρούσα εργασία έγινε παρακολούθηση και καταγραφή των κλιματικών συνθηκών σε διάφορα σημεία ενός εμπορικού θερμοκηπίου παραγωγής αγγουριού ώστε να μελετηθεί η κλιματική ομοιομορφία στο εσωτερικό του. Το πειραματικό μέρος της εργασίας πραγματοποιήθηκε τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο και χρησιμοποιήθηκαν εννιά ασύρματοι αισθητήρες οι οποίοι κατέγραφαν την σχετική υγρασία και τη θερμοκρασία.

Αρχικά, έγινε βιβλιογραφική ανασκόπηση για την παροχή των απαραίτητων πληροφοριών για την κατανόηση της εργασίας. Έπειτα, στο δεύτερο κεφάλαιο έγινε ανάλυση των υλικών και των πρακτικών που χρησιμοποιήθηκαν. Στο τρίτο κεφάλαιο έγινε επεξεργασία των δεδομένων και υπολογίστηκε το έλλειμα κορεσμού του αέρα (VPD) με βάση την υγρασία και τη θερμοκρασία και έγιναν τα απαραίτητα διαγράμματα για την κατανόηση των αποτελεσμάτων.

Ως αποτέλεσμα προέκυψε ότι υπάρχει μεγάλη ανομοιομορφία κλίματος στο εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου. Οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις κλιματικών συνθηκών καταγράφονται κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος δροσισμού, ενώ μειώνονται όταν είναι σε λειτουργία το σύστημα θέρμανσης.

Τέλος, έγινε μια ανασκόπηση του πειράματος, εξήχθησαν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα και συζητήθηκε πώς αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν για την ανάπτυξη και τη βελτίωση των σύγχρονων θερμοκηπίων.

Summary

The cultivation of vegetables in modern hydroponic greenhouses is now widespread in our country as well. Climate control is one of the key factors for the proper functioning of a hydroponic greenhouse. Until recently, microclimate control was based on the collection of climatic data, usually from the center of the greenhouse, assuming climate conditions to be uniform throughout the greenhouse.

In the present work, climatic conditions were monitored and recorded at various locations of a commercial cucumber hydroponic greenhouse in order to study the climatic uniformity. The experimental part of this study was carried out in August, September and October. Nine wireless sensors were used to record relative humidity and temperature.

A literature review was initially carried out to provide all necessary information. Subsequently, all recorded data were analyzed. In the third part of this survey, humidity and temperature data were used to calculate vapor pressure deficit (VPD).

According to the results, there is a great climate disparity in the greenhouse environment. The highest variations in climatic conditions were recorded during the operation of the cooling system, while they are decreasing during the operation of the heating system.

Finally, the present research was focused on how this system can be used to develop and improve modern greenhouses.

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή.....	10
1.1.	Γενικά.....	10
1.1.1.	Ιστορική εξέλιξη θερμοκηπίου.....	10
1.1.2.	Θερμοκήπια ανά τον Κόσμο	11
1.1.3.	Θερμοκήπια στην Ελλάδα.....	12
1.1.4.	Υδροπονία	13
1.1.5.	Θερμοκήπιο και Φυτό	14
1.2.	Ηλιακή Ακτινοβολία και Φωτισμός.....	15
1.3.	Η θερμοκρασία.....	16
1.4.	Η Υγρασία.....	18
1.5.	Vapor Pressure Deficit	20
1.6.	Κατανομή Μικροκλίματος στο Θερμοκήπιο.....	22
1.6.1.	Ποικιλομορφία Θερμοκρασίας, Υγρασίας και VPD στο Εσωτερικό Θερμοκηπίου.....	22
1.6.2.	Διαφοροποίηση Εξατμισοδιαπνοής.....	25
1.7.	Έλεγχος Κλίματος Θερμοκηπίου	26
1.7.1.	Συστήματα Θέρμανσης	27
1.7.2.	Συστήματα Δροσισμού.....	28
1.7.3.	Υλικά Κάλυψης Θερμοκηπίων.....	29
1.8.	Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων στη Γεωργία Ακριβείας	29
1.9.	Έξυπνη Γεωργία – Γεωργία Ακριβείας.....	30
1.10.	Σκοπός της Εργασίας	31
2.	Υλικά και μέθοδοι.....	32
2.1.	Το θερμοκήπιο	32
2.1.1.	Αερισμός	33
2.1.2.	Θέρμανση.....	34
2.1.3.	Καλλιέργεια.....	34
2.2.	Το Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων	34
2.3.	Το πείραμα	37
2.4.	Υπολογισμοί.....	39
3.	Αποτελέσματα.....	40
3.1.	Διακύμανση Θερμοκρασίας	40
3.1.1.	Κατανομή Θερμοκρασίας Μέρα, Νύχτα, Χάραμα.....	40
3.1.2.	Κατανομή θερμοκρασίας με σύστημα ψύξης και θέρμανσης.....	42

3.1.3.	Κατανομή θερμοκρασίας με σύστημα θέρμανσης.....	44
3.2.	Διακύμανση Σχετικής Υγρασίας.....	45
3.2.1.	Κατανομή Σχετικής Υγρασίας Μέρα, Νύχτα, Χάραμα.....	46
3.2.2.	Κατανομή Σχετικής Υγρασίας με Σύστημα Δροσισμού.....	48
3.2.3.	Κατανομή Σχετικής Υγρασίας με Σύστημα Θέρμανσης.....	49
3.3.	Διακύμανση Vapor Pressure Deficit.....	51
3.3.1.	Διακύμανση Vapor Pressure Deficit Μέρα, Νύχτα, Χάραμα.....	51
3.3.2.	Κατανομή VPD με Σύστημα Δροσισμού.....	53
3.3.3.	Κατανομή VPD με Σύστημα Θέρμανσης.....	54
4.	Συμπεράσματα και Συζήτηση.....	56
5.	Βιβλιογραφία.....	58

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1.	Ποσοστά κάλυψης θερμοκηπίων σε χώρες και Ηπείρους (Κατσούλας & Κίττας, 2013).....	12
Εικόνα 2.	Έκταση θερμοκηπιακών καλλιιεργειών και κατανομή στην Ελλάδα (Κατσούλας & Κίττας, 2013).	13
Εικόνα 3.	Ωριαίες μεταβολές ακτινοβολίες, θέρμανσης εδάφους και φύλλου στις 3 Ιουλίου (Takakura et al., 2009).	16
Εικόνα 4.	Μετρήσεις θερμοκρασίας από την πόλη Serdang της Μαλαισίας 31 Οκτωβρίου 2004 (Teh, 2006)	17
Εικόνα 5.	Επίδραση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στη διαπνοή, (•) με σύστημα δροσισμού,(ο) χωρίς σύστημα δροσισμού (Κατσούλας, 2002)	19
Εικόνα 6.	Διακύμανση VPD σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία (Shamshiri et al., 2018)	22
Εικόνα 7.	Χωρική αναπαράσταση της μέσης θερμοκρασίας σε θερμοκήπιο. (a) καλοκαίρι-ημέρα (b) καλοκαίρι-νύχτα (c) χειμώνας-ημέρα (d) χειμώνας-νύχτα (Ferentinos et al., 2016).	23
Εικόνα 8.	Χωρική αναπαράσταση της μέσης σχετικής υγρασίας σε θερμοκήπιο. (a) καλοκαίρι-ημέρα (b) καλοκαίρι-νύχτα (c) χειμώνας-ημέρα (d) χειμώνας-νύχτα (Ferentinos et al., 2016).	24
Εικόνα 9.	Διακύμανση θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του θερμοκηπίου (1. Εξωτερική θερμοκρασία, 2. Θερμοκρασία κοντά στους ανεμιστήρες, 3.Θερμοκρασία στο κέντρο του θερμοκηπίου, 4. Θερμοκρασία κοντά στην υγρή παρειά) (Kittas et al., 2003).....	24

Εικόνα 10. Ημερήσια διακύμανση VPD σε διαφορετικά σημεία στο θερμοκήπιο (1. VPD κοντά στους ανεμιστήρες, 2. VPD στο κέντρο του θερμοκηπίου, 3. VPD κοντά στην υγρή παρειά) (Kittas et al., 2003).	25
Εικόνα 11. Χωρική αναπαράσταση της μέσης εξατμισοδιαπνοής a) τη μέρα b) τη νύχτα c) μέσος όρος κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (Ferentinos et al., 2016).....	26
Εικόνα 12. Σύστημα δροσισμού με χρήση υγρής παρειάς (αριστερά), σύστημα δυναμικού αερισμού (δεξιά) (Πηγή: Ιστότοπος 3).	28
Εικόνα 13. Λήψη από δορυφόρο (google earth).	32
Εικόνα 14. Παράθυρα οροφής (αριστερά) και σύστημα υγρής παρειάς (δεξιά) στη δυτική πλευρά.	33
Εικόνα 15. Ανεμιστήρες δυναμικού αερισμού (ανατολική πλευρά θερμοκηπίου) και ανεμιστήρες ανάμειξης του αέρα.	33
Εικόνα 16. Το ασύρματο υποσύστημα XBee 868LP	35
Εικόνα 17. Ο αισθητήρας Sensirion SHT75.	36
Εικόνα 18. Οι θέσεις των αισθητήρων στο θερμοκήπιο.....	37
Εικόνα 19. Τρόπος τοποθέτησης αισθητήρων.....	38

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1. Μέγιστες και ελάχιστες, ιδανικές και βλαβερές για το φυτό τιμές υγρασίας, θερμοκρασίας και VPD σε φυτά τομάτας (Shamshiri et al., 2018).....	21
Πίνακας 2. Ποικιλομορφία τιμών VPD με διαφορετικές τιμές υγρασίας και θερμοκρασίας (Shamshiri et al, 2018)	21
Πίνακας 3. Τεχνικά χαρακτηριστικά ασύρματων κόμβων.	35
Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά ασύρματου αισθητήρα Sensirion SHT75.	36
Πίνακας 5. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) θερμοκρασιών (°C) για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους χαράματος, μέρας και νύχτας. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσω των όρων, οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων και η μέση σχετική απόκλιση (MRD) των μέσων όρων.	40
Πίνακας 6. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) θερμοκρασιών (°C) για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους λειτουργίας και μη λειτουργίας του συστήματος δροσισμού. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσω των όρων και οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων.	43

Πίνακας 7. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) θερμοκρασιών (°C) για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους λειτουργίας και μη λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσων όρων και οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων.	45
Πίνακας 8. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) της σχετικής υγρασίας (%) για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους χαράματος, μέρας και νύχτας. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσων όρων και οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων.	46
Πίνακας 9. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) της σχετικής υγρασίας (%) για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους λειτουργίας και μη λειτουργίας του συστήματος ψύξης. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσων όρων και οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων.	49
Πίνακας 10. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) της σχετικής υγρασίας (%) για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους λειτουργίας και μη λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσων όρων και οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων.	50
Πίνακας 11. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) VPD (kPa) για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους χαράματος, μέρας και νύχτας. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσων όρων και οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων.	51
Πίνακας 12. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) VPD (kPa) για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους λειτουργίας και μη λειτουργίας του συστήματος ψύξης. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσων όρων και οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων.	53
Πίνακας 13. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) VPD (kPa) για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους λειτουργίας και μη λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσων όρων και οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων.	55

Περιεχόμενα διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας τη μέρα.	41
Διάγραμμα 2. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας τη νύχτα.	41
Διάγραμμα 3. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας το χάραμα.	42
Διάγραμμα 4. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας τις ώρες λειτουργίας του συστήματος της υγρής παρειάς (αριστερά) και τις ώρες της ημέρας που δεν λειτουργεί το σύστημα δροσισμού (δεξιά).	43

Διάγραμμα 5. Θερμοκρασία αέρα (°C) ανάλογα με τη θέση μέσα στο θερμοκήπιο σε συνάρτηση με τη λειτουργία του συστήματος δροσισμού.....	44
Διάγραμμα 6. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας τις ώρες λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης (αριστερά) και τις νυχτερινές ώρες που δεν είναι σε λειτουργία η θέρμανση.....	45
Διάγραμμα 7. Χωρική διαμόρφωση μέσης σχετικής υγρασίας τη μέρα.....	47
Διάγραμμα 8. Χωρική διαμόρφωση μέσης σχετικής υγρασίας τη νύχτα.....	47
Διάγραμμα 9. Χωρική διαμόρφωση μέσης σχετικής υγρασίας το χάραμα.....	48
Διάγραμμα 10. Χωρική κατανομή μέσης σχετικής υγρασίας τις ώρες λειτουργίας του συστήματος δροσισμού (αριστερά) και τις ώρες της μέρας που δεν λειτουργεί (δεξιά)	49
Διάγραμμα 11. Χωρική κατανομή μέσης σχετικής υγρασίας τις ώρες λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης (αριστερά) και τις νυχτερινές ώρες που δεν λειτουργούσε (δεξιά) ...	50
Διάγραμμα 12. Χωρική κατανομή μέσης τιμής VPD κατά τη διάρκεια της μέρας.....	52
Διάγραμμα 13. Χωρική κατανομή μέσης τιμής VPD κατά τη διάρκεια της νύχτας.....	52
Διάγραμμα 14. Χωρική κατανομή μέσης τιμής VPD κατά τη διάρκεια του χαράματος.....	53
Διάγραμμα 15. Χωρική διαμόρφωση μέσης τιμής VPD κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος δροσισμού (αριστερά) και κατά τη διάρκεια της μέρας χωρίς τη λειτουργία του συστήματος (δεξιά).....	54
Διάγραμμα 16. Χωρική διαμόρφωση μέσης τιμής VPD κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης (αριστερά) και κατά τη διάρκεια της νύχτας χωρίς τη λειτουργία του συστήματος (δεξιά).....	55

1. Εισαγωγή

1.1. Γενικά

Το θερμοκήπιο είναι μια κατασκευή, η οποία καλύπτεται με διαφανές υλικό, ώστε να είναι δυνατή η είσοδος όσο γίνεται περισσότερου φυσικού φωτισμού που είναι απαραίτητος για την ανάπτυξη των φυτών.

Αρκετά θερμοκήπια είναι εξοπλισμένα με σύστημα θέρμανσης, ενώ γενικά επιδιώκεται η χρήση συστημάτων που μπορούν να ρυθμίζουν με αρκετή ακρίβεια την θερμοκρασία, την ακτινοβολία, την υγρασία, το διοξείδιο του άνθρακα καθώς ακόμη και σημαντικούς παράγοντες του περιβάλλοντος της ρίζας των φυτών. Έτσι ένα σύγχρονο θερμοκήπιο μπορεί να προσφέρει πολύ σημαντικά οφέλη όπως:

- Την αποφυγή ζημιών στα φυτά από κακές καιρικές-περιβαλλοντικές συνθήκες (βροχή, αέρα, χαλάζι).
- Ακριβή χρονικό προγραμματισμό της παραγωγής ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες.
- Σημαντική αύξηση της παραγωγής.
- Βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων λόγω των καλύτερων συνθηκών.
- Προστασία που προσφέρει το θερμοκήπιο (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

Η ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού απαιτεί συνεχή αύξηση της παραγόμενης τροφής, ενώ η κλιματική αλλαγή προκαλεί ακόμα μεγαλύτερο πρόβλημα, καθώς όλο και περισσότερες εκτάσεις που ήταν καλλιεργήσιμες μετατρέπονται σε άγονη γη. Ακόμη, η αστικοποίηση του πληθυσμού δημιουργεί ανάγκες για μεγάλη παραγωγή κοντά στα μεγάλα αστικά κέντρα για άμεση κατανάλωση και χαμηλότερο κόστος. Έτσι τα θερμοκήπια με τα παραπάνω οφέλη αποτελούν μια σπουδαία λύση σε αυτά τα προβλήματα και κρίνεται απαραίτητη η κατασκευή περισσότερων θερμοκηπιακών μονάδων (Κατσούλας & Κίττας, 2011).

1.1.1. Ιστορική εξέλιξη θερμοκηπίου

Οι πρώτες αναφορές ύπαρξης θερμοκηπίων έρχονται από αρχαίους Έλληνες συγγραφείς του 5^{ου} αιώνα π.Χ.. Ο Πλάτωνας αναφέρεται σε φυτά που αναπτύσσονταν με ταχύτατο ρυθμό

σε ειδικούς χώρους οι οποίοι είναι γνωστοί ως «Κήποι του Άδωνη» και ο Θεόφραστος σε καλλιέργεια φυτών εκτός εποχής που βρισκόταν σε καρότσι ώστε να μεταφέρεται για προστασία από το κρύο.

Στην αρχαία Κίνα φαίνεται πως υπήρχε το πρώτο σύστημα θέρμανσης. Στη νότια πλευρά του τοίχου τοποθετούσαν καλάμια καλυμμένα με λαδόχαρτο υπό γωνία 30-40° και ανάμεσα στον τοίχο και το λαδόχαρτο υπήρχε η καλλιέργεια που ευνοούταν από τη θερμότητα του τοίχου. Ακόμη ένα σύστημα θέρμανσης υπήρχε στην Πομπηία όπου βρέθηκαν κατασκευές από πρωτόγονο γυαλί. Εκεί τα φυτά τοποθετούνταν σε δοχεία πάνω σε διατρητή επιφάνεια κάτω από την οποία μπορούσαν να τοποθετηθούν αναμμένα κάρβουνα για να θερμάνουν τα δοχεία.

Κατά το μεσαίωνα το θερμοκήπιο ήταν κάτι άγνωστο, μέχρι να ξαναεμφανιστεί το 17^ο αιώνα μ.Χ. και να παρουσιάσει μια συνεχή εξέλιξη μέχρι και σήμερα. Το 18^ο αιώνα αναγνωρίστηκε η σημασία του φωτισμού για την ανάπτυξη των φυτών και άρχισε να λαμβάνεται υπόψη στον κατασκευαστικό σχεδιασμό των θερμοκηπίων. Το 1790 η θέρμανση άρχισε να γίνεται με ατμό και έδωσε τη δυνατότητα επίτευξης υψηλότερης απόδοσης και ευκολίας αντικαθιστώντας τη θέρμανση με θερμάστρες που γινόταν μέχρι τότε. Το 19^ο μ.Χ. αιώνα υπήρχαν σπουδαίες εξελίξεις κυρίως στην θέρμανση και τον τρόπο κατασκευής των θερμοκηπίων, ενώ τον 20^ο αιώνα η εξέλιξη υπήρχε κυρίως στα υλικά κατασκευής. Τέλος, ακόμα και σήμερα η κατασκευή και το σύστημα λειτουργίας των θερμοκηπίων βρίσκονται σε συνεχή εξέλιξη κυρίως γύρω από την ρύθμιση και έλεγχο του περιβάλλοντος και τη χρήση βελτιωμένων ποικιλιών και υβριδίων (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

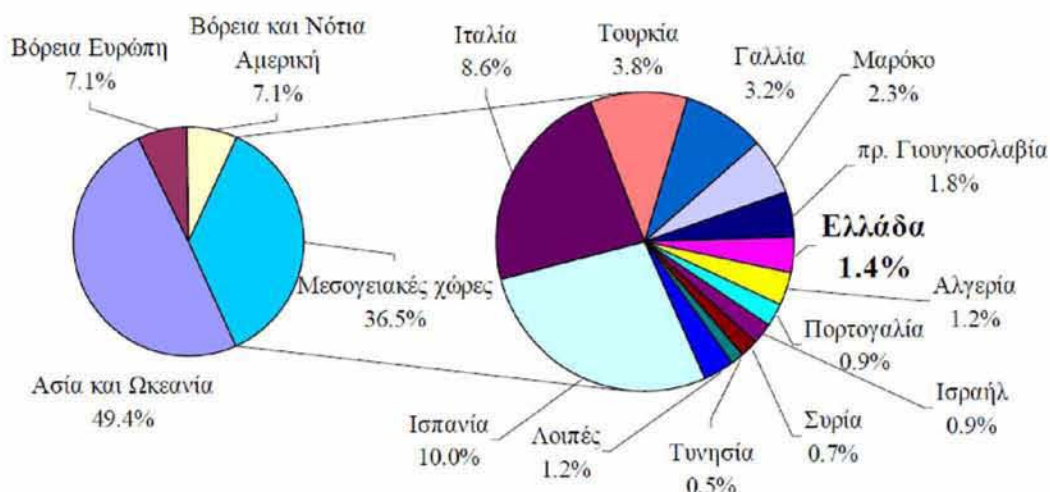
1.1.2. Θερμοκήπια ανά τον Κόσμο

Η έκταση των θερμοκηπίων τις τελευταίες δεκαετίες αυξάνεται ραγδαία. Χαρακτηριστικό είναι ότι η έκταση των λαχανοκομικών θερμοκηπίων ανά τον κόσμο, το 1980 ήταν 371.000 στρέμματα, το 1995 περίπου 1.200.000 στρέμματα, ενώ το 2019 1.228.000 στρέμματα (Εικόνα 1). Αξίζει να σημειωθεί ότι από το 2018 η έννοια του θερμοκηπίου δεν περιλαμβάνει μικρές κατασκευές κάλυψης των καλλιεργειών. Η συνολική έκταση των καλλιεργειών υπό κάλυψη το 2019 είναι περίπου 13.912.000 στρέμματα (Πηγή: Ιστότοπος 1). Σύμφωνα με μετρήσεις του 2017, η Ευρώπη έχει περίπου 428.880 στρέμματα, η Ασία 555.923, η Αμερική 48.800, η Αφρική 91.400 και μικρές εκτάσεις βρίσκονται στην Ωκεανία (Πηγή: Ιστότοπος 2).

