

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος

Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος

Πτυχιακή Διατριβή

**«Προσομοίωση του μικροκλίματος και της παραγωγής καλλιέργειας αγγουριού σε
θερμοκήπιο»**



Τριανταφυλλόπουλος Παύλος

Επιβλέπων: Κατσούλας Νικόλαος, Καθηγητής

Βόλος, 2020

Τίτλος εργασίας

Προσομοίωση του μικροκλίματος και της παραγωγής καλλιέργειας αγγουριού σε
θερμοκήπιο

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Νικόλαος Κατσούλας, Καθηγητής, Γεωργικές Κατασκευές - Θερμοκήπια, Π.Θ.

Σπυρίδων Πετρόπουλος, Επ. Καθηγητής Λαχανοκομίας, Π.Θ. (Μέλος)

Ευαγγελινή Κίττα, Ε.ΔΙ.Π., Π.Θ. (Μέλος)

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 πρόεδρο του Αγροτικού Συνεταιρισμού Παραγωγών Οπωροκηπευτικών Βόλου κ. Κωσταντίνο Γκόγκο καθώς και σε όλους τους εργαζομένους του θερμοκηπίου για την άριστη συνεργασία και βοήθεια που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον ερευνητή της TNO, Building Physics & Systems στο Delft, South Holland, Netherlands κ. Αθανάσιο Σαπουνά καθώς και την ερευνήτρια του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κα. Σοφία Φαλιάγκα για την βοήθεια τους και το ευχάριστο κλίμα που δημιούργησε από την αρχή της διεξαγωγής του πειράματος.

Περίληψη

Με την πάροδο των χρόνων, οι θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις έχουν εξελιχθεί σε εγκαταστάσεις υψηλής τεχνολογίας με αυτοματοποιημένα και προηγμένα συστήματα για τον έλεγχο του κλίματος, της άρδευσης, την παρακολούθηση της ανάπτυξης των καλλιεργειών, τη συγκομιδή, την εσωτερική μεταφορά, τη διαλογή και τη συσκευασία των προϊόντων. Όμως, η επιλογή του κατάλληλου τύπου θερμοκηπίου και των υλικών κατασκευής, ανάλογα με το κλίμα κάθε περιοχής, είναι πολύπλοκοι παράγοντες, οι οποίοι μπορεί να επιφέρουν μείωση ή αύξηση της παραγωγής. Γι' αυτό τα σύγχρονα θερμοκήπια υψηλής τεχνολογίας είναι ένας συνδυασμός διαφόρων τεχνικών συστημάτων, τα οποία αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους.

Το SIOM (System Integration and Optimization Model) είναι ένα μοντέλο το οποίο λειτουργεί ως προσωπικός σύμβουλος για κατασκευαστές και καλλιεργητές, καθώς παρέχει άμεση εικόνα των αποτελεσμάτων που θα έχει μελλοντικά η κάθε επιλογή που θα αποφασιστεί. Με την χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου δίνεται πρόσβαση σε μια εκτεταμένη βάση δεδομένων με ειδικά εξαρτήματα και συστήματα για το θερμοκήπιο, όπως η κατασκευή, η θέρμανση, ο εξαερισμός, η ψύξη και η άρδευση και η δυνατότητα να συγκριθούν διαφορετικές σχεδιαστικές παραλλαγές του θερμοκηπίου μεταξύ τους.

Στην Ελλάδα, η θερμοκηπιακή καλλιέργεια του αγγουριού αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές καλλιέργειες κηπευτικών. Τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει η καλλιέργειά του και σε υδροπονικά συστήματα (με μικρές εκτάσεις προς το παρόν), ωστόσο λόγω της συνεχούς αύξησης της ζήτησης προϊόντων υδροπονικής καλλιέργειας αναμένεται ο αριθμός της υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριού να αυξηθεί.