Ο τύπος θερμοκηπίων που χρησιμοποιείται εξαρτάται άμεσα από τις κλιματικές συνθήκες. Αυτό αποτυπώνεται από το γεγονός ότι η Ολλανδία έχει τις περισσότερες εκτάσεις υαλόφρακτων θερμοκηπίων καταλαμβάνοντας το 33% του συνόλου, ενώ η Ισπανία έχει τις

περισσότερες εκτάσεις θερμοκηπίων καλυμμένων με πλαστικό σε ποσοστό 59% του συνόλου.

Τέλος, σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι υπάρχουν τεράστιες εκτάσεις θερμοκηπίων σε χώρες της Ασίας, όπως η Κίνα όπου εκτιμάται ότι η έκταση των θερμοκηπίων είναι περίπου 12.500.000 στρέμματα. Ωστόσο, οι πληροφορίες για αυτά είναι λίγες και συγκεχυμένες και πολλές φορές δεν υπολογίζονται (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).



Εικόνα 1. Ποσοστά κάλυψης θερμοκηπίων σε χώρες και Ηπείρους (Κατσούλας & Κίττας, 2013)

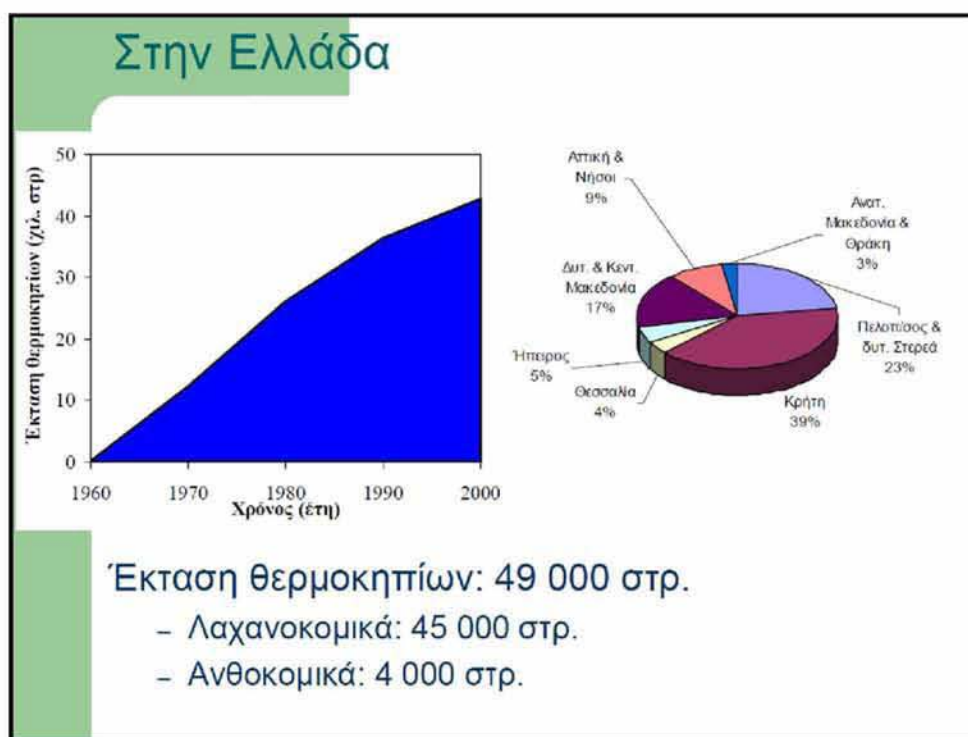
1.1.3. Θερμοκήπια στην Ελλάδα

Τα θερμοκήπια στην Ελλάδα άρχισαν να κατασκευάζονται σταδιακά από το 1955. Σπουδαίο ρόλο στην εξάπλωση τους είχε η χρήση πλαστικού φύλλου πολυαιθυλενίου ως υλικό κάλυψης που επέτρεπε στους καλλιεργητές να κατασκευάσουν μόνοι τους θερμοκήπια με αρκετά χαμηλό κόστος και να αυξήσουν την πρώιμη παραγωγή κηπευτικών (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει σημαντική αύξηση των θερμοκηπιακών εκτάσεων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η αύξηση της έκτασης των θερμοκηπίων όπου το 2012 ήταν 52.932 στρέμματα, ενώ μέσα σε μόλις τρία χρόνια αυξήθηκαν στα 59.736 στρέμματα. Ακόμη έχουν παρουσιαστεί μεγάλες ανακατατάξεις των εκτάσεων με σημαντική μείωση στην Κεντρική και Βόρεια Ελλάδα και αύξηση έως και 50% στην Αττική, την Πελοπόννησο, τα νησιά του Αιγαίου και την Κρήτη (Κρατερός, 2018). Έτσι, οι μεγαλύτερες εκτάσεις

θερμοκηπίων συγκεντρώνονται κυρίως στη Νότια Ελλάδα (Πελοπόννησο, νησιά Νοτίου Αιγαίου και Κρήτη) σε ποσοστό που φτάνει το 65% των θερμοκηπίων της χώρας όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2. Σε αυτές τις περιοχές οι αρκετά υψηλές για την εποχή θερμοκρασίες το χειμώνα αλλά και η υψηλή ηλιακή ακτινοβολία επιτρέπουν την παραγωγή προϊόντων σε μη θερμαινόμενα θερμοκήπια. Η παραγωγική περίοδος αρχίζει το Νοέμβριο μέχρι συνήθως τον Ιούνιο, ενώ τους θερινούς μήνες είναι απαραίτητο ένα καλό σύστημα εξαερισμού ή δροσισμού του θερμοκηπίου (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

Οι θερμοκηπιακές εκτάσεις της Κρήτης καταλαμβάνουν το 40% των συνολικών εκτάσεων της χώρας. Η καλλιέργεια τομάτας κατέχει το 50% των θερμοκηπιακών εκτάσεων της Κρήτης, το 25% η καλλιέργεια αγγουριού και μικρότερα ποσοστά οι καλλιέργειες μελιτζάνας και πιπεριάς (Δασκαλάκης κ.ά., 2013).



Εικόνα 2. Έκταση θερμοκηπιακών καλλιεργειών και κατανομή στην Ελλάδα (Κατσούλας & Κίττας, 2013).

1.1.4. Υδροπονία

Υδροπονία ή καλλιέργεια φυτών εκτός εδάφους ονομάζεται η μέθοδος καλλιέργειας φυτών των οποίων το ριζικό σύστημα δεν έχει σχέση με το φυσικό έδαφος ή χημικά μείγματα εδάφους. Η τροφοδότηση των φυτών με νερό και θρεπτικά στοιχεία γίνεται αποκλειστικά με το θρεπτικό διάλυμα που είναι ένα αραιό υδατικό διάλυμα όλων των θρεπτικών που είναι

απαραίτητα για τα φυτά, τα οποία βρίσκονται διαλυμένα στο νερό, είτε ως ιόντα ανόργανων αλάτων, είτε ως ευδιάλυτες ανόργανες χημικές ενώσεις, είτε ως ευδιάλυτες οργανικές χημικές ενώσεις. Οι ρίζες αναπτύσσονται απευθείας στο θρεπτικό διάλυμα ή σε πορώδη υλικά που ονομάζονται υποστρώματα. Υπόστρωμα θεωρείται κάθε πορώδες υλικό εκτός του φυσικού χώματος που έχει την ικανότητα να συγκρατεί νερό και αέρα στις κατάλληλες αναλογίες για την ανάπτυξη φυτών (Σάββας, 2011). Αντικαθιστά το έδαφος ως προς την παροχή νερού, θρεπτικών και οξυγόνου στη ρίζα αλλά συμβάλλει και στη στήριξη των φυτών (Κατσούλας & Κίττας, 2011).

Τα υδροπονικά συστήματα μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, τα ανοιχτά και τα κλειστά συστήματα. Στα ανοιχτά συστήματα, το ριζικό σύστημα των φυτών τροφοδοτείται μέσω του θρεπτικού διαλύματος και η περίσσεια νερού και θρεπτικών που απορρέει αποβάλλεται στο περιβάλλον. Αντίθετα, στα κλειστά συστήματα οι απορροές του νερού και των θρεπτικών συστατικών συλλέγονται, ελέγχονται και επαναχρησιμοποιούνται. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται εξοικονόμηση σε νερό και θρεπτικά. Αυτό το σύστημα όμως απαιτεί μεγαλύτερες ποσότητες θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας, τακτικούς ελέγχους της περιεκτικότητας των θρεπτικών αλλά και αντικατάσταση του διαλύματος μετά από κάποιο χρονικό διάστημα καθώς υπάρχει μεγάλος κίνδυνος συσσώρευσης αλάτων και εξάπλωσης ασθενειών (Gert, 2017).

1.1.5. Θερμοκήπιο και Φυτό

Η ανάπτυξη ενός φυτού εξαρτάται πρώτα απ' όλα από το είδος και την ποικιλία. Όμως, εξαρτάται άμεσα και από το περιβάλλον μέσα στο οποίο θα αναπτυχθεί. Οι παράγοντες του περιβάλλοντος χωρίζονται σε:

- Αυτούς που επιτελούνται στο υπέργειο μέρος του φυτού, όπως είναι η ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η υγρασία, το διοξείδιο του άνθρακα.
- Αυτούς που επιτελούνται στο υπόγειο τμήμα του φυτού, όπως η θερμοκρασία, το νερό, το οξυγόνο, τα ανόργανα θρεπτικά στοιχεία και το pH. (Μαυρογιαννόπουλος, 2001)

Το μικροκλίμα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου εξαρτάται από παράγοντες όπως οι ιδιότητες των υλικών κάλυψης και οι εξωτερικές συνθήκες. Στα σύγχρονα θερμοκήπια επηρεάζεται κυρίως από τις τεχνητές επεμβάσεις ελέγχου του κλίματος όπως είναι τα ανοίγματα αερισμού, η θέρμανση και άλλα (Papadakis et al., 2000).

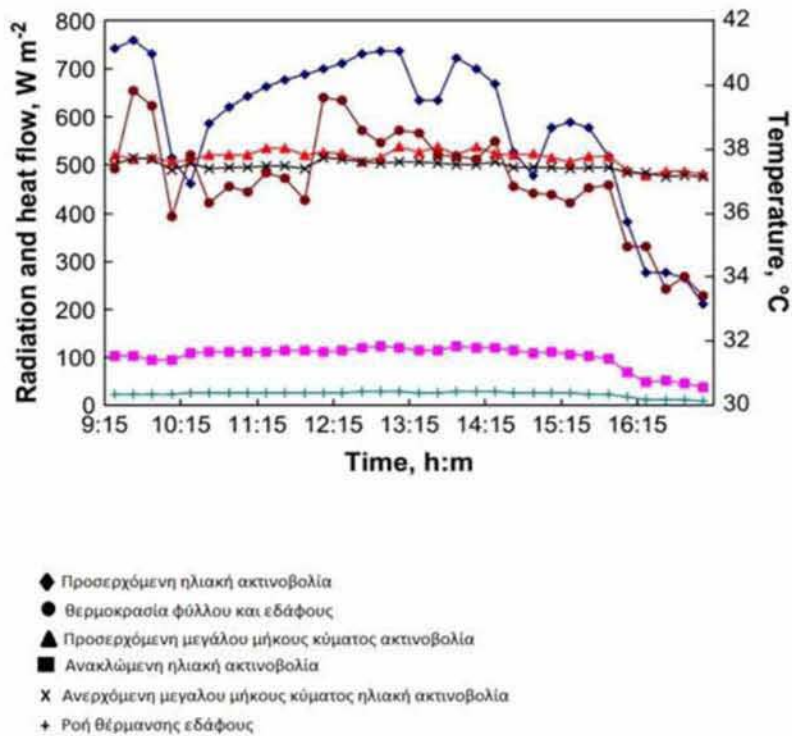
1.2. Ηλιακή Ακτινοβολία και Φωτισμός

Η ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη ζωή στον πλανήτη μας. Επηρεάζει άμεσα τη φωτοσύνθεση που αποτελεί τη μοναδική βιολογική διεργασία που μπορεί να αντλήσει αυτή την ενέργεια, ενώ έχει σημαντικό ρόλο και στη φωτομορφογένεση (Τσέκος, 2003). Φωτομορφογένεση ονομάζεται κάθε επίδραση του φωτός στη φυσιολογία του φυτού και τελικά στην αύξηση και την ανάπτυξη των κυττάρων μέχρι την ολοκλήρωση του φυτού (Λόλας, 2000).

Από τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης μόνο το 5% μπορεί να απορροφηθεί και μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης να μετατραπεί σε υδατάνθρακες και τροφή για το φυτό. Αυτό συμβαίνει επειδή ένα μεγάλο φάσμα φωτός έχει μήκη κύματος είτε πολύ βραχέα ή πολύ μακρά (Τσέκος, 2003). Ενδιαφέρον για τα φυτά παρουσιάζουν τα μήκη κύματος από 300nm έως τα 1000nm, διότι κάτω από τα 300nm φέρουν μεγάλη ενέργεια που μπορεί να προκαλέσει σπάσιμο των χημικών δεσμών, ενώ πάνω από τα 1000nm φέρουν πολύ χαμηλή ενέργεια ώστε να επιδράσουν φωτοχημικά (Hart, 1988). Ένα μεγάλο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε θερμότητα και ένα μικρότερο σε φθορισμό (Τσέκος, 2003). Ως αποτέλεσμα, αρκετές είναι οι περιπτώσεις που τα φυτά απαιτούν μεγαλύτερες ποσότητες φωτισμού κυρίως το χειμώνα και καλό είναι να γίνουν κάποιες επεμβάσεις, όπως μείωση των εμποδίων στην είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο και αν είναι δυνατό τεχνητός φωτισμός (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

Σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε από τον McCall (1992), παρατηρήθηκε ότι ο φωτισμός επιδρά στο ύψος των φυτών, στη φυλλική επιφάνεια και στο ξηρό βάρος, χωρίς όμως να επιδρά στον αριθμό των φύλλων πριν την πρώτη ταξιανθία. Μια πιο πρόσφατη μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τον Uzun (2006) ο οποίος ήθελε να συσχετίσει το φωτισμό με τη θερμοκρασία, απέδειξε ότι υψηλές εντάσεις φωτισμού επηρεάζουν περισσότερο τον αριθμό των φύλλων πριν την πρώτη ταξιανθία, ενώ σε συνθήκες χαμηλής έντασης φωτισμού η θερμοκρασία έπαιζε πιο σημαντικό ρόλο (Uzun, 2006).

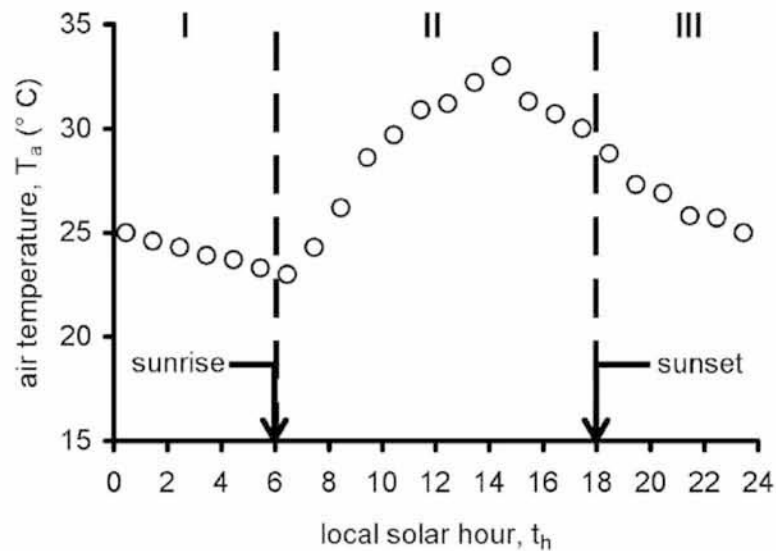
Τέλος, η ηλιακή ακτινοβολία που αποτελεί την κύρια πηγή ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας, επηρεάζει σημαντικά εκτός από τη φωτοσύνθεση των φυτών και τη θέρμανση του χώρου αφού αποτελεί τη φυσική πηγή θερμότητας στο θερμοκήπιο (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).



Εικόνα 3. Ωριαίες μεταβολές ακτινοβολίες, θέρμανσης εδάφους και φύλλου στις 3 Ιουλίου (Takakura et al., 2009).

1.3. Η θερμοκρασία

Η μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα συνήθως λαμβάνει χώρα ένα με δύο μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ χαρακτηριστικό είναι ότι υπάρχει διαφορά με τη θερμοκρασία εδάφους. Συνήθως, η μεγαλύτερη τιμή της καταγράφεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και αυτό διότι είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ηλιακή ακτινοβολία. Τη νύχτα που δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία, το έδαφος χάνει την ενέργεια που είχε συσσωρεύσει κατά τη διάρκεια της μέρας και ψύχεται. Η ψύξη αυτή διαρκεί καθ' όλη τη διάρκεια της νύχτας όμως δεν σταματά με το ξημέρωμα, συνεχίζει για δύο ώρες περίπου μετά την ανατολή του ήλιου, μέχρι η ηλιακή ακτινοβολία να γίνει ισχυρή και να υπερκαλύψει τις απώλειες ενέργειας, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4 (Teh, 2006). Σαν αποτέλεσμα, σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά των θερμοκηπίων δημιουργείται το φαινόμενο των υψηλών θερμοκρασιών κατά τις ηλιόλουστες μέρες και ιδιαίτερα χαμηλών κατά τις ψυχρές νύχτες. Συγκεκριμένα στη χώρα μας, οι συνθήκες για καλλιέργεια φυτών όλο το χρόνο επιτυγχάνονται πολύ δύσκολα με την παθητική λειτουργία του θερμοκηπίου. Για να είναι εφικτό αυτό, απαραίτητη είναι η θέρμανση του θερμοκηπίου που πλέον γίνεται με κατανάλωση συμβατικών καυσίμων (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).



Εικόνα 4. Μετρήσεις θερμοκρασίας από την πόλη Serdang της Μαλαισίας 31 Οκτωβρίου 2004 (Teh, 2006)

Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ημέρας και νύχτας ή αλλιώς το ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος (HΘΕ) επηρεάζει σχεδόν σε όλα τα φυτά την επιμήκυνση του βλαστού και σε αρκετές περιπτώσεις τον αριθμό των γονάτων. Η επιμήκυνση του βλαστού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος, με διαφορές να υπάρχουν ακόμα και εντός του είδους, ενώ οι διαφορές στον αριθμό των γονάτων αφορούν κυρίως φυτά που η διαμόρφωση των ανθέων επηρεάζεται από τη θερμοκρασία νύχτας ή τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Ο ρυθμός εμφάνισης νέων φύλλων (leaf unfolding rate) είναι ένας δείκτης που σχετίζεται άμεσα με το σχηματισμό γονάτων. Παρουσιάζει αύξηση με την άνοδο της θερμοκρασίας μέχρι ένα όριο και μετά από αυτό μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Τέλος, η επίδραση του HΘΕ μειώνεται με την αύξηση της φωτοπεριόδου και της έντασης του φωτισμού (Berghage, 1998).

Θερμοκρασίες υψηλότερες από την άριστη, ιδιαίτερα σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού, δημιουργούν επιμήκυνση των φυτών κάνοντας τα αδύναμα, ενώ χαμηλότερες από τις άριστες καθυστερούν την ανάπτυξη (Ολύμπιος, 2001). Όταν η θερμοκρασία νύχτας είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία ημέρας τότε η ανάπτυξη των φυτών επηρεάζεται αρνητικά (Heuvelink, 1989).