Στην παρούσα πτυχιακή διατριβή διεξήχθη μια πειραματική μελέτη σε ένα θερμοκήπιο υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριού, με σκοπό την σύγκριση της πραγματικής ανάπτυξης των φυτών σε σχέση με την προσδοκώμενη ανάπτυξη που προέκυψε από το υπολογιστικό μοντέλο SIOM. Τα κλιματολογικά δεδομένα που συλλέχθηκαν, εισήχθησαν με μορφή δεδομένων στο εν λόγω μοντέλο και προέκυψε μια προσομοίωση της προσδοκώμενης απόδοσης της καλλιέργειας αγγουριού, όπως θα αναπτυσσόταν στις συγκεκριμένες κλιματολογικές συνθήκες. Ο βασικός σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης ήταν η εξαγωγή συμπερασμάτων της χρήσης του μοντέλου SIOM και ο εντοπισμός πιθανών αποκλίσεων, ώστε να οδηγηθούμε σε μια σειρά βελτιωτικών ενεργειών με στόχο μια ανταγωνιστικότερη καλλιέργεια.

Στο πλαίσιο της παρούσας πτυχιακής διατριβής πραγματοποιήθηκαν δύο πειραματικές μελέτες. Η πρώτη πειραματική διαδικασία έλαβε χώρα από τις 08/10/18 έως και τις 07/12/18 (χειμερινή περίοδος) ενώ η δεύτερη περίοδος ξεκίνησε στις 28/03/19 και ολοκληρώθηκε στις

16/05/19 (εαρινή περίοδος). Για την καταγραφή των κλιματικών μετρήσεων τοποθετήθηκαν δύο μετεωρολογικοί σταθμοί, ένας στο εσωτερικό και ένας στο εξωτερικό μέρος του θερμοκηπίου. Και στις δύο περιόδους μετρήθηκαν σε ένα δείγμα φυτών, το ύψος, ο αριθμός των φύλλων και των καρπών, καθώς και το μήκος και πλάτος των φύλλων του.

Με βάση τα αποτελέσματα του πειράματος, το μοντέλο SIOM μπορεί να υπολογίσει με πολύ καλή συσχέτιση την ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία, με τον συντελεστή προσδιορισμού R^2 να είναι 0.7 (καλοκαιρινή περίοδο) και 0.9 (χειμερινή περίοδο). Όσον αφορά στην θερμοκρασία του αέρα πάνω από την καλλιέργεια, το μοντέλο SIOM και οι τιμές του πειράματος ακολούθησαν παρόμοιο μοτίβο διακυμάνσεων, όμως δεν συμφωνούσαν πλήρως καθώς ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 ήταν 0.50-0.55. Σχετικά με την σχετική υγρασία του αέρα, η τάυτιση των τιμών του μοντέλου SIOM ήταν ακόμη μικρότερη με αυτή των τιμών του πειράματος, με τον συντελεστή προσδιορισμού R^2 να είναι μεταξύ 0.4 και 0.5. Οι τιμές που υπολόγισε το μοντέλο SIOM για την μέση ολική απόδοση ήταν λογικές, αλλά διέφεραν ως προς τις τιμές του πειράματος. Ως βασικό συμπέρασμα προκύπτει ότι το μοντέλο SIOM μπορεί να προσομοιάσει την πορεία της καλλιέργειας (όχι όμως με πλήρη τάυτιση όλων των τιμών), σύμφωνα με τις κλιματικές συνθήκες που θα υπολογίσει. Παρουσιάζει μεν κάποιες αστοχίες ως προς τα κλιματικά δεδομένα, συνολικά όμως είναι ένα μοντέλο, το οποίο προσομοιώνει την πορεία της καλλιέργειας με αρκετή επιτυχία και βοηθάει στην βελτίωση του σχεδιασμού του θερμοκηπίου. Ωστόσο, για πιο ασφαλή συμπεράσματα χρειάζεται να γίνουν περισσότερα πειράματα και να συλλεχθούν επιπλέον δεδομένα.