Ακόμη, η θερμοκρασία συνδέεται και με την εξατμισοδιαπνοή των φυτών σύμφωνα με τον τύπο:

$$E = \frac{R_n - h(T - T_w) - G}{l}$$

Όπου:

- R_n η ακτινοβολία πάνω από το θερμοκήπιο, $\text{kJm}^{-2}\text{h}^{-1}$
- h συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, $\text{kJm}^{-2}\text{h}^{-1}\text{K}^{-1}$
- T η θερμοκρασία αέρα, $^{\circ}\text{C}$
- T_w η θερμοκρασία επιφανείας, $^{\circ}\text{C}$
- G η ροή θερμότητας στο έδαφος, $\text{kJm}^{-2}\text{h}^{-1}$
- l η θερμότητα λόγω εξάτμισης, kJkg^{-1}

Όμως αν η τιμή της θερμοκρασίας έχει απόκλιση έως και 10% από τη σωστή, ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής επηρεάζεται κατά 1%, οπότε το σφάλμα είναι αμελητέο (Takakura et al., 2009).

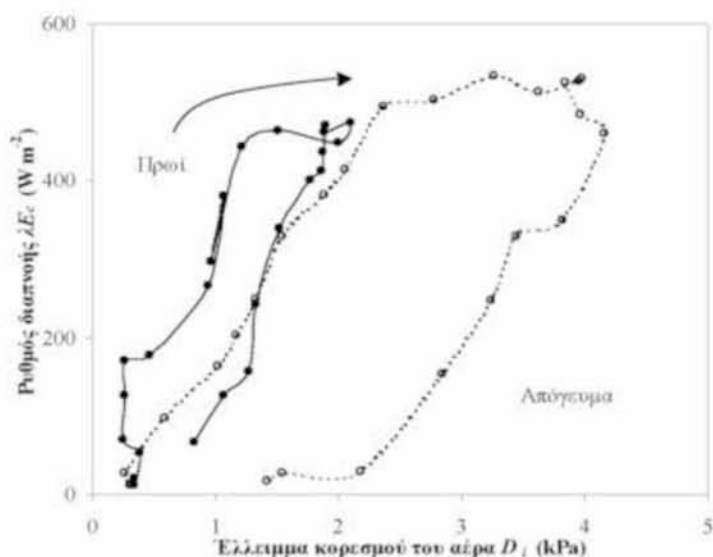
1.4. Η Υγρασία

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει έντονα το περιβάλλον των φυτών είναι η σχετική υγρασία, δηλαδή ο λόγος της ποσότητας των υδρατμών που περιέχει ο αέρας, σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία και πίεση, προς την ποσότητα των υδρατμών που θα περιείχε ο αέρας αν ήταν κορεσμένος με την ίδια θερμοκρασία και πίεση.

Η διατήρηση κατάλληλων επιπέδων υγρασίας στο θερμοκήπιο είναι απαραίτητη διότι παίζει σημαντικό ρόλο, στη διατήρηση της υδατικής ισορροπίας των φυτών μέσω της διαπνοής, στη θρέψη των φυτών αλλά και στην ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών και ακάρεων. Κάποια φυτά όπως το αγγούρι ευνοούνται σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής υγρασίας ημέρας, ενώ άλλα φυτά ευνοούνται σε συνθήκες με χαμηλή σχετική υγρασία (Μαυρογιαννόπουλος, 2005). Η καταλληλότερη σχετική υγρασία στην ατμόσφαιρα του θερμοκηπίου κυμαίνεται συνήθως γύρω στο 60-70% (Ολύμπιος, 2001).

Η επίδραση της υγρασίας είναι αρκετά σημαντική στη διαπνοή μιας καλλιέργειας, σε αρκετά μικρότερο βαθμό βέβαια από την ηλιακή ακτινοβολία (Stanghellini, 1983). Παρά το γεγονός ότι η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να ερμηνεύσει από μόνη της οποιαδήποτε μεταβολή στη διαπνοή, πολύ σημαντικό είναι να λαμβάνεται υπόψη και να υπολογίζεται το έλλειμμα

κορεσμού του αέρα ειδικά στις περιπτώσεις που λειτουργούν συστήματα θέρμανσης και δροσισμού στο θερμοκήπιο (Μπαρτζάνας, 2004). Σύμφωνα με ένα πείραμα που πραγματοποιήθηκε από τον Van de Sanden (1985), σε καλλιέργεια αγγουριού όπου μετρήθηκε η διαπνοή των φυτών για δύο διαφορετικές περιεκτικότητες του αέρα σε υγρασία, παρατηρήθηκε ότι με την ελάττωση της περιεκτικότητας του αέρα σε υγρασία υπήρχε μια αύξηση στη διαπνοή. Αρκετά χρόνια αργότερα, το 2002 σε νέο πείραμα σε φυτά τριανταφυλλιάς παρατηρήθηκε ότι η διαπνοή ήταν μικρότερη όταν λειτουργούσε το σύστημα δροσισμού με υδρονέφωση και επομένως επιβεβαιώθηκε η προηγούμενη άποψη. Στην Εικόνα 5 αποτυπώνονται τα αποτελέσματα του πειράματος που πραγματοποιήθηκε από τον Κατσούλας (2002).



Εικόνα 5. Επίδραση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στη διαπνοή, (•) με σύστημα δροσισμού, (ο) χωρίς σύστημα δροσισμού (Κατσούλας, 2002)

Ακόμη, το έλλειμμα κορεσμού του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου είναι ικανό να επηρεάσει την αύξηση και ανάπτυξη των φυτών όπως αποδεικνύεται από τα παρακάτω πειράματα. Αρχικά, το 1987 μελετήθηκαν διαφορετικά επίπεδα υγρασίας μεταξύ ημέρας και νύχτας και αποδείχθηκε ότι η μέγιστη παραγωγή επιτυγχάνεται με υψηλά επίπεδα υγρασίας την ημέρα και χαμηλά κατά τις νυχτερινές ώρες, με σπουδαία εξάρτηση στις τιμές της υγρασίας την ημέρα (Bakker et al., 1987). Την ίδια χρονιά διαπιστώθηκε ότι το έλλειμμα κορεσμού με τιμές μεταξύ 0.2 και 1.0 kPa δεν επιδρούν σημαντικά στην ανάπτυξη των περισσότερων καλλιεργειών (Grange & Hand, 1987). Αργότερα το 1990, έγινε μελέτη της επίδρασης διαφορετικών επιπέδων υγρασίας στο εσωτερικό ενός θερμοκηπίου με καλλιέργεια

τομάτας και διαπιστώθηκε ότι υψηλές τιμές υγρασίας μπορούσαν να μειώσουν έως και 50% τη φυλλική επιφάνεια μειώνοντας παράλληλα έως και 31% την απόδοση, χωρίς ωστόσο να υπάρχουν σημαντικές επιδράσεις στην αύξηση των καρπών και στη γονιμοποίηση (Holder & Cockshull, 1990). Άλλη μια έρευνα βασίστηκε στη μελέτη της επίδρασης της ελεγχόμενης υγρασίας (σταθερή 77%) σε φυτά τριανταφυλλιάς σε σχέση με την ανάπτυξη των φυτών σε φυσικό περιβάλλον καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Την περίοδο του καλοκαιριού η ελεγχόμενη υγρασία είχε θετικά αποτελέσματα στην ανάπτυξη των φυτών, όμως τους χειμερινούς μήνες ο έλεγχος της υγρασίας για να δημιουργήσει θετικά αποτελέσματα χρειαζόταν παράλληλη τροποποίηση του φωτισμού. Ο συνδυασμός αυτός με τεχνητό φωτισμό για 18 ώρες ημερησίως ήταν ικανός για αύξηση των δρεπών λουλουδιών έως και 70% (Darlington et al., 1992).

1.5. Vapor Pressure Deficit

Η υγρασία από μόνη της δεν παρέχει αρκετές πληροφορίες σχετικά με την διαπνοή των φυτών. Ο δείκτης που χρησιμοποιείται για πληροφορίες που σχετίζονται με την διαπνοή και άλλες σημαντικές διεργασίες των φυτών (επικονίαση, ανάπτυξη) είναι το έλλειμα κορεσμού του αέρα (VPD, Vapor Pressure Deficit). Το VPD στην πράξη είναι η διαφορά της πίεσης ατμών κορεσμού και της πραγματικής πίεσης ατμών και μπορεί να βοηθήσει στην ενημέρωση για την πιθανότητα κορεσμού στο θερμοκήπιο. Γενικά, χρησιμοποιείται σε αρκετούς τύπους υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής, ενώ μπορεί να υπολογιστεί εύκολα με δεδομένα τη θερμοκρασία (°C) και τη σχετική υγρασία (%) σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$VPD = (EXP(6,41 + 0,0727 * T - 3 * (1/10^4) * T^2 + 1,18 * (1/10^6) * T^3 - 3,86 * (1/10^9) * T^4) * (1 - RH/100)) / 1000 \text{ (Shamshiri et al., 2018)}$$

Γενικά, οι τιμές θα πρέπει να κυμαίνονται από 0.3 kPa μέχρι 1.0 kPa με βέλτιστες τις 0.5 – 0.8 kPa που βοηθούν στην αύξηση απόδοσης και στην αποφυγή μυκητιακών παθήσεων. Τιμές πάνω από 1.0 kPa επιδρούν στην ανάπτυξη των φυτών. Όταν υπάρχουν τιμές κάτω από 0.45 kPa θα πρέπει να ενεργοποιείται σύστημα αφύγρανσης του θερμοκηπίου, ενώ με τιμές μεγαλύτερες από 1.25 kPa το σύστημα ομίχλης. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι απαιτήσεις φυτού τομάτας στις κλιματικές συνθήκες και VPD. Στον Πίνακα 2 φαίνεται με παραδείγματα η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας, υγρασίας και VPD (Shamshiri et al., 2018).

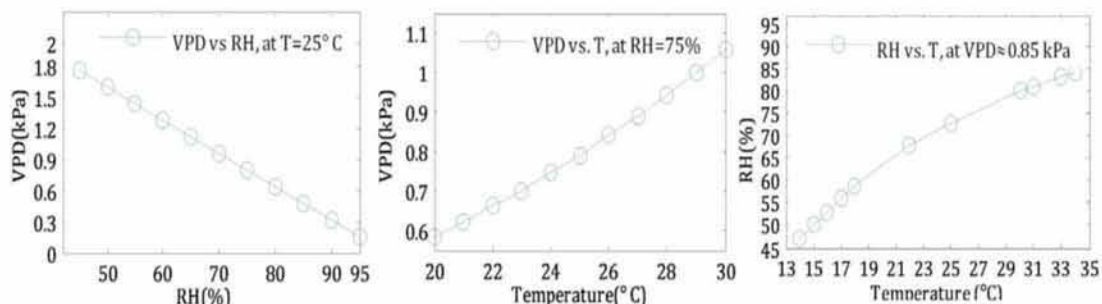
Πίνακας 1. Μέγιστες και ελάχιστες, ιδανικές και βλαβερές για το φυτό τιμές υγρασίας, θερμοκρασίας και VPD σε φυτά τομάτας (Shamshiri et al., 2018)

Growth stage	Light condition	Lower optimal			Upper optimal			Lower failure			Upper failure		
		<i>T</i> (°C)	<i>RH</i> (%)	<i>VPD</i> (kPa)	<i>T</i> (°C)	<i>RH</i> (%)	<i>VPD</i> (kPa)	<i>T</i> (°C)	<i>RH</i> (%)	<i>VPD</i> (kPa)	<i>T</i> (°C)	<i>RH</i> (%)	<i>VPD</i> (kPa)
Early growth	any	24	75	0.2	26.1	100	0.845	9	60	0.011	35	-	2.248
	sun	24	70	0.596	27	80	1.069	10	40	0.012	40	100	4.422
Vegetative	cloud	22	70	0.528	24	80	0.895	10	40	0.012	40	100	4.422
	night	18	70	0.413	20	80	0.701	10	40	0.012	40	100	4.422
Flowering to mature fruiting	sun	24	60	0.596	27	80	1.425	10	30	0.012	40	100	5.160
	cloud	22	60	0.528	24	80	1.193	10	30	0.012	40	100	5.160
	night	18	60	0.413	20	80	0.935	10	30	0.012	40	100	5.160

Το VPD θα πρέπει να υπολογίζεται και να λαμβάνεται υπόψη για τις ενεργειακές απαιτήσεις του θερμοκηπίου, όμως μόνο του δεν είναι αρκετό καθώς διαφορετικές τιμές υγρασίας και θερμοκρασίας μπορούν να δώσουν την ίδια τιμή VPD. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας, υγρασίας και VPD (Shamshiri et al., 2018).

Πίνακας 2. Ποικιλομορφία τιμών VPD με διαφορετικές τιμές υγρασίας και θερμοκρασίας (Shamshiri et al, 2018)

Constant temperature			Constant relative humidity			Constant VPD		
<i>T</i> (°C)	<i>RH</i> (%)	<i>VPD</i> (kPa)	<i>T</i> (°C)	<i>RH</i> (%)	<i>VPD</i> (kPa)	<i>T</i> (°C)	<i>RH</i> (%)	<i>VPD</i> (kPa)
25	45	1.741	20	75	0.584	22	68	0.845
	50	1.583			0.621			0.852
	55	1.425			0.661			0.854
	60	1.266			0.702			0.852
	65	1.108			0.745			0.846
	70	0.950			0.791			0.845
	75	0.791			0.840			0.855
	80	0.633			0.891			0.848
	85	0.475			0.944			0.853
	90	0.317			1.001			0.855
95	0.158	1.060	0.851					



Εικόνα 6. Διακύμανση VPD σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία (Shamshiri et al., 2018)

1.6. Κατανομή Μικροκλίματος στο Θερμοκήπιο

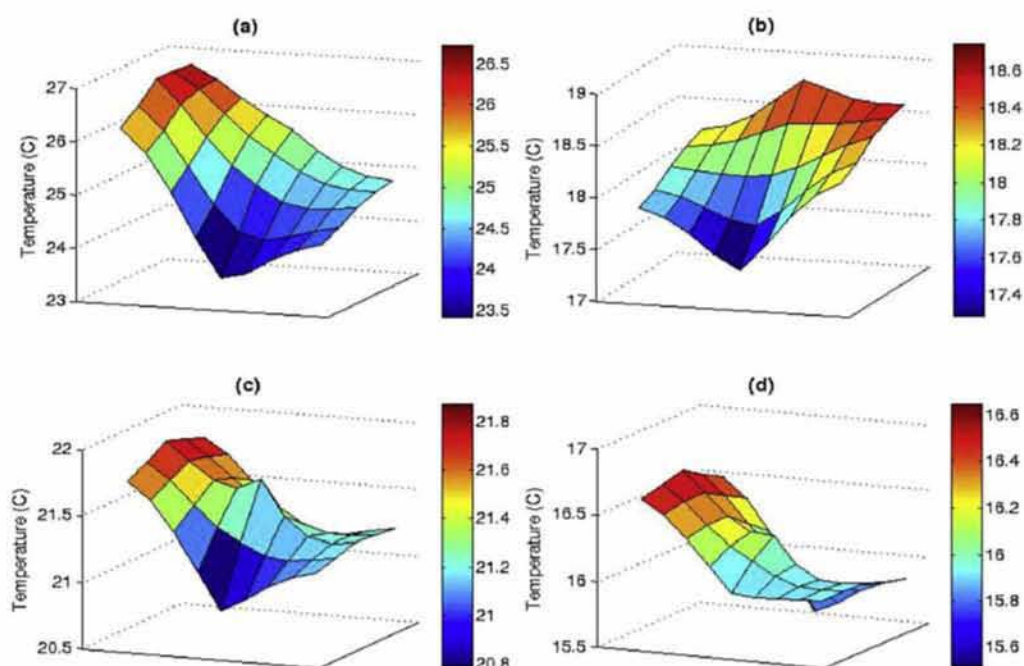
Το μικροκλίμα είναι ένα τοπικό σύνολο ατμοσφαιρικών συνθηκών οι οποίες διαφέρουν από εκείνες των γύρω περιοχών, συχνά με μικρές αλλά αρκετές φορές ουσιαστικές διαφορές. Ο όρος μπορεί να αναφέρεται σε περιοχές τόσο μικρές όσο λίγα τετραγωνικά μέτρα ή τόσο μεγάλες όσο τετραγωνικά χιλιόμετρα ή τετραγωνικά μίλια (Bedford, 2013).

Παραδοσιακά ο έλεγχος του κλίματος του θερμοκηπίου βασιζόταν στις μακροκλιματικές συνθήκες που επικρατούσαν σε αυτό. Συγκεκριμένα, λαμβανόταν μετρήσεις σε ένα σημείο (συνήθως σε κάποιο κεντρικό) και οι συνθήκες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου θεωρούνταν ομοιόμορφες. Στην πραγματικότητα όμως υπάρχει μεγάλη ετερογένεια συνθηκών που θα πρέπει να μετρώνται με ακρίβεια, μέσω συστημάτων αισθητήρων και να λαμβάνονται υπόψη ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη απόδοση παραγωγής (Kacira et al., 2005).

1.6.1. Ποικιλομορφία Θερμοκρασίας, Υγρασίας και VPD στο Εσωτερικό Θερμοκηπίου

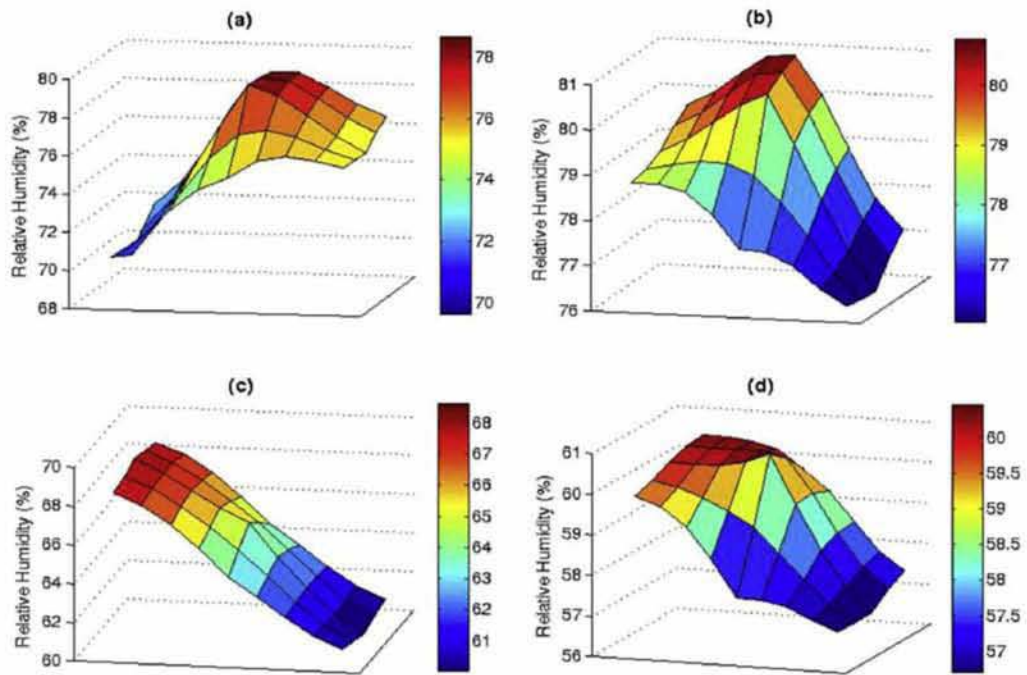
Σύμφωνα με πείραμα που πραγματοποιήθηκε από τους Ferentinos et al. (2016), προέκυψε ότι η θερμοκρασία παρουσιάζει μεγάλη ετερογένεια στο εσωτερικό του θερμοκηπίου κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, στη διάρκεια της ημέρας. Αυτό οφείλεται στη λειτουργία του συστήματος δροσισμού με υγρή παρειά. Ο ψυχρός αέρας που εισέρχεται στο θερμοκήπιο μέσω της υγρής παρειάς καθώς κινείται προς την απέναντι πλευρά που βρίσκονται οι ανεμιστήρες θερμαίνεται. Έτσι δημιουργείται σημαντική θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δύο απέναντι πλευρών του θερμοκηπίου όπως χαρακτηριστικά φαίνεται και στην Εικόνα 7.

Το καλοκαίρι παρουσιάζονται μικρότερες διακυμάνσεις θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια την νύχτας αλλά και κατά τους χειμερινούς μήνες.

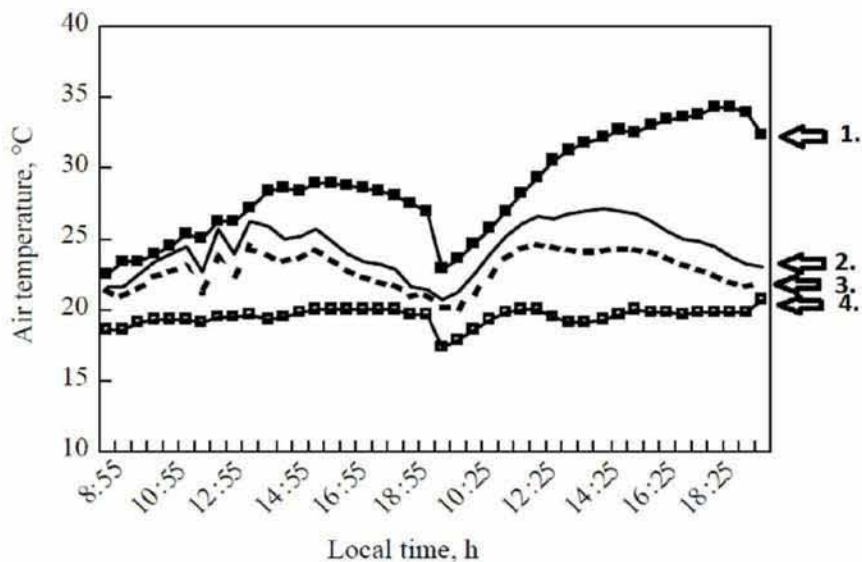


Εικόνα 7. Χωρική αναπαράσταση της μέσης θερμοκρασίας σε θερμοκήπιο. (a) καλοκαίρι-ημέρα (b) καλοκαίρι-νύχτα (c) χειμώνας-ημέρα (d) χειμώνας-νύχτα (Ferentinos et al., 2016).

Όσον αφορά στη σχετική υγρασία, οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια της ημέρας με μέγιστη απόκλιση μεταξύ των αισθητήρων στο 9%. Σε αντίθεση με τη θερμοκρασία που μεταβάλλεται από την υγρή παρειά προς τους ανεμιστήρες, η υγρασία φαίνεται να μεταβάλλεται από τη βόρεια προς τη νότια πλευρά του θερμοκηπίου (Εικόνα 8). Γενικά η σχετική υγρασία παραμένει αρκετά ομοιόμορφη στο θερμοκήπιο κατά τη διάρκεια της νύχτας, κάτι που οφείλεται στη λειτουργία των ανεμιστήρων ανάμειξης του αέρα (Ferentinos et al., 2016).

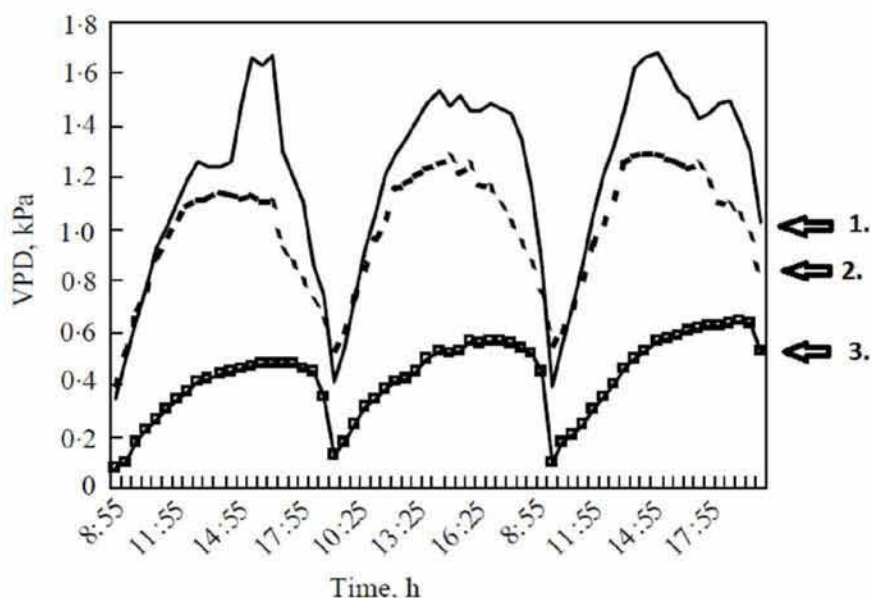


Εικόνα 8. Χωρική αναπαράσταση της μέσης σχετικής υγρασίας σε θερμοκήπιο. (a) καλοκαίρι-ημέρα (b) καλοκαίρι-νύχτα (c) χειμώνας-ημέρα (d) χειμώνας-νύχτα (Ferentinos et al., 2016).



Εικόνα 9. Διακύμανση θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του θερμοκηπίου (1. Εξωτερική θερμοκρασία, 2. Θερμοκρασία κοντά στους ανεμιστήρες, 3. Θερμοκρασία στο κέντρο του θερμοκηπίου, 4. Θερμοκρασία κοντά στην υγρή παρειά) (Kittas et al., 2003)

Τέλος, οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις του δείκτη VPD παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια της μέρας με κύριο χαρακτηριστικό την αύξηση της τιμής του από την πλευρά της υγρής παρειάς προς την απέναντι. Επίσης, σημαντική παρατήρηση είναι ότι παρουσιάστηκαν ιδιαίτερα υψηλότερες τιμές στο σκιασμένο μέρος του θερμοκηπίου σε σχέση με το μέρος που δεν είχε σκιά (Kittas et al., 2003).



Εικόνα 10. Ημερήσια διακύμανση VPD σε διαφορετικά σημεία στο θερμοκήπιο (1. VPD κοντά στους ανεμιστήρες, 2. VPD στο κέντρο του θερμοκηπίου, 3. VPD κοντά στην υγρή παρειά) (Kittas et al., 2003).

1.6.2. Διαφοροποίηση Εξατμισοδιαπνοής

Με βάση την ετερογένεια κλιματικών συνθηκών, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω, προκαλείται και διαφοροποίηση στην εξατμισοδιαπνοή των φυτών. Αυτή προκύπτει σύμφωνα με τον τύπο :

$$Tr = a \cdot R + b \cdot VPD$$

Όπου:

Tr = Transpiration, $W m^{-2}$

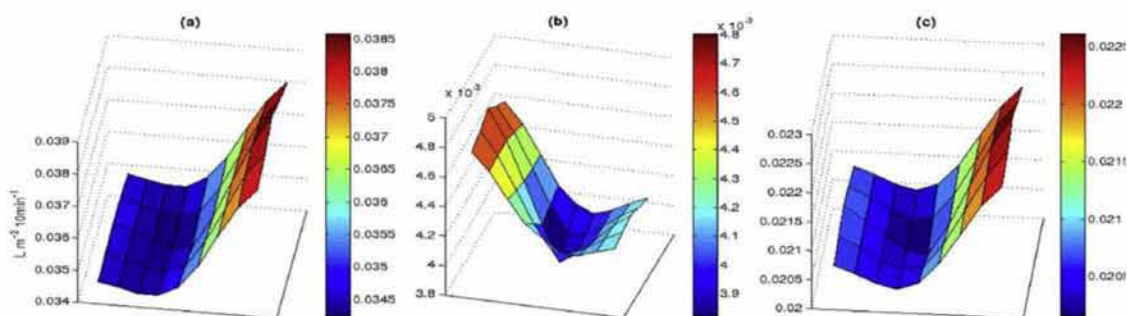
a = 0.8 (constant), dimensionless

b = 0.2 (constant), $W m^{-2} kPa^{-1}$

R = Radiation intensity, $W m^{-2}$

VPD = Vapor pressure deficit, kPa

Παρατηρήθηκε ότι υπάρχει μεγάλη ετερογένεια στην εξατμισοδιαπνοή μεταξύ της βόρειας και νότιας πλευράς του θερμοκηπίου. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην ηλιακή ακτινοβολία. Η παρατήρηση αυτή βοηθάει σε μεγάλο βαθμό τη διαχείριση και διαμόρφωση μιας σωστής άρδευσης διαφοροποιημένης στο εσωτερικό του θερμοκηπίου (Katsoulas et al., 2015).



Εικόνα 11. Χωρική αναπαράσταση της μέσης εξατμισοδιαπνοής a) τη μέρα b) τη νύχτα c) μέσος όρος κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (Ferentinos et al., 2016)

1.7. Έλεγχος Κλίματος Θερμοκηπίου

Στις μέρες μας, στα περισσότερα μεσογειακά θερμοκήπια ο έλεγχος του κλίματος συντελείται κυρίως με ενέργειες που αποσκοπούν στη διατήρηση κατάλληλων θερμοκρασιών για την ανάπτυξη των καλλιεργούμενων φυτών. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των συστημάτων θέρμανσης και αερισμού, ενώ δεν λαμβάνεται υπόψη το αποτέλεσμα αυτής της ενέργειας στους υπόλοιπους παράγοντες που καθορίζουν το τελικό οικονομικό αποτέλεσμα (Κατσούλας et al., 2011).

Αρκετές μελέτες έδειξαν ότι η αύξηση και η ανάπτυξη πολλών λαχανικών και ανθοκομικών ειδών δεν επηρεάζεται τόσο από την διακύμανση της θερμοκρασίας αλλά από τη μέση ημερήσια θερμοκρασία. Έτσι, σε αρκετές καλλιέργειες ήδη έχει καθιερωθεί η θέρμανση των θερμοκηπίων να γίνεται με βάση το άθροισμα των θερμοκρασιών του εικοσιτετράωρου επιτρέποντας εξοικονόμηση ενέργειας έως και 20%. Πολλά σύγχρονα θερμοκήπια χρησιμοποιούν σύνθετα συστήματα με δυνατότητα διαφορετικού σημείου ρύθμισης (set-point) ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας. Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται συνεχώς νέα πολυσύνθετα συστήματα ελέγχου με χρήση προσομοιωμάτων ανάπτυξης, ενώ γίνονται προσπάθειες για βελτιστοποίηση του κλίματος των θερμοκηπίων (Κατσούλας κ.ά., 2011).

1.7.1. Συστήματα Θέρμανσης

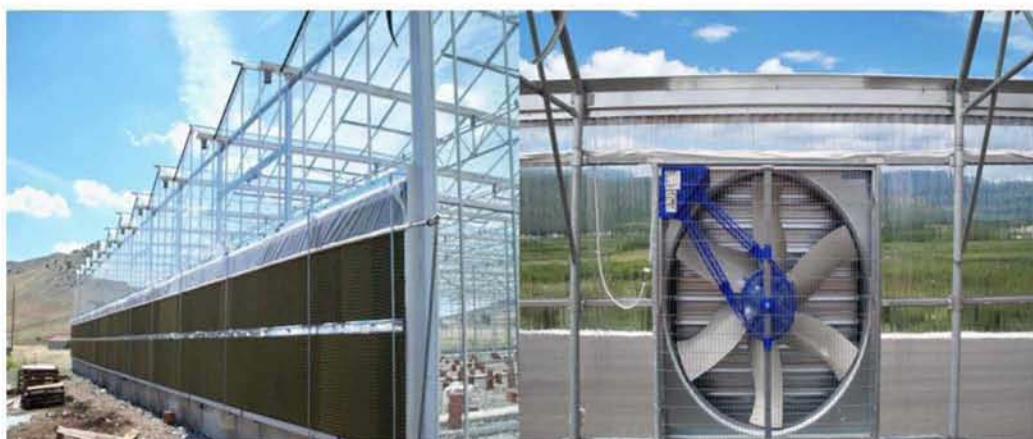
Στις χώρες της μεσογείου η θέρμανση των θερμοκηπίων γίνεται κυρίως με καυστήρες ορυκτών καυσίμων που μέσα από επιδαπέδιους σωλήνες κυκλοφορεί το θερμό νερό ή και με αερόθερμα (Κατσούλας et al., 2011). Τα συστήματα αυτά έχουν υψηλό συντελεστή ενεργειακής απόδοσης αλλά και υψηλό ενεργειακό προϋπολογισμό λόγω της κατανάλωσης συμβατικών καυσίμων. Επειδή η διατήρηση ισοθερμοκρασιακού κλίματος σε όλο το θερμοκήπιο είναι απαραίτητη για να διατηρηθούν εντός του θερμοκηπίου οι επιθυμητοί περιβαλλοντικοί όροι, οι συνολικές ενεργειακές απώλειες είναι πολύ υψηλές. Τα ανομοιόμορφα θερμικά περιβάλλοντα αναγκάζουν τα φυτά σε διαφορετικούς ρυθμούς αύξησης, με πιθανά προβλήματα ασθενειών, με απρόβλεπτα αποτελέσματα από εφαρμογές λίπανσης και ορμονών, και γενικά ένα δυσκολότερο σύστημα παραγωγής. Η ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας είναι δύσκολη με αυτά τα συστήματα και η χρήση τους μπορεί να μην οδηγήσει σε ένα ομοιόμορφο θερμικό περιβάλλον (Giacomelli, 2002).

Εναλλακτικά καύσιμα άρχισαν να εφαρμόζονται τελευταία, όμως εμφάνισαν ιδιαίτερα προβλήματα κυρίως στη λειτουργία των καυστήρων αλλά και την εύρεση της πρώτης ύλης. Παθητικά συστήματα θέρμανσης όπως σωλήνες νερού για αποθήκευση ενέργειας μπορούν να εφαρμοστούν με χαμηλή αποτελεσματικότητα όταν υπάρχει μεγάλη φυλλική επιφάνεια. Η θερμοκουρτίνα τα τελευταία χρόνια έχει ευρεία χρήση στα θερμοκήπια και βελτιώνει την ενεργειακή συμπεριφορά του θερμοκηπίου βοηθώντας έτσι σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας θέρμανσης και επιμήκυνση της καλλιεργητικής περιόδου. Συνεχώς όμως προκύπτουν νέα συστήματα και νέες τάσεις σχεδιασμού των συστημάτων θέρμανσης στα θερμοκήπια με σκοπό την αύξηση της απόδοσης και την εξοικονόμηση ενέργειας.

Στις μέρες μας η θέρμανση των θερμοκηπίων βασίζεται κυρίως στον προσδιορισμό δύο επιθυμητών θερμοκρασιών ημέρας και νύχτας και ορισμός αυτών στο θερμοστάτη, προσδιορισμός που γίνεται με βάση την εμπειρία του παραγωγού. Όμως συνεχώς αυξάνεται και η χρήση νέων σύγχρονων συστημάτων ελέγχου του κλίματος που μπορούν να κάνουν τις κατάλληλες τροποποιήσεις ανάλογα με τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες και το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας. Έτσι με τη χρήση τέτοιων σύγχρονων συστημάτων μπορεί να επιτευχθεί μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων και μείωση του κόστους θέρμανσης (Κατσούλας et al., 2011).

1.7.2. Συστήματα Δροσισμού

Ένα αρκετά σημαντικό πρόβλημα των θερμοκηπίων στις μεσογειακές χώρες είναι η διατήρηση κατάλληλων θερμοκρασιών κατά τους καλοκαιρινούς μήνες που σημειώνονται υψηλές εξωτερικές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με την απουσία υγρασίας. Οι συνθήκες αυτές δημιουργούν ακατάλληλες για την ανάπτυξη φυτών συνθήκες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και έτσι οι παραγωγοί αναγκάζονται να συνεχίσουν την καλλιέργεια κάτω από δυσμενείς συνθήκες ή ακόμα και να διακόψουν την καλλιέργεια. Τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος υπάρχουν, ξεκινώντας από τον φυσικό αερισμό και τη σκίαση που είναι αρκετά διαδεδομένοι με περιορισμένη όμως αποτελεσματικότητα. Ο αερισμός του θερμοκηπίου μπορεί εύκολα να βελτιωθεί με το δυναμικό αερισμό, δηλαδή τη χρήση ανεμιστήρων, που είναι ικανοί να βελτιώσουν αρκετά τις συνθήκες χωρίς όμως να μπορούν να ρίξουν τη θερμοκρασία χαμηλότερα από την εξωτερική. Για επίτευξη χαμηλότερων θερμοκρασιών ένας αποτελεσματικός τρόπος είναι ο δροσισμός με εξάτμιση. Αυτή η μέθοδος, βασίζεται στη μετατροπή της αισθητής θερμοκρασίας σε λανθάνουσα και γίνεται είτε με απευθείας παροχή νερού στην ατμόσφαιρα του θερμοκηπίου με σύστημα τεχνητής ομίχλης είτε με ψύξη του αέρα με διέλευση μέσω υγρής παρειάς. Το σύστημα αυτό συνδυάζεται με το δυναμικό αερισμό (Εικόνα 12) (Κατσούλας κ.ά., 2011).



Εικόνα 12. Σύστημα δροσισμού με χρήση υγρής παρειάς (αριστερά), σύστημα δυναμικού αερισμού (δεξιά) (Πηγή: Ιστότοπος 3).

1.7.3. Υλικά Κάλυψης Θερμοκηπίων

Τα υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων επιδρούν σημαντικά στην απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και στη μόνωση που παρέχουν στο θερμοκήπιο από τις εξωτερικές συνθήκες. Τα υλικά κάλυψης με βάση την ηλιακή ακτινοβολία που απορροφούν μπορούν να χωριστούν σε:

- Φωτοεκλεκτικά πλαστικά φύλλα κάλυψης θερμοκηπίων, που απορροφούν την υπεριώδη ακτινοβολία (UV-A:320-380nm, UV-B: 280-320nm) σε διαφορετικά επίπεδα και σχετίζονται με τη δραστηριότητα των εντόμων και την ανάπτυξη ασθενειών και ιώσεων.
- Φωτοεκλεκτικά πλαστικά φύλλα κάλυψης θερμοκηπίων που απορροφούν την υπέρυθη ακτινοβολία στο εύρος των 680-780 nm και σχετίζονται με την αύξηση της φωτεινότητας του χρώματος των φυτών, τη βελτίωση της ποιότητας και αύξηση της παραγωγής.
- Φωτοεκλεκτικά πλαστικά φύλλα κάλυψης θερμοκηπίων που αντανακλούν την κοντινή υπέρυθη ακτινοβολία (Near InfaRed: 780-3000nm) και σχετίζονται με το δροσισμό του θερμοκηπίου.
- Φωτοεκλεκτικά πλαστικά φύλλα κάλυψης θερμοκηπίων που εγκλωβίζουν τη μακρινή υπέρυθη ακτινοβολία (Far InfaRed: 3000- 50000nm) και σχετίζονται με τη μείωση των απωλειών θερμότητας του θερμοκηπίου (έως 15-35%) (Κατσούλας κ.ά., 2011).

1.8. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων στη Γεωργία Ακριβείας

Το Διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things, IoT) είναι 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, αφορά τη 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 είναι δυνατή η δημιουργία αυτοματισμών, μέσω των οποίων πραγματοποιούνται καίριες επεμβάσεις που αφορούν στην καλλιέργεια την κατάλληλη χρονική στιγμή, διασφαλίζοντας την ποιότητα των αγροτικών προϊόντων, εξοικονομώντας πόρους (νερό, φυτοφάρμακα, λιπάσματα) και επιβαρύνοντας πολύ λιγότερο το περιβάλλον στο ευρύτερο πλαίσιο των πρακτικών της γεωργίας ακριβείας.

1.9. 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.).

1.10. Σκοπός της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της ομοιομορφίας κλιματικών συνθηκών στο εσωτερικό εμπορικού υδροπονικού θερμοκηπίου παραγωγής αγγουριού. Πιο συγκεκριμένα θα ερευνηθεί η διακύμανση της θερμοκρασίας και υγρασίας, με τη βοήθεια ασύρματων αισθητήρων.

2. Υλικά και μέθοδοι

2.1. Το θερμοκήπιο

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε θερμοκήπιο κατασκευής του 2010 στην περιοχή του Πυργετού κάτω Ολύμπου (400 07, 39.919920, 22.607639) με υψόμετρο περίπου 150m, σε απόσταση 40 χιλιομέτρων από την πόλη της Λάρισας στα βόρεια του Νομού Λάρισας (Εικόνα 13).



Εικόνα 13. Λήψη από δορυφόρο (google earth).