Λέξεις κλειδιά: Υπολογιστικό μοντέλο SIOM, θερμοκηπιακή καλλιέργεια αγγουριού, υδροπονική καλλιέργεια αγγουριού.

Summary

In recent years, greenhouse facilities have evolved into high-tech facilities consisted of automated and advanced systems for climate control, irrigation, crop monitoring, harvesting, inland transport, sorting and packaging. However, considering the climate of each region, the selection of the appropriate greenhouse type and construction materials are complex factors, which can affect significantly the production. For those reasons, modern high-tech greenhouses are a combination of different technical systems, which interact with each other. The SIOM (System Integration and Optimization Model) is a model that acts as a personal consultant for builders and growers, as it provides an immediate picture of the results that will be made in the future with each option decided. The SIOM model gives access to an extensive database with special components and systems for greenhouses, such as construction, heating, ventilation, cooling and irrigation and the ability to compare different design variants of the greenhouse.

Cucumber is one of the most important vegetable greenhouse crops and it is widely cultivated in Greece. In recent years, hydroponic cucumber production is strongly promoted. However, due to the continuous increase in the demand for hydroponic products, the number of hydroponic cucumber cultivation is expected to increase.

In the present study an experiment was conducted in a hydroponic greenhouse to compare the actual growth of cucumber plants in relation to the expected growth resulting from the computer model SIOM. The collected climatic data were entered in the form of data in this model and a simulation of the expected greenhouse cucumber crop was obtained, as it would be developed in the specific climatic conditions. The main purpose of this study was to draw conclusions using the SIOM model and to identify possible discrepancies, in order to make a series of improvements aimed at a more competitive crops.

For the implementation of the present thesis, two experimental series were carried out in a hydroponic greenhouse. The first experimental process took place from 08/10/18 to 07/12/18 (winter period) and the second period started on 28/03/19 and ended on 16/05/19 (spring season). Two meteorological stations were installed inside and outside the greenhouse to record the climate data. In both periods, the height, the number of leaves and fruits, as well as the length and width of the leaves were measured.

Based on the results of the experiment, it appeared that the SIOM model can calculate with very good correlation the mean daily solar radiation, with the coefficient of determination R^2 being 0.7 (summer period) and 0.9 (winter period). Regarding the air temperature above the crop, the results obtained from the SIOM model and the experiment data had a similar pattern of fluctuations but did not completely agree as the coefficient of determination R^2 was 0.50-

0.55. Regarding the relative humidity of the air, the matching of the SIOM model values was even lower than those obtained from the experiment, with the coefficient of determination R^2 being between 0.4 and 0.5. Although the mean total yield calculated by the SIOM model was reasonable, it differed significantly from the experimental results. To conclude, the SIOM model can simulate the evolution of cultivation but not with a complete match of all values, according to the climatic conditions. Despite some failures resulted in terms of climate data, the model seemed to simulate the course of cultivation with considerable success and helps to improve the design of the greenhouse. However, more experiments need to be done and additional data to be collected for more accurate conclusions.

Keywords: SIOM (System Integration and Optimization Model), Cucumber greenhouse production, Hydroponic cucumber production