Ο τύπος του θερμοκηπίου είναι πολλαπλό τροποποιημένο τοξωτό επιφανείας 5.040 m^2 , με μήκος 105m και πλάτος 48m. Το ύψος κορφιάτη είναι στα 7m και το ύψος της υδρορροής στα 4,5m. Ο σκελετός του θερμοκηπίου αποτελείται από γαλβανισμένο χάλυβα και τα υλικά κάλυψης είναι πολυαιθυλένιο για την οροφή και γυαλί για τις πλαϊνές πλευρές. Στη νότια πλευρά του θερμοκηπίου υπάρχει χώρος 300m^2 με αποθήκη για τα καύσιμα υλικά, χώρος για τους λέβητες, γραφείο και χώρος ασφαλείας πριν την είσοδο στο θερμοκήπιο. Αυτός ο χώρος είναι καλυμμένος στην οροφή με πολυαιθυλένιο και πολυκαρβονικό στις πλαϊνές πλευρές.

2.1.1. Αερισμός

Στο θερμοκήπιο υπάρχουν 5 παράθυρα οροφής μήκους 105m. Στη δυτική πλευρά του θερμοκηπίου υπάρχει υγρή παρειά μήκους 95m και ύψους 2m (Εικόνα 14) ενώ στην απέναντι ανατολική πλευρά υπάρχουν ανεμιστήρες δυναμικού αερισμού (Εικόνα 15). Τέλος για την ανοιχτή οριζόντια κίνηση του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου υπάρχουν ανεμιστήρες που βρίσκονται στο ύψος της υδρορροής.



Εικόνα 14. Παράθυρα οροφής (αριστερά) και σύστημα υγρής παρειάς (δεξιά) στη δυτική πλευρά.



Εικόνα 15. Ανεμιστήρες δυναμικού αερισμού (ανατολική πλευρά θερμοκηπίου) και ανεμιστήρες ανάμειξης του αέρα.

2.1.2. Θέρμανση

Η ενέργεια για τη θέρμανση παράγεται από δύο λέβητες βιομάζας δυναμικότητας 670.000 θερμίδων έκαστος και από έναν τρίτο λέβητα 1pg δυναμικότητας 800.000 θερμίδων. Η μεταφορά της θερμότητας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου γίνεται με μεταλλικούς σωλήνες των οποίων το ένα τμήμα βρίσκεται σε ύψος 1.5m πάνω στις γραμμές της καλλιέργειας και το άλλο τμήμα βρίσκεται στο δάπεδο των διαδρόμων με 52 σωλήνες παράλληλα με την καλλιέργεια σχηματίζοντας 2 ράγες σε κάθε διάδρομο. Το μέγεθος των σωλήνων είναι 2”*90m.

2.1.3. Καλλιέργεια

Το θερμοκήπιο είναι κατασκευασμένο με σκοπό την παραγωγή αγγουριού. Κατά τη διάρκεια του έτους καλλιεργούνται δύο καλλιέργειες της ποικιλίας Litoral σε υπόστρωμα πετροβάμβακα. Η πρώτη καλλιεργητική περίοδος ξεκινάει τον Ιανουάριο και διαρκεί μέχρι τα μέσα Ιουνίου όπου αποξηλώνεται και η δεύτερη αρχίζει τέλη Ιουνίου έως αρχές Ιανουαρίου. Οι αποστάσεις φύτευσης είναι 1,60m μεταξύ των γραμμών και 33cm οι αποστάσεις των φυτών επί της γραμμής.

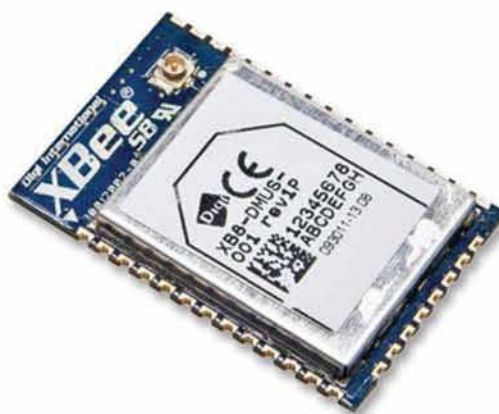
Τις πρώτες 20 περίπου μέρες οι καλλιεργητικές φροντίδες περιορίζονται στο δέσιμο των φυτών στα σκοινιά στήριξης και σε κάποιους ψεκασμούς. Μετά τις 20 μέρες ξεκινά η παραγωγή, γίνεται η συγκομιδή των πρώτων αγγουριών και αραίωμα των φύλλων από τη βάση, καθώς το φυτό πλέον έχει αποκτήσει μεγάλο ύψος και είναι αναγκαίο να αρχίσει το κατέβασμα.

2.2. Το Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων

Το δίκτυο δημιουργήθηκε με κόμβους χαμηλής κατανάλωσης βασισμένους σε προγραμματιζόμενα ενσωματωμένα συστήματα της Digi και πιο συγκεκριμένα το μοντέλο Xbee 868LP (Εικόνα 16). Η συγκεκριμένη επιλογή των ασύρματων κόμβων έγινε επειδή έχουν πολύ χαμηλή κατανάλωση ρεύματος που σημαίνει μεγαλύτερη διάρκεια μετρήσεων αλλά και γιατί εκπέμπουν συχνότητες κάτω από 1 GHz κάτι που προσδίδει καλή επικοινωνία παρά τα εμπόδια μεταξύ τους, όπως τα φυτά στο θερμοκήπιο. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ασύρματων κόμβων.

Πίνακας 3. Τεχνικά χαρακτηριστικά ασύρματων κόμβων.

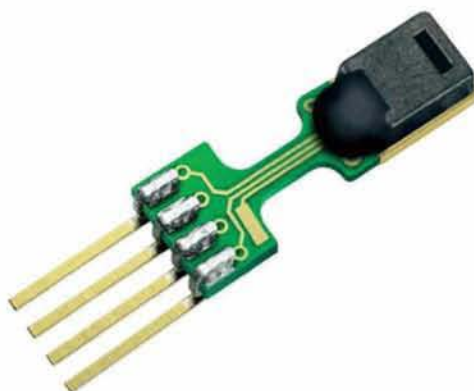
Συχνότητα Λειτουργίας	863-870MHz (Ευρωπαϊκό μοντέλο)
Συνθήκες Λειτουργίας	-40 – 85 °C
Ψηφιακά I/O	13 (5 SPI/ outputs)
Αναλογικά I/O	4 (10-bit inputs)
Δικτύωση	Mesh, point-to-point, point-to-multipoint, peer-to-peer
Δυνατότητα κρυπτογράφησης	128-Bit (AES)
Εύρος επικοινωνίας σε κλειστό χώρο/αστικό περιβάλλον	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 16. Το ασύρματο υποσύστημα XBee 868LP

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκαν οι αισθητήρες SHT15 Sensirion (Εικόνα 17). 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 βαθμονομημένο σήμα εξόδου. Ένας χωρητικός αισθητήρας (capacitive sensor) αναλαμβάνει τη μέτρηση της σχετικής 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, ταχύτερους 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.



Εικόνα 17. Ο αισθητήρας Sensirion SHT75.

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του ασύρματου αισθητήρα Sensirion SHT75

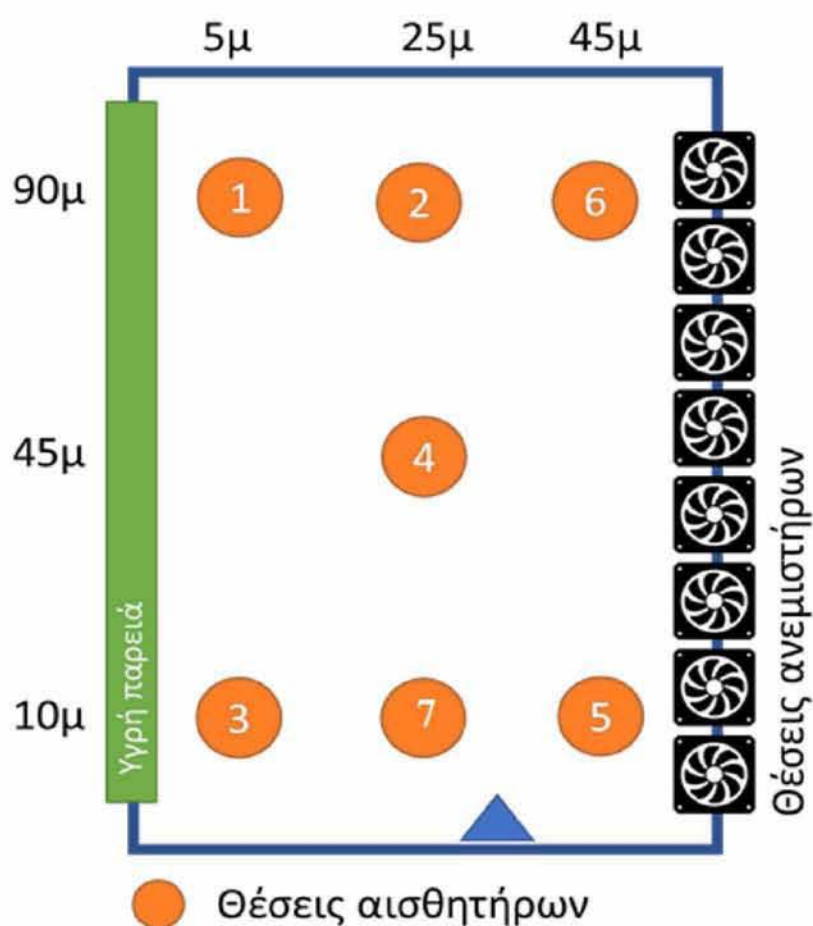
Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά ασύρματου αισθητήρα Sensirion SHT75.

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

2.3. Το πείραμα

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο θερμοκήπιο που αναφέρεται παραπάνω από 31 Αυγούστου 2018 έως 26 Οκτωβρίου 2018.

Για την πραγματοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν εννιά αισθητήρες, όπως περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 2.2, οι οποίοι μετρούσαν τη σχετική υγρασία και τη θερμοκρασία. Πιο συγκεκριμένα τοποθετήθηκαν τρεις αισθητήρες σε μια γραμμή κοντά στην υγρή παρειά, ένας στην αρχή, ένας στο μέσο και ένας στο τέλος. Αντίστοιχα, τοποθετήθηκαν τρεις αισθητήρες σε μία κεντρική γραμμή και τρεις σε μία γραμμή κοντά στους ανεμιστήρες. Όμως σε δύο από αυτούς υπήρχε βλάβη και δεν κατέγραφαν δεδομένα, ενώ ακόμα ένας παρουσίαζε σημαντικά σφάλματα στις μετρήσεις σχετικής υγρασίας και οι μετρήσεις του δεν υπολογίστηκαν. Έτσι οι τελικές θέσεις των αισθητήρων ήταν όπως φαίνεται στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18. Οι θέσεις των αισθητήρων στο θερμοκήπιο.

Οι αισθητήρες δέθηκαν με σχοινί στις αλυσίδες στήριξης των σωλήνων θέρμανσης, ώστε να παραμένουν σταθεροί κατά τις διαδικασίες “κατεβάσματος” των φυτών και σε ύψος 2m περίπου ώστε να βρίσκονται στην καρδιά της βλάστησης όπως φαίνεται και στην Εικόνα 18. Η συχνότητα λήψης των μετρήσεων ήταν ανά δέκα λεπτά για είκοσι τέσσερις ώρες τη μέρα. Με σκοπό τη λήψη των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο, οι αισθητήρες ήταν συνδεδεμένοι στο δίκτυο του θερμοκηπίου.



Εικόνα 19. Τρόπος τοποθέτησης αισθητήρων.

Επιπλέον, στο χώρο του θερμοκηπίου λάμβανε χώρα η καταγραφή της θερμοκρασίας υγρού (T_{wet}) και ξηρού θερμομέτρου (T_{dry}) και της σχετικής υγρασίας (RH). 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 λήφθηκαν μετρήσεις από μετεωρολογικό σταθμό για τις περιβαλλοντικές συνθήκες εξωτερικά του θερμοκηπίου, όπως η θερμοκρασία υγρού και ξηρού θερμομέτρου, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα και κατεύθυνση των ανέμων, τα επίπεδα βροχόπτωσης καθώς και τα ποσά της εισερχόμενης ακτινοβολίας (R_n).

2.4. Υπολογισμοί

Οι μετρήσεις που καταγράφηκαν από τους αισθητήρες, επεξεργάστηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος Excel με σκοπό τη διαχείριση των αποτελεσμάτων και τη διεξαγωγή συμπερασμάτων. Αρχικά, οι μετρήσεις χωρίστηκαν σε τρεις φάσεις του 24ώρου, σε χάραμα, μέρα, νύχτα και υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι για κάθε μια από αυτές τις φάσεις για όλες τις μέρες. Ακόμη, έγινε συσχετισμός των μετρήσεων με τη λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι τιμές VPD για όλες τις χρονικές στιγμές που αναφέρθηκαν πιο πάνω σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$VPD = (\text{EXP}(6,41 + 0,0727 * T - 3 * (1/10^4) * T^2 + 1,18 * (1/10^6) * T^3 - 3,86 * (1/10^9) * T^4) * (1 - RH/100)) / 1000$$

Έπειτα για τις μετρήσεις κάθε αισθητήρα έγινε υπολογισμός των μέσων τιμών, της τυπικής απόκλισης, της μέγιστης διαφοράς μεταξύ των μέσων τιμών, των τυπικών αποκλίσεων των μέσων όρων και της μέσης σχετικής απόκλισης (MRD) των μέσων όρων

Τέλος, ακολούθησε ο σχεδιασμός διαγραμμάτων (με χρήση του excel) και διαγραμμάτων επιφανείας (Contour plots με χρήση του plotly) για καλύτερη αποτύπωση των αποτελεσμάτων.

3. Αποτελέσματα

3.1. Διακύμανση Θερμοκρασίας

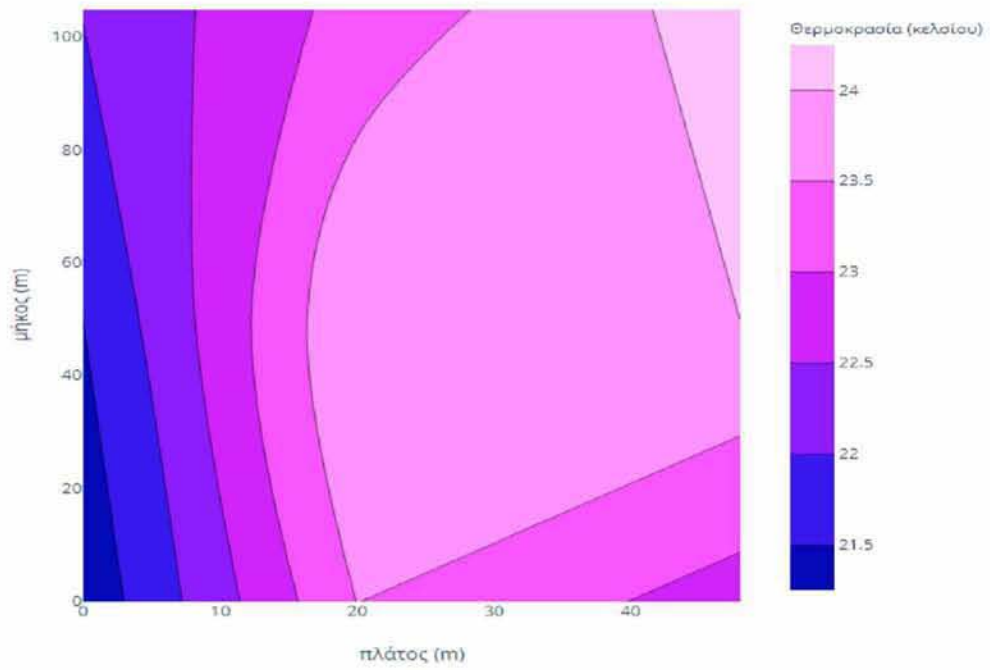
Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου παρουσιάζει μεγαλύτερη ομοιογένεια τις περιόδους της νύχτας και του χαράματος σε σχέση με τη διάρκεια της μέρας. Όταν βρίσκεται σε λειτουργία το σύστημα δροσισμού, οι θερμοκρασιακές αποκλίσεις μεγαλώνουν αρκετά από την υγρή παρειά προς τους ανεμιστήρες. Τέλος, με το σύστημα θέρμανσης επιτυγχάνεται ομοιομορφία στο μεγαλύτερο τμήμα του θερμοκηπίου με τη νοτιοδυτική γωνία να παραμένει αρκετά ψυχρή.

3.1.1. Κατανομή Θερμοκρασίας Μέρα, Νύχτα, Χάραμα

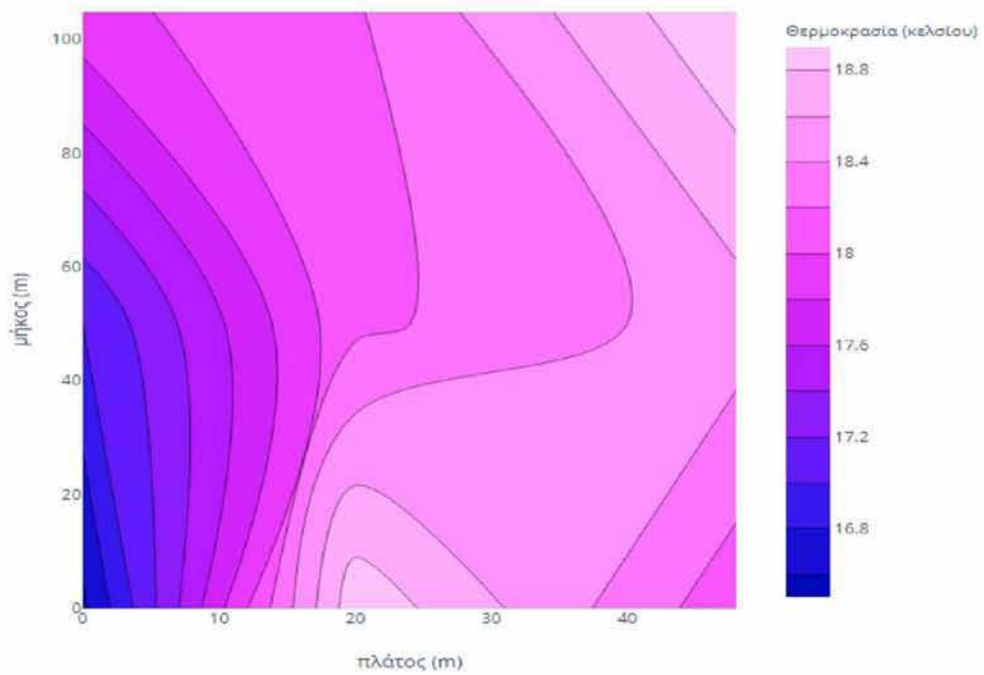
Λαμβάνοντας υπόψη τις μέσες τιμές των μετρήσεων του κάθε αισθητήρα αλλά και την τυπική απόκλιση όπως φαίνεται στον Πίνακα 5, παρατηρείται μεγαλύτερη ομοιογένεια κατά τη διάρκεια του χαράματος και της νύχτας (μέγιστη απόκλιση 2,3 °C και 2,4 °C αντίστοιχα). Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της ημέρας η απόκλιση έφτασε τους 3,1 °C κάτι που μπορεί να δικαιολογηθεί καθώς τις περισσότερες μέρες ήταν σε λειτουργία το σύστημα δροσισμού. Η νοτιοδυτική πλευρά του θερμοκηπίου είναι η πιο ψυχρή σε όλες τις χρονικές περιόδους εξαιτίας της παρειάς στη δυτική πλευρά αλλά και της ύπαρξης στεγάστρου νότια του θερμοκηπίου που σκιάζει κάποιες ώρες τμήμα του θερμοκηπίου (Διαγράμματα 1,2,3).

Πίνακας 5. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) θερμοκρασιών (°C) για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους χαράματος, μέρας και νύχτας. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσων όρων, οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων και η μέση σχετική απόκλιση (MRD) των μέσων όρων.

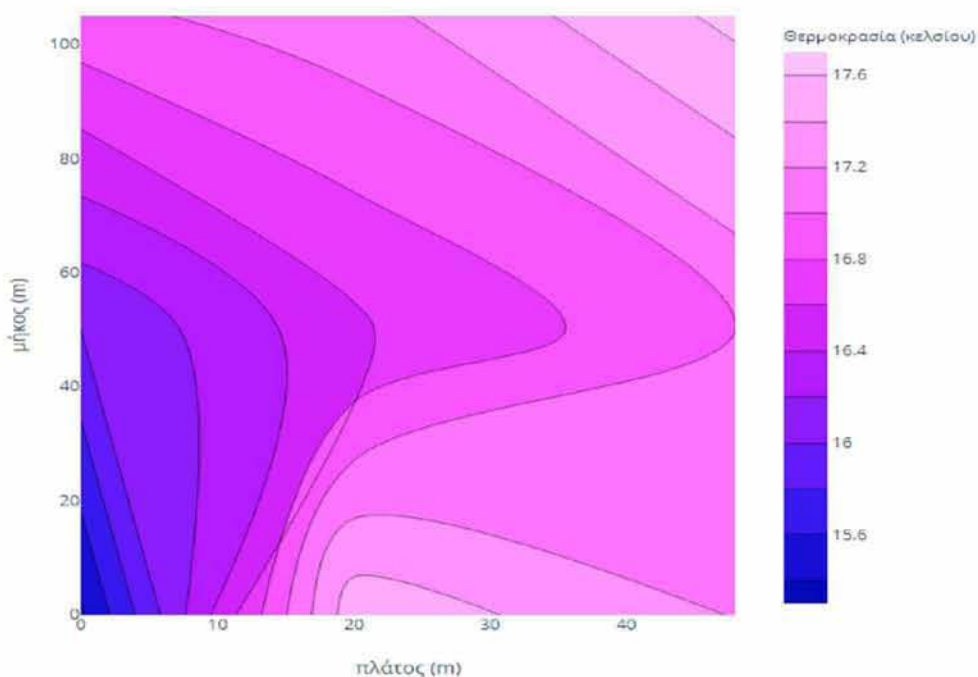
Sensors	Predawn		Day		Night	
	Average	Std	Average	Std	Average	Std
Sensor 1	17,1	1,4	23,1	4,1	18,1	1,7
Sensor 2	15,3	1,2	21,1	3,8	16,5	1,9
Sensor 3	16,9	1,3	22	3,3	17,9	1,7
Sensor 4	16,5	1,3	23,9	4,3	18,1	2
Sensor 5	17,6	1,3	24,2	4,3	18,9	1,8
Sensor 6	17,1	1,3	22,7	4,4	18,1	1,4
Sensor 7	17,5	1,3	23,5	3,7	18,9	1,8
Max dif.	2,3		3,1		2,4	
Avg. Std	0,77		1,09		0,84	



Διάγραμμα 1. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας τη μέρα.



Διάγραμμα 2. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας τη νύχτα.



Διάγραμμα 3. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας το χάραμα.

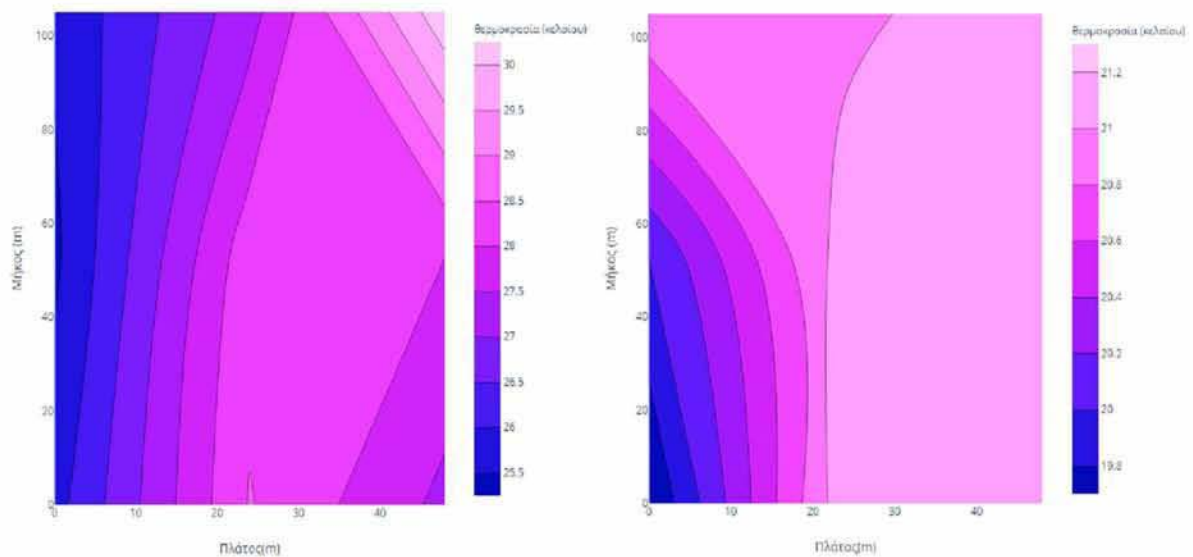
3.1.2. Κατανομή θερμοκρασίας με σύστημα ψύξης και θέρμανσης

Σύμφωνα με τις μέσες τιμές των μετρήσεων (Πίνακας 6) παρατηρούνται μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις τις ώρες λειτουργίας του συστήματος δροσισμού. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4 αυτές εντοπίζονται από τη δυτική προς την ανατολική πλευρά του θερμοκηπίου δηλαδή την πλευρά που βρίσκεται η υγρή παρειά προς την πλευρά των ανεμιστήρων. Η μέγιστη απόκλιση φτάνει τους $4,8^{\circ}\text{C}$ και συγκεκριμένα από τους $25,5^{\circ}\text{C}$ κοντά στην παρειά, στους ανεμιστήρες η θερμοκρασία φτάνει τους $30,3^{\circ}\text{C}$.

Αντίθετα, τις ώρες της ημέρας που δεν είναι σε λειτουργία το σύστημα δροσισμού, η ομοιομορφία θερμοκρασίας είναι αρκετά μεγαλύτερη. Η μέγιστη απόκλιση φτάνει τους $2,1^{\circ}\text{C}$ ενώ και πάλι οι χαμηλότερες θερμοκρασίες εντοπίζονται κοντά στην υγρή παρειά και κυρίως στην νοτιοδυτική γωνία η οποία σκιάζεται κάποιες ώρες από σκέπαστρο δίπλα από το θερμοκήπιο.

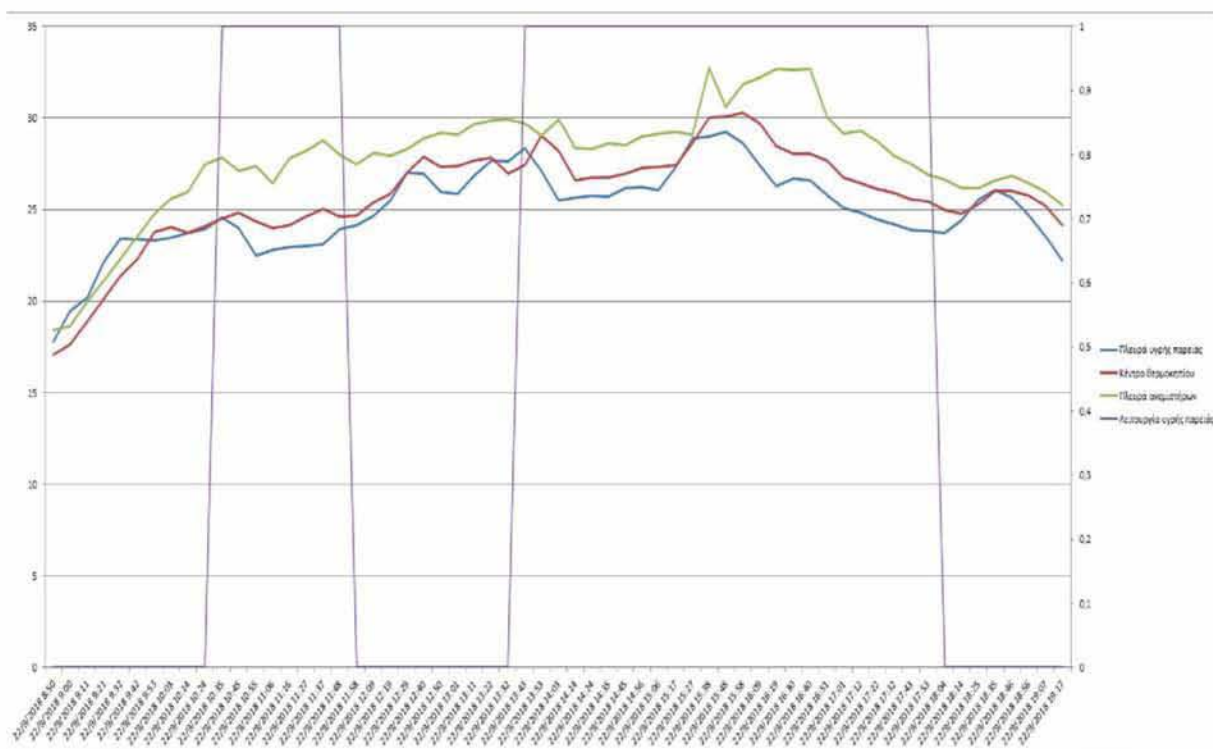
Πίνακας 6. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) θερμοκρασιών (°C) για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους λειτουργίας και μη λειτουργίας του συστήματος δροσισμού. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσω των όρων και οι τυπικές αποκλίσεις των μέσω των όρων.

Sensors	Water P. ON		Day systems OFF	
	Average	Std	Average	Std
Sensor 1	25,5	2,1	20,9	3,2
Sensor 2	27,3	2,3	20,9	3,5
Sensor 3	25,8	2,3	19,6	3,3
Sensor 4	28,3	2,3	21,1	3,8
Sensor 5	28,5	1,6	21,2	3,7
Sensor 6	30,3	3,2	21,7	3,8
Sensor 7	27,3	1,6	21,1	3,3
Max dif.	4,8		2,1	
Avg. Std	1,65		0,65	



Διάγραμμα 4. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας τις ώρες λειτουργίας του συστήματος της υγρής παρειάς (αριστερά) και τις ώρες της ημέρας που δεν λειτουργεί το σύστημα δροσισμού (δεξιά).

Στο Διάγραμμα 5 παρατηρείται ότι κατά την έναρξη της λειτουργίας του συστήματος δροσισμού, η πλευρά κοντά σε αυτή επηρεάζεται άμεσα και μάλιστα σε μόλις 20 λεπτά επιτυγχάνεται πτώση θερμοκρασίας πάνω από 2,5°C. Το κέντρο του θερμοκηπίου επηρεάζεται περίπου 10 λεπτά αργότερα και μπορεί να επιτευχθεί πτώση θερμοκρασίας έως και 2,5°C. Η πλευρά κοντά στους ανεμιστήρες επηρεάζεται 15 με 20 λεπτά αργότερα από την πλευρά κοντά στην παρειά και η πτώση της θερμοκρασίας φτάνει περίπου 1°C με 1,5°C. Αυτό επιβεβαιώνει ότι η αποδοτικότητα του συστήματος δροσισμού με υγρή παρειά μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από το υγρό πάνελ.



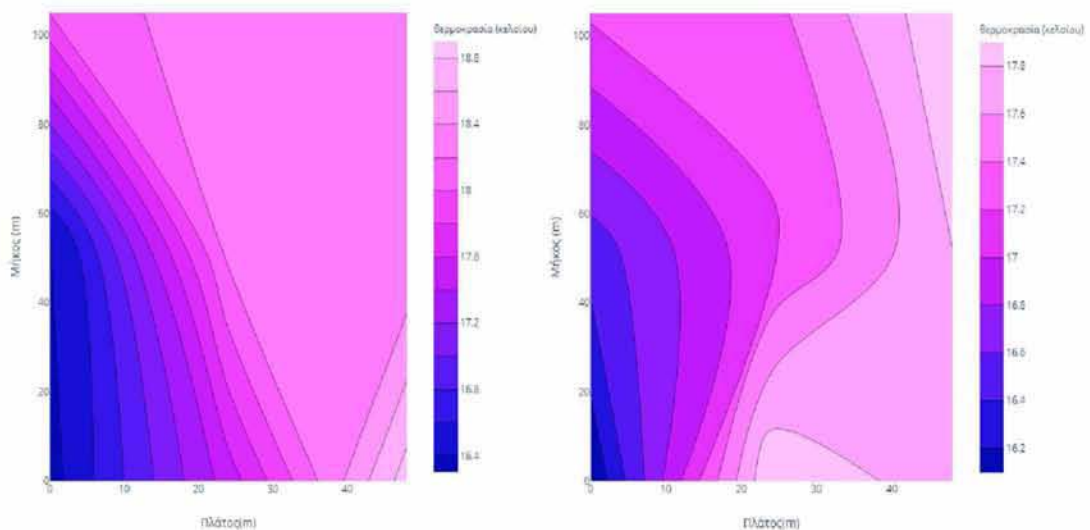
Διάγραμμα 5. Θερμοκρασία αέρα ($^{\circ}\text{C}$) ανάλογα με τη θέση μέσα στο θερμοκήπιο σε συνάρτηση με τη λειτουργία του συστήματος δροσισμού.

3.1.3. Κατανομή θερμοκρασίας με σύστημα θέρμανσης

Τις νυχτερινές ώρες κατά τις οποίες η ομοιομορφία είναι μεγαλύτερη. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 7, η μέγιστη απόκλιση καταγράφεται τις ώρες λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης ($2,6^{\circ}\text{C}$), ενώ όταν δεν λειτουργεί, η μέγιστη απόκλιση φτάνει τους 2°C . Η ομοιομορφία στο μεγαλύτερο τμήμα του θερμοκηπίου είναι μεγαλύτερη όταν λειτουργεί η θέρμανση με τις αποκλίσεις να προκύπτουν από την πλευρά κοντά στην παρειά και κυρίως τη νοτιοδυτική γωνία που παραμένει αρκετά πιο ψυχρή από το υπόλοιπο θερμοκήπιο (Διάγραμμα 6).

Πίνακας 7. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) θερμοκρασιών (°C) για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους λειτουργίας και μη λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσω των όρων και οι τυπικές αποκλίσεις των μέσω των όρων.

Sensors	Heat ON		Night systems OFF	
	Average	Std	Average	Std
Sensor 1	18	2,1	17,2	1,5
Sensor 2	18,3	2,4	17,3	1,6
Sensor 3	16,3	2,7	16	1,5
Sensor 4	18,2	2,4	17,1	1,6
Sensor 5	17,4	2,7	17,6	1,6
Sensor 6	18,3	2,8	17,9	1,6
Sensor 7	18,9	2,3	18	1,6
Max dif.	2,6		2	
Avg. Std	0,83		0,66	



Διάγραμμα 6. Χωρική διαμόρφωση μέσης θερμοκρασίας τις ώρες λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης (αριστερά) και τις νυχτερινές ώρες που δεν είναι σε λειτουργία η θέρμανση.

3.2. Διακύμανση Σχετικής Υγρασίας

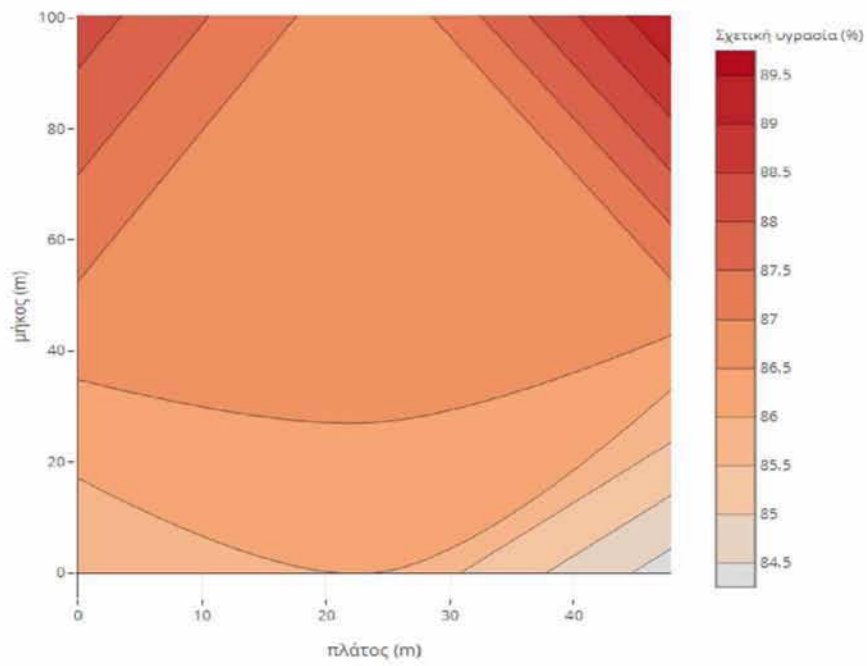
Η σχετική υγρασία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις τις νυχτερινές ώρες και τις ώρες του χαράματος, ενώ τη μέρα οι αποκλίσεις περιορίζονται και εμφανίζονται κυρίως από τη βόρεια προς τη νότια πλευρά. Η χρήση του συστήματος δροσισμού αυξάνει τις αποκλίσεις της υγρασίας, ενώ το σύστημα θέρμανσης δημιουργεί πιο ομοιόμορφο κλίμα.

3.2.1. Κατανομή Σχετικής Υγρασίας Μέρα, Νύχτα, Χάραμα

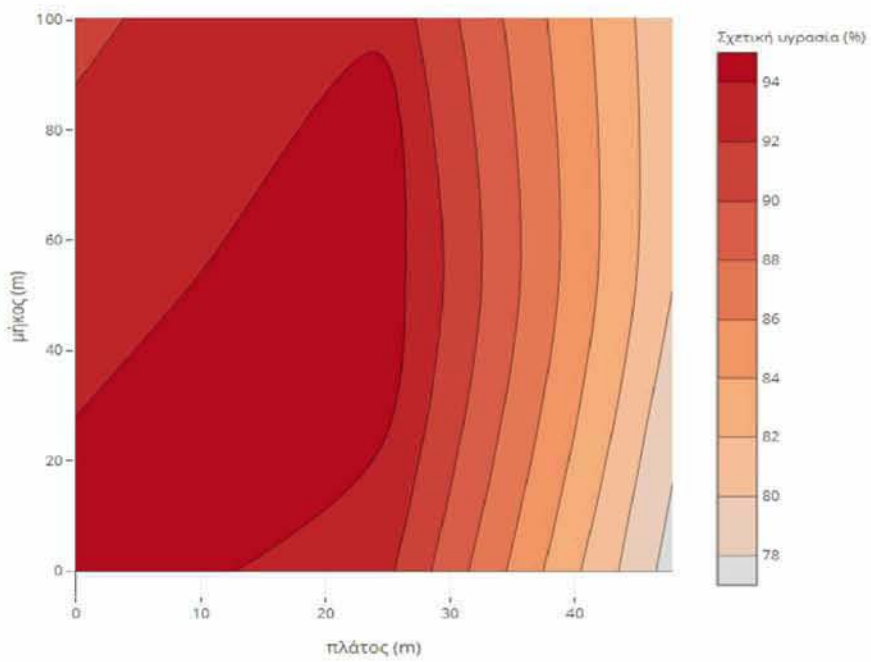
Μεγάλες διακυμάνσεις προέκυψαν στην κατανομή της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας και του χαράματος (18,5% και 26,3% αντίστοιχα) όπως παρατηρείται και στον Πίνακα 8. Σύμφωνα με τα Διαγράμματα 7,8 και 9 παρά το γεγονός ότι πάνω στις γραμμές καλλιέργειας υπάρχει μεγάλη ομοιογένεια, παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των γραμμών και αυτές αποτυπώνονται με σημαντική μείωση της σχετικής υγρασίας στην ανατολική πλευρά του θερμοκηπίου που βρίσκονται οι ανεμιστήρες. Αν και δεν λειτουργούν τις νυχτερινές ώρες ο αέρας εύκολα τους διαπερνά και δημιουργείται ρεύμα με τα παράθυρα οροφής όταν είναι ανοιχτά. Τη μέρα η ομοιογένεια είναι μεγαλύτερη με τη μέγιστη απόκλιση να φτάνει το 5,5% και η διακύμανση να εντοπίζεται από τη βόρεια προς τη νότια πλευρά του θερμοκηπίου.

Πίνακας 8. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) της σχετικής υγρασίας (%) για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους χαράματος, μέρας και νύχτας. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσων όρων και οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων.

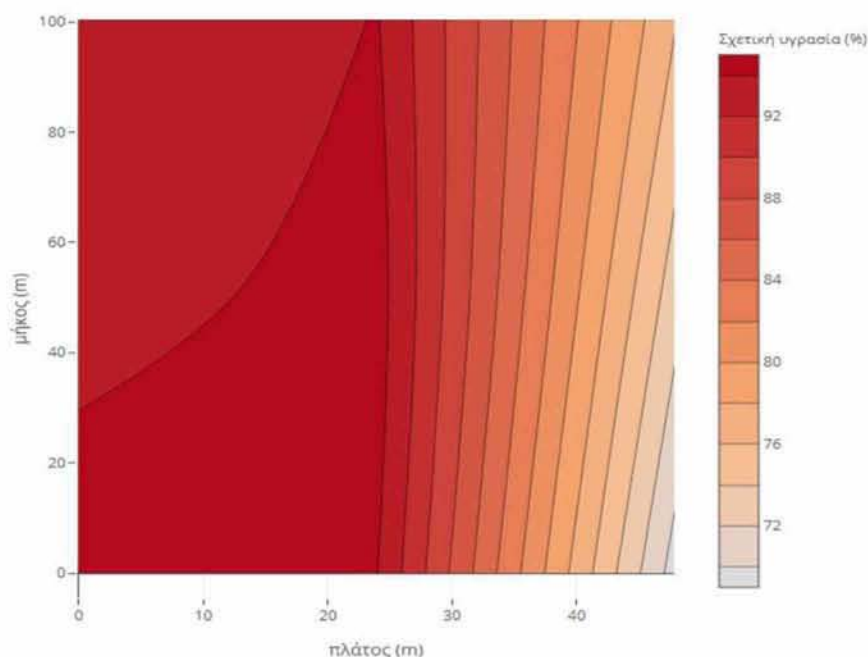
Sensors	Predawn		Day		Night	
	Average	Std	Average	Std	Average	Std
Sensor 1	94	7,4	86,6	11,5	93,6	6,8
Sensor 2	95,3	11,1	85,5	15,6	95,1	9,3
Sensor 3	92,1	4,1	88,3	5,3	91,5	3,8
Sensor 4	94,8	10,4	86,9	12,5	95,5	7,4
Sensor 5	76,3	24,7	89,7	16,8	80,2	21,8
Sensor 6	69	21,2	84,2	17,9	77	18,7
Max dif.	26,3		5,5		18,5	
Avg. Std	11,3		1,9		8,1	



Διάγραμμα 7. Χωρική διαμόρφωση μέσης σχετικής υγρασίας τη μέρα.



Διάγραμμα 8. Χωρική διαμόρφωση μέσης σχετικής υγρασίας τη νύχτα.



Διάγραμμα 9. Χωρική διαμόρφωση μέσης σχετικής υγρασίας το χάραμα.

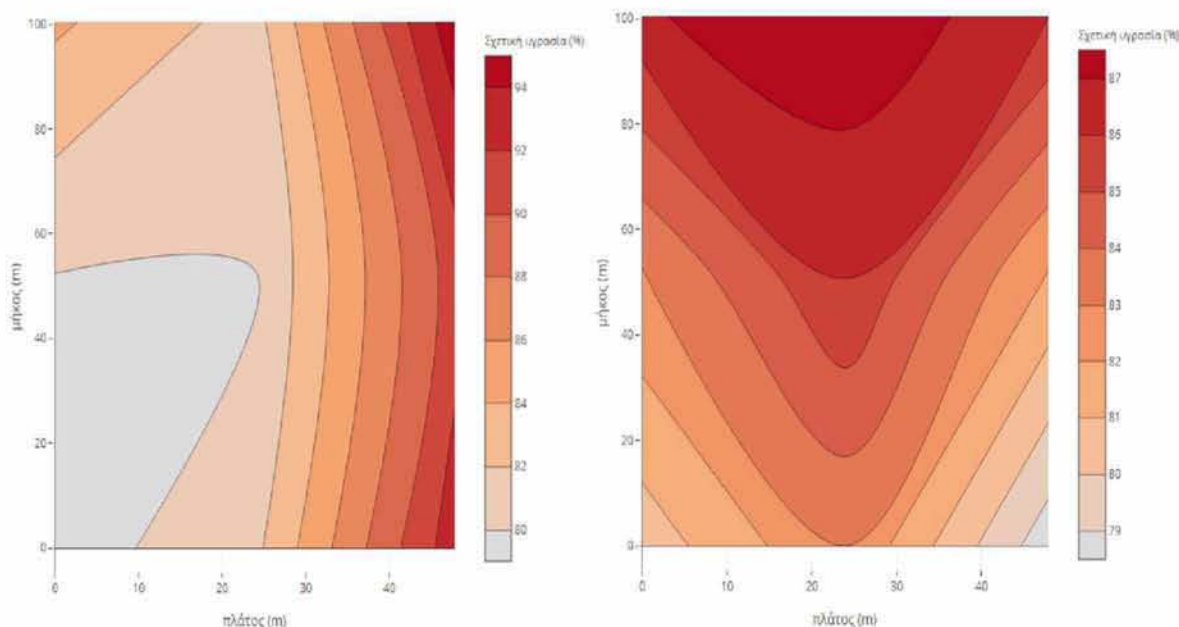
3.2.2. Κατανομή Σχετικής Υγρασίας με Σύστημα Δροσισμού

Όπως συμβαίνει και με τη θερμοκρασία, σύμφωνα με τον Πίνακα 9 όταν το σύστημα δροσισμού λειτουργεί, η ανομοιομορφία σχετικής υγρασίας είναι μεγάλη, με τη μέγιστη απόκλιση να φτάνει το 16,9%. Η πλευρά κοντά στην υγρή παρειά έχει χαμηλότερη σχετική υγρασία με τον ελάχιστο μέσο όρο να είναι στο 78,9% στη νοτιοδυτική γωνία του θερμοκηπίου. Οι μεγαλύτερες τιμές σχετικής υγρασίας εμφανίζονται κοντά στους ανεμιστήρες με το μέγιστο μέσο όρο να φτάνει το 95,8%.

Όταν το σύστημα δροσισμού δεν είναι σε λειτουργία, η ομοιομορφία είναι αρκετά μεγάλη με τη μέγιστη απόκλιση να φτάνει το 8,6%. Σε αυτή την περίπτωση η διακύμανση της σχετικής υγρασίας αλλάζει και οι αποκλίσεις εμφανίζονται μεταξύ της νότιας και βόρειας πλευράς του θερμοκηπίου (Διάγραμμα 10). Η μέγιστη τιμή σχετικής υγρασίας είναι 87,8% στη βόρεια πλευρά και η ελάχιστη 78,3% στη νότια.

Πίνακας 9. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) της σχετικής υγρασίας (%) για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους λειτουργίας και μη λειτουργίας του συστήματος ψύξης. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσω των όρων και οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων.

Sensors	Water P. ON		Day systems OFF	
	Average	Std	Average	Std
Sensor 1	84,7	2,1	86,9	5,9
Sensor 2	81,5	9,1	87,8	12,3
Sensor 3	78,9	11,1	80,4	22,6
Sensor 4	79,9	10,1	86,1	14,6
Sensor 5	93,2	4,6	78,3	16,7
Sensor 6	95,8	3,1	86,3	19,2
Max dif.	16,9		8,6	
Avg. Std	7,16		3,93	



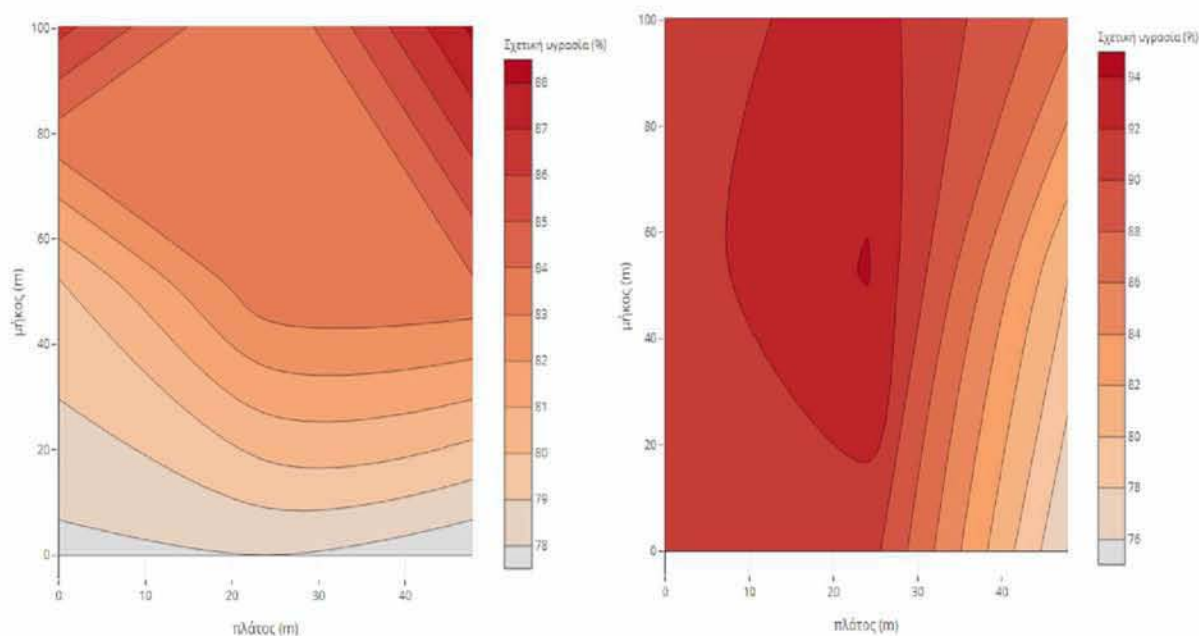
Διάγραμμα 10. Χωρική κατανομή μέσης σχετικής υγρασίας τις ώρες λειτουργίας του συστήματος δροσισμού (αριστερά) και τις ώρες της μέρας που δεν λειτουργεί (δεξιά).

3.2.3. Κατανομή Σχετικής Υγρασίας με Σύστημα Θέρμανσης

Τις νυχτερινές ώρες όπου το σύστημα θέρμανσης είναι ανενεργό, η υψηλή σχετική υγρασία κυριαρχεί στο μεγαλύτερο τμήμα του θερμοκηπίου. Η μέγιστη μέση τιμή πάρθηκε στο κέντρο του θερμοκηπίου (94,1%), ενώ η χαμηλότερη στη νοτιοανατολική γωνία (75,8%) (Πίνακας 10). Γενικά, στην ανατολική πλευρά που βρίσκονται οι ανεμιστήρες προέκυψαν οι χαμηλότερες μέσες τιμές σχετικής υγρασίας λόγω του αέρα που μπορεί να τους διαπερνά ακόμα και όταν δεν λειτουργούν (Διάγραμμα 11).

Πίνακας 10. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) της σχετικής υγρασίας (%) για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους λειτουργίας και μη λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσω των όρων και οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων.

Sensors	Heat ON		Night systems OFF	
	Average	Std	Average	Std
Sensor 1	86,9	3,9	90,7	3,3
Sensor 2	83,1	10,2	92,9	8,2
Sensor 3	77,7	21,4	91,7	15,7
Sensor 4	83,9	13,6	94,1	9,3
Sensor 5	77,1	21,9	75,8	15,4
Sensor 6	88,6	15,6	87,2	13,2
Max dif.	11,5		18,35	
Avg. Std	4,69		6,75	



Διάγραμμα 11. Χωρική κατανομή μέσης σχετικής υγρασίας τις ώρες λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης (αριστερά) και τις νυχτερινές ώρες που δεν λειτουργούσε (δεξιά)

Με τη λειτουργία του συστήματος θέρμανσης επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της σχετικής υγρασίας και μεγαλύτερη ομοιομορφία στο θερμοκήπιο. Η μέγιστη μέση τιμή είναι 88,6% και η ελάχιστη 77,1%, με τη μέγιστη απόκλιση στο 11,5% από 18,3% που καταγράφηκε όταν δεν λειτουργούσε το σύστημα θέρμανσης (Πίνακας 10). Γενικά, οι αποκλίσεις εμφανίζονται μεταξύ της βόρειας και νότιας πλευράς του θερμοκηπίου με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στη βόρεια (Διάγραμμα 11).

3.3. Διακύμανση Vapor Pressure Deficit

Οι τιμές του VPD εμφανίζουν μεγαλύτερες αποκλίσεις κατά τη διάρκεια του χαράματος σε σχέση τη μέρα. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι επιδράσεις των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης, με το πρώτο να αυξάνει την ομοιομορφία και το δεύτερο την ανομοιομορφία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

3.3.1. Διακύμανση Vapor Pressure Deficit Μέρα, Νύχτα, Χάραμα

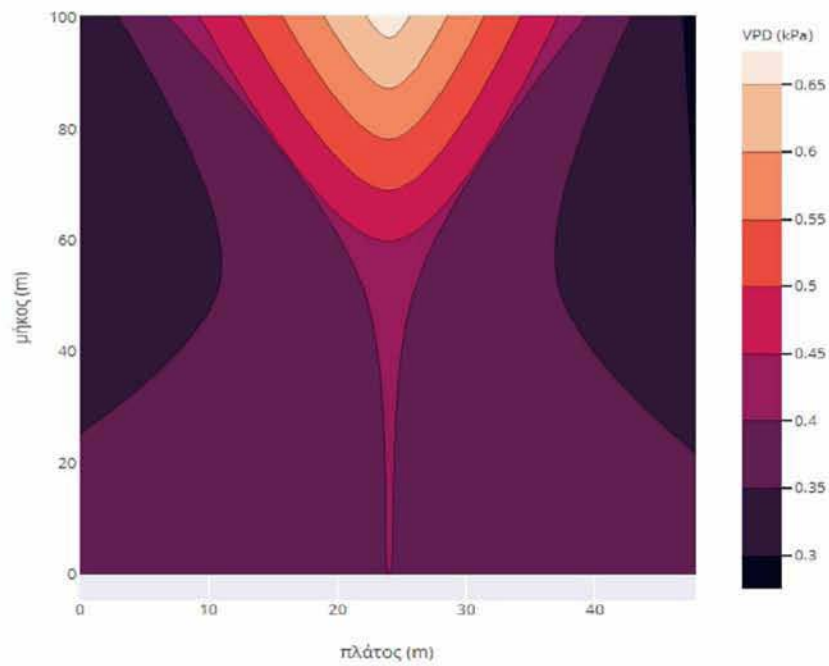
Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 11 οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις εντοπίζονται στις ώρες του χαράματος με μέγιστη απόκλιση 0.52 kPa, ενώ την μέρα και τη νύχτα η απόκλιση φτάνει το 0.42 kPa και 0.39 kPa αντίστοιχα.

Κατά τη διάρκεια της μέρας οι τιμές του VPD βρίσκονται σε υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με τη νύχτα και το χάραμα. Στις μεσαίες σειρές του θερμοκηπίου το VPD είναι μεγαλύτερο, ενώ αυξάνεται από νότο προς βορρά. Στις ακραίες σειρές παραμένει σε χαμηλά επίπεδα σε όλο το μήκος του θερμοκηπίου.

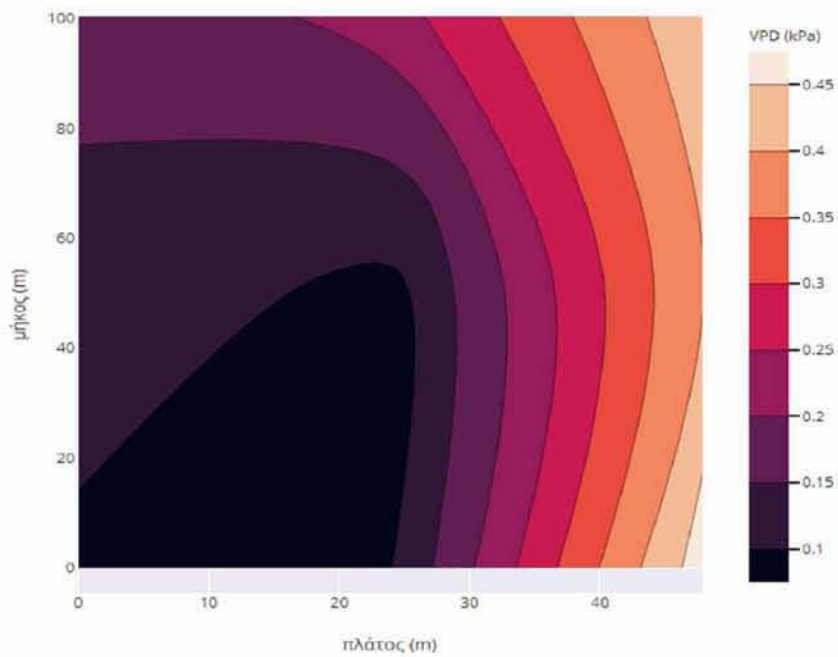
Κατά τη διάρκεια της νύχτας και του χαράματος οι τιμές VPD βρίσκονται σε αρκετά χαμηλότερα επίπεδα. Εκεί οι διακυμάνσεις δημιουργούνται μεταξύ των πλευρών της υγρής παρειάς και των ανεμιστήρων. Οι τιμές αυξάνονται από την παρειά προς τους ανεμιστήρες (Διαγράμματα 13 και 14).

Πίνακας 11. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) VPD (kPa) για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους χαράματος, μέρας και νύχτας. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσω των όρων και οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων.

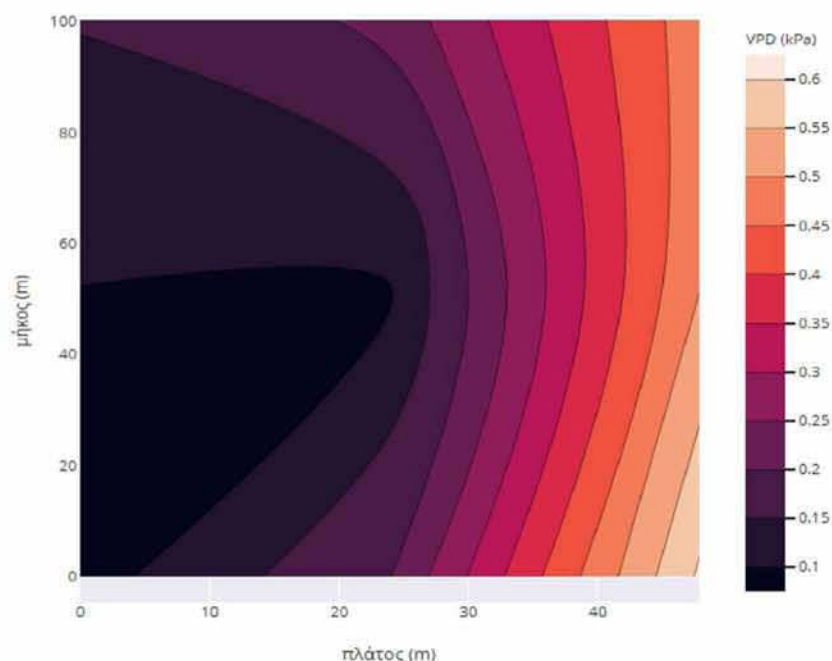
Sensors	Predawn		Day		Night	
	Average	Std	Average	Std	Average	Std
Sensor 1	0,22	0,45	0,69	0,85	0,23	0,44
Sensor 2	0,078	0,17	0,4	0,4	0,08	0,16
Sensor 3	0,15	0,08	0,32	0,18	0,17	0,08
Sensor 4	0,1	0,2	0,4	0,4	0,09	0,144
Sensor 5	0,48	0,5	0,27	0,39	0,44	0,49
Sensor 6	0,6	0,4	0,38	0,36	0,47	0,39
Max dif.	0,52		0,42		0,39	
Avg. Std	0,21		0,14		0,22	



Διάγραμμα 12. Χωρική κατανομή μέσης τιμής VPD κατά τη διάρκεια της μέρας.



Διάγραμμα 13. Χωρική κατανομή μέσης τιμής VPD κατά τη διάρκεια της νύχτας.



Διάγραμμα 14. Χωρική κατανομή μέσης τιμής VPD κατά τη διάρκεια του χαράματος.

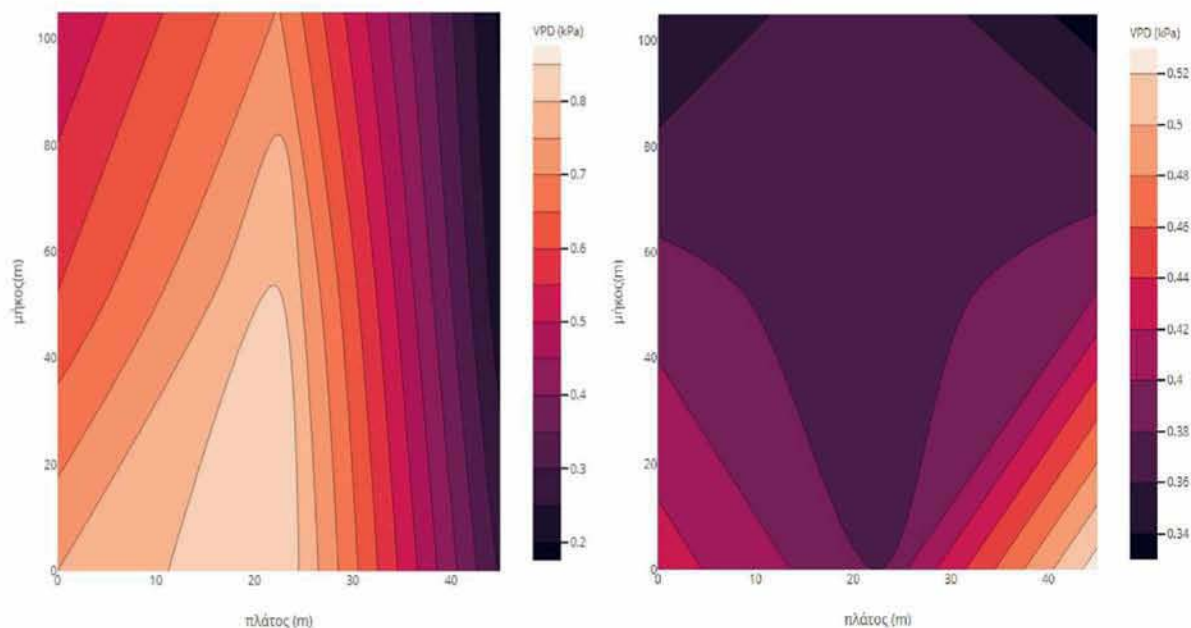
3.3.2. Κατανομή VPD με Σύστημα Δροσισμού

Τις ώρες λειτουργίας του συστήματος δροσισμού η ανομοιομορφία στις τιμές VPD είναι μεγάλη. Η μέγιστη απόκλιση φτάνει τα 0.62 kPa και εμφανίζεται από τη νοτιοδυτική προς τη βορειοανατολική γωνία. Οι τιμές του VPD παρουσιάζουν αύξηση από τη πλευρά της παρειάς προς την πλευρά των ανεμιστήρων, και περιορίζεται απότομα κοντά στους ανεμιστήρες λόγω της πολύ υψηλής σχετικής υγρασίας.

Πίνακας 12. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) VPD (kPa) για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους λειτουργίας και μη λειτουργίας του συστήματος ψύξης. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσω των όρων και οι τυπικές αποκλίσεις των μέσω των όρων.

Sensors	Water P. ON		Day systems OFF	
	Average	Std	Average	Std
Sensor 1	0,5	0,12	0,33	0,19
Sensor 2	0,7	0,43	0,31	0,34
Sensor 3	0,75	0,46	0,43	0,52
Sensor 4	0,81	0,5	0,36	0,39
Sensor 5	0,29	0,28	0,53	0,41
Sensor 6	0,19	0,16	0,33	0,46
Max dif.	0,62		0,22	
Avg. Std	0,25		0,08	

Κατά τη διάρκεια της μέρας που το σύστημα δροσισμού είναι κλειστό η ομοιομορφία είναι μεγαλύτερη και η μέγιστη απόκλιση φτάνει τα 0.22 kPa. Η διακύμανση εμφανίζεται κυρίως με μείωση της τιμής από τη νότια προς τη βόρεια πλευρά του θερμοκηπίου (Διάγραμμα 15).



Διάγραμμα 15. Χωρική διαμόρφωση μέσης τιμής VPD κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος δροσισμού (αριστερά) και κατά τη διάρκεια της μέρας χωρίς τη λειτουργία του συστήματος (δεξιά).

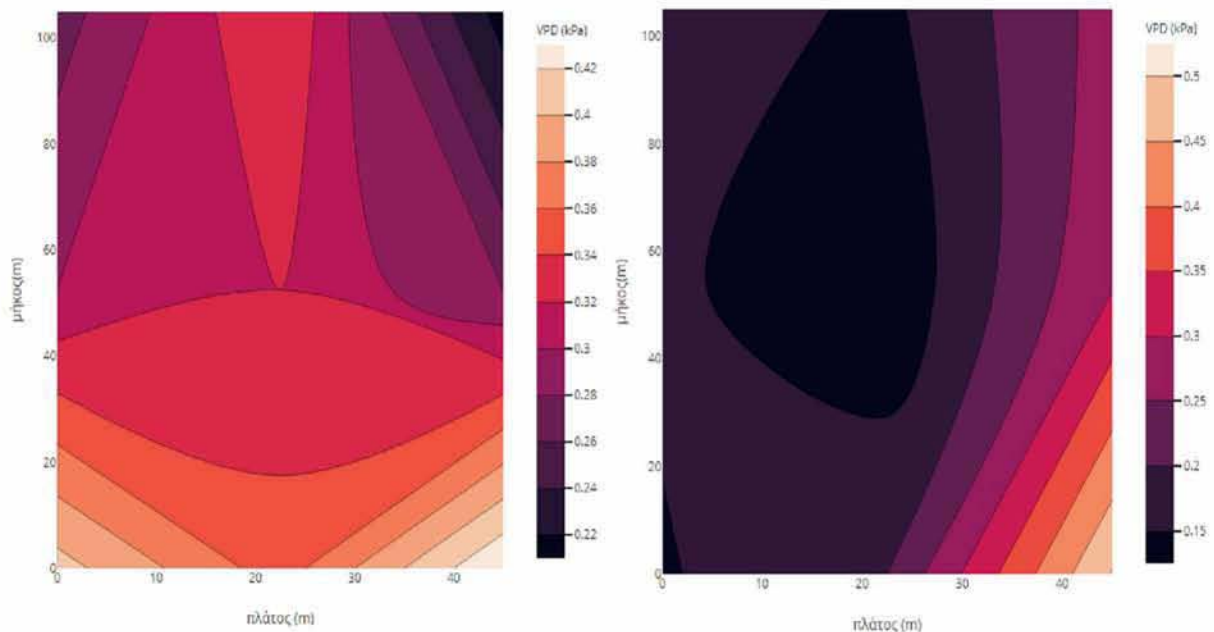
3.3.3. Κατανομή VPD με Σύστημα Θέρμανσης

Κατά τις νυχτερινές ώρες που δεν λειτουργεί το σύστημα θέρμανσης η ανομοιομορφία είναι μεγάλη με μέγιστη απόκλιση τα 0.39 kPa. Ακόμη οι τιμές βρίσκονται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα με τη μέση τιμή να βρίσκεται στα 0.22 kPa, κάτι που δεν είναι αντιπροσωπευτικό, καθώς στο μεγαλύτερο μέρος του θερμοκηπίου οι τιμές βρίσκονται κοντά στα 0.15 kPa.

Με το σύστημα θέρμανσης δημιουργούνται πιο ομοιόμορφες συνθήκες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου με τη μέγιστη απόκλιση στην τιμή VPD να φτάνει τα 0.23 kPa. Εκτός από αυτό, δημιουργούνται πιο ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη των φυτών καθώς υπάρχει σημαντική αύξηση στις τιμές VPD με τη μέση τιμή να φτάνει τα 0.33 kPa (Πίνακας 13).

Πίνακας 13. Μέσες τιμές και τυπική απόκλιση (Std) VPD (kPa) για κάθε αισθητήρα για τις περιόδους λειτουργίας και μη λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης. Ακόμη περιλαμβάνονται, μέγιστες διαφορές μέσω των όρων και οι τυπικές αποκλίσεις των μέσω των όρων.

Sensors	Heat ON		Night systems OFF	
	Average	Std	Average	Std
Sensor 1	0,27	0,09	0,18	0,07
Sensor 2	0,34	0,22	0,13	0,16
Sensor 3	0,40	0,38	0,14	0,27
Sensor 4	0,32	0,26	0,11	0,17
Sensor 5	0,44	0,43	0,50	0,35
Sensor 6	0,21	0,31	0,27	0,29
Max dif.	0,23		0,39	
Avg. Std	0,08		0,14	



Διάγραμμα 16. Χωρική διαμόρφωση μέσης τιμής VPD κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης (αριστερά) και κατά τη διάρκεια της νύχτας χωρίς τη λειτουργία του συστήματος (δεξιά).

4. Συμπεράσματα και Συζήτηση

Στην παρούσα ερευνητική εργασία μελετήθηκαν οι κλιματικές συνθήκες στο εσωτερικό ενός εμπορικού θερμοκηπίου παραγωγής αγγουριού, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την ομοιομορφία του κλίματος.

Αρχικά, μελετήθηκε η ομοιομορφία του κλίματος σε τρεις χρονικές περιόδους μέσα στην ημέρα, το χάραμα, τη μέρα και τη νύχτα. Στην συνέχεια έγινε συσχετισμός των κλιματικών συνθηκών με το σύστημα θέρμανσης και το σύστημα δροσισμού, ώστε να αποδειχθεί ο τρόπος που επιδρούν στο κλίμα.

Για την υλοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων που κατέγραφαν τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία σε διάφορα σημεία του θερμοκηπίου κάθε δέκα λεπτά. Με βάση αυτές τις μετρήσεις έγινε υπολογισμός του Vapor pressure deficit, καθώς αυτός ο δείκτης συνδέει άμεσα τις κλιματικές συνθήκες με τα φυτά και τις ανάγκες τους. Οι παραπάνω μετρήσεις απλοποιήθηκαν και έγινε γραφική αναπαράσταση προκειμένου να γίνουν πιο εύκολα κατανοητές και να εξαχθούν πιο ασφαλή συμπεράσματα.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει μεγάλη ανομοιομορφία κλίματος στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Η θερμοκρασία εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις τις ώρες της ημέρας, με τις αποκλίσεις να περιορίζονται τη νύχτα και το χάραμα. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται από τους Ferentinos et al. (2016). Αντίθετα, όσον αφορά τη σχετική υγρασία, οι αποκλίσεις είναι μεγάλες τις νυχτερινές ώρες και τις ώρες του χαράματος. Τη μέρα οι αποκλίσεις είναι μικρές και εμφανίζονται μεταξύ της νότιας και βόρειας πλευράς του θερμοκηπίου. Οι διακυμάνσεις των τιμών του VPD είναι παρόμοιες με αυτές της σχετικής υγρασίας και έτσι οι μεγαλύτερες αποκλίσεις εμφανίζονται τις ώρες του χαράματος.

Όσον αφορά στο συσχετισμό των μετρήσεων με το σύστημα δροσισμού διαπιστώθηκαν σημαντικές διακυμάνσεις. Αρχικά, η θερμοκρασία του θερμοκηπίου παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις την ώρα λειτουργίας του συστήματος δροσισμού με σημαντική αύξηση από την πλευρά της παρειάς προς την πλευρά των ανεμιστήρων. Όπως αναφέρουν και οι Ferentinos et al. (2016), ο αέρας περνά μέσα από την υγρή παρειά και ψύχεται, ενώ στη συνέχεια καθώς διασχίζει το θερμοκήπιο θερμαίνεται και τελικά φτάνει στους ανεμιστήρες με αρκετά υψηλότερη θερμοκρασία. Τις ώρες της μέρας που το σύστημα δεν λειτουργεί η θερμοκρασία παραμένει πιο υψηλή στην πλευρά των αισθητήρων. Με παρόμοιο τρόπο μεταβάλλεται και η σχετική υγρασία τις ώρες λειτουργίας του δροσισμού, παρουσιάζοντας μεγάλες αποκλίσεις. Αρχικά, ο δείκτης VPD παρουσιάζει αύξηση από την παρειά προς τους ανεμιστήρες, ενώ στη συνέχεια μειώνεται κοντά στους ανεμιστήρες λόγω της πολύ υψηλής υγρασίας.

Το σύστημα θέρμανσης αντίθετα με το σύστημα δροσισμού αυξάνει την ομοιομορφία του κλίματος. Όμως, το σημαντικότερο είναι ότι αυξάνει την ελάχιστη θερμοκρασία και μειώνει την σχετική υγρασία δημιουργώντας ευνοϊκότερες συνθήκες για την ανάπτυξη των φυτών. Αυτό φαίνεται και από τη διακύμανση του δείκτη VPD με αύξηση από 0.23 kPa τις νύχτες χωρίς θέρμανση, σε 0.33 kPa τις νύχτες με θέρμανση. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σύμφωνα με αυτά των Shamshiri et al. (2018), οι οποίοι αναφέρουν ότι οι τιμές VPD θα πρέπει να κυμαίνονται από 0.3 kPa έως 1.0 kPa.

Τελικά, η ανομοιομορφία κλίματος στο θερμοκήπιο είναι μεγάλη και δεν πρέπει να θεωρείται αμελητέα. Ως συμπέρασμα προκύπτει ότι η διαχείριση του κλίματος και της άρδευσης του θερμοκηπίου για επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης δεν πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας στοιχεία μόνο από ένα σημείο στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Η γνώση του μικροκλίματος του θερμοκηπίου σε συνδυασμό με τις απαραίτητες γνώσεις για την ανάπτυξη των φυτών μπορούν να δημιουργήσουν τις προϋποθέσεις για σημαντική αύξηση της παραγωγής και της ποιότητας των προϊόντων. Ακόμη, η οικονομία άρδευσης που θα προκύψει, συμβάλλει σημαντικά στην προστασία του περιβάλλοντος και στην μείωση του κόστους παραγωγής.

5. Βιβλιογραφία

Ελληνική βιβλιογραφία

- Δασκαλάκης, Γ., Κατσούλας, Ν., Βλόντζος, Γ., Λιβιεράτος, Ι., Tchamitchian, M., & Κίττας, Κ. (2013). *Παρουσίαση συνεδρίου Ε.Γ.Μ.Ε. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΙΣΡΟΩΝ-ΕΚΡΟΩΝ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ*. Βόλος.
- Κατσούλας, Ν. (2002). Επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος στη διαπνοή τριανταφυλλιάς υπό κάλυψη. *Διδακτορική Διατριβή*.
- Κατσούλας, Ν., & Κίττας, Κ. (2011). Σημειώσεις μαθήματος ‘Συστήματα Υδροπονικών Καλλιεργειών’.
- Κατσούλας, Ν., & Κίττας, Κ. (2013). Σημειώσεις μαθήματος ‘Γεωργικές Κατασκευές-Θερμοκήπια’.
- Κατσούλας, Ν., Κίττας, Κ., & Μπαρτζάνας, Θ. (2011, Δεκέμβριος). Γεωργία - Κτηνοτροφία. Δυνατότητες και προοπτικές εξάπλωσης θερμοκηπίων στην Ελλάδα, 19–28.
- Κρατερός Γιάννης. (2018). Μικρά και σταθερά βήματα κάνουν οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες, πρόκληση η καθετοποίηση. *Υπαιθρος χώρα*.
- Λόλας, Π. Χ. (2000). Φυσιολογία φυτού. Σημειώσεις. Βόλος: Πανεπιστημιακές εκδόσεις Θεσσαλίας.
- Μαυρογιαννόπουλος, Γ. (2001). *ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ* (Γ). Αθήνα: ΣΤΑΜΟΥΛΗ Α.Ε.
- Μαυρογιαννόπουλος, Γ. (2005). *ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ* (Δ). Αθήνα: ΣΤΑΜΟΥΛΗ Α.Ε.
- Μπαρτζάνας, Θ. (2004). Διαχείριση της υψηλής υγραμετρίας σε ελληνικά θερμοκήπια. *Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας*.
- Ολύμπιος, Χ. Μ. (2001). Η τεχνική της καλλιέργειας των κηπευτικών στα θερμοκήπια. Εκδόσεις Σταμούλη.
- Σάββας Δημήτριος. (2011). *ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΕΚΤΟΣ ΕΛΑΦΟΥΣ: Υδροπονία, Υποστρώματα*. Αθήνα: ΑγροΤυπος.
- Τσέκος, Ι. Β. (2003). Φυσιολογία φυτών Τόμος Ι. Θεσσαλονίκη: Εκδοτικός Οίκος Αδελφών Κυριακίδη Α.Ε.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- Bakker, J.C., Welles, G.W.H., & Van Uffelen, J.A.M. (2015). The effects of day and night humidity on yield and quality of glasshouse cucumbers. *Journal of horticultural Science*, 62(3), 363–370.
- Berghage, R. (1998). Controlling Height with Temperature. *HortTechnology*, 8, 4.
- Darlington, A.B., Dixon, M.A., Tsujita, M.J. (1992). The influence of humidity control on the

- production of greenhouse roses (*Rosa hybrida*). *Scientia Horticulturae*, 49 (3–4), 291–303. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(92\)90165-9](https://doi.org/10.1016/0304-4238(92)90165-9)
- Ferentinos, K.P., Katsoulas, N., Tzounis, A., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2016). Wireless sensor networks for greenhouse climate and plant condition assessment. *Biosystems Engineering*, 153, 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.11.005>
- Franklin Bedford, T. (2013). *Climates in miniature. A study of micro-climate and environment*. Literary Licensing.
- Gert, V. (2017). Different types of hydroponic systems : farming for tomorrow. *Farmer's Weekly*, 2017, 26–27.
- Giacomelli, G.A. (2002). Considerations for energy management of greenhouse heating and cooling. *Southern greenhouse Vegetable Growers Association Conference, Shreveport, LA*.
- Grange, R.I., & Hand, D.W. (2015). A review of the effects of atmospheric humidity on the growth of horticultural crops. *Journal of horticultural Science*, 62, 125–134.
- Hart, J.W. (1988). *Light and plant growth*. London: Academic division of Unwin Hyman Ltd.
- Heuvelink, E. (1989). Influence of day and night temperature on the growth of young tomato plants. (1989). *Scientia Horticulturae* 38 (529), 11–22.
- Holder, R., Cockshull, K.E. (1990). Effects of humidity on the growth and yield of glasshouse tomatoes. *Journal of Horticultural Science*, 65(1), 31–39. <https://doi.org/10.1080/00221589.1990.11516025>
- Kacira, M., Sase, S., Okushima, L., & Ling, P. (2005). Plant Response-Based Sensing for Control Strategies in Sustainable Greenhouse Production, *J. Agric. Meteorol.* 15–22.
- Katsoulas, N., Ferentinos, K.P., Tzounis, A., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2015). Spatially distributed greenhouse climate control based on wireless sensor network measurements. *ISHS Acta Horticulturae* 1154: International Symposium on Applications of Modelling as an Innovative Technology in the Horticultural Supply Chain - Model-IT 2015
- Kittas, C., Bartzanas, T., & Jaffrin, A. (2003). Temperature gradients in a partially shaded large greenhouse equipped with evaporative cooling pads. *Biosystems Engineering* 85, 87–94. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00018-7)
- Papadakis, G., Briassoulis, D., Mungozza, G.S., Vox, G., Feuilleley, P., & Stoffers, J.A. (2000). Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 77(1), 7–38.
- Shamshiri, R.R., Jones, J.W., Thorp, K.R., Ahmad, D., Man, H., Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature , humidity , and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato : a review. *Int. Agrophys.*, 32,

- 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*.
- Takakura, T., Kubota, C., Sase, S., Hayashi, M., Ishii, M., Takayama, K., Giacomelli, G. A. (2009). Measurement of evapotranspiration rate in a single-span greenhouse using the energy-balance equation. *Biosystems Engineering*, 102(3), 298–304. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.12.004>
- Teh, C. (2006). Introduction to mathematical modeling of crop growth: How the equations are derived and assembled into a computer model. *BrownWalker Press*.
- Uzun, S. (2006). The quantitative effects of temperature and light on the number of leaves preceding the first fruiting inflorescence on the stem of tomato (*Lycopersicon esculentum*, Mill.) and aubergine (*Solanum melongena* L.). (2006). *Scientia Horticulturae*, 109 (2), 142-146.

Βιβλιογραφία από ιστοσελίδες

- Ιστότοπος 1: Press Release. (2019). Cuesta Roble releases 2019 global greenhouse statistics. Ανακτήθηκε από <https://www.producegrower.com/article/cuesta-roble-2019-global-greenhouse-statistics/>
- Ιστότοπος 2: Press Release. (2017). Global Greenhouse Vegetable Area- By Continent. Ανακτήθηκε από <https://eprnews.com/global-greenhouse-vegetable-area-by-continent-118315/>
- Ιστότοπος 3: Γαίας Έργον Ψύξη- Δροσισμός (2017). Ανακτήθηκε από <https://www.gaiasergon.gr/services/climate-management/cooling/>