Πίνακας περιεχομένων

1. Εισαγωγή.....	12
1.1. Θερμοκήπιο	12
1.1.1. Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη	12
1.1.2. Ορισμός, γενικά στοιχεία και τύποι θερμοκηπίου	13
1.2. Υδροπονία.....	14
1.2.1. Ορισμός – Γενικά στοιχεία	14
1.2.2. Ιστορική αναδρομή	14
1.2.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	15
1.3. Η διεθνής εξέλιξη και ανάπτυξη των θερμοκηπίων.....	16
1.4. Ανάπτυξη θερμοκηπίων στην Ελλάδα.....	17
1.4.1. Προβλήματα των θερμοκηπίων στην Ελλάδα	19
1.5. Οι κλιματικές συνθήκες στην Ελλάδα και στην Θεσσαλία.....	20
1.6. Εξέλιξη και βελτίωση των θερμοκηπίων	20
1.6.1. Ολοκληρωμένα συστήματα και μοντέλα βελτιστοποίησης (SIOM)	21
1.6.2. Λοιπά συστήματα και μοντέλα πρόβλεψης και βελτιστοποίησης	23
1.7. Αγγούρι (<i>Cucumis sativus</i> L.).....	23
1.7.1. Ταξινόμηση και βοτανικά χαρακτηριστικά	23
1.7.2. Θερμοκηπιακή καλλιέργεια αγγουριάς στην Ελλάδα.....	24
1.7.3. Υδροπονική καλλιέργεια αγγουριού.....	26
1.8. Σκοπός της εργασίας	28
2. Υλικά και Μέθοδοι	29
2.1. Πειραματικές εγκαταστάσεις	29
2.2. Αερισμός και σκίαση θερμοκηπίου.....	30
2.3. Θέρμανση θερμοκηπίου.....	31
2.4. Καλλιέργειες εντός του θερμοκηπίου	31
2.5. Εγκατάσταση συστήματος αισθητήρων	32
2.6. Πειραματική διαδικασία	33
3. Αποτελέσματα.....	35
3.1. Πρώτη καλλιεργητική περίοδος.....	35
3.1.1. Ανάπτυξη καλλιέργειας	35
3.1.2. Παρατηρήσεις πειράματος έναντι μοντέλου SIOM.....	38
3.1.2.1. Ηλιακή ακτινοβολία.....	38
3.1.2.2. Θερμοκρασία του αέρα	40

3.1.2.4 Ολική απόδοση.....	41
3.2. Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος.....	42
3.2.1. Ανάπτυξη καλλιέργειας	42
3.2.2. Παρατηρήσεις πειράματος έναντι μοντέλου SIOM.....	45
3.2.2.1. Ηλιακή ακτινοβολία	45
3.2.2.2. Θερμοκρασία αέρα.....	46
3.2.2.3. Σχετική υγρασία του αέρα.....	47
3.2.2.4. Ολική απόδοση.....	48
4. Συζήτηση	49
4.1. Πρώτη καλλιεργητική περίοδος	49
4.2. Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος.....	50
5. Συμπεράσματα	51
6. Βιβλιογραφία	53

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1. Τύποι θερμοκηπίων με βάση το σχήμα της κατασκευαστικής μονάδας. Τοξωτό θερμοκήπιο (αριστερά, Πηγή 1) και αμφικλινές θερμοκήπιο (δεξιά, Πηγή 2).	13
Εικόνα 2. Η κατανομή της έκτασης των θερμοκηπίων της Κίνας (αριστερά) σε σύγκριση με τις υπόλοιπες χώρες και τα επί τοις εκατό % ποσοστά των στρεμμάτων των λοιπών χωρών (δεξιά, Πηγή: Μαυρογιανόπουλος, 2015).	16
Εικόνα 3. Επί τοις εκατό % ποσοστά της έκτασης θερμοκηπίων στις χώρες της Ε.Ε (Πηγή: Μαυρογιανόπουλος, 2015).	17
Εικόνα 4. Θερμοκηπιακές καλλιέργειες παγκοσμίως (αριστερά) και στην Ελλάδα (δεξιά), (Πηγή: Μαυρογιανόπουλος, 2015).	18
Εικόνα 5. Κατανομή θερμοκηπίων εκτάσεων στην Ελλάδα (Πηγή: Μαυρογιανόπουλος, 2015).	19
Εικόνα 6. Καλλιέργεια αγγουριάς (Πηγή: Schrader <i>et al.</i> , 2013).	24
Εικόνα 7. Ποσοστά % έκτασης της θερμοκηπιακής καλλιέργειας αγγουριάς στην Ελλάδα.	25
Εικόνα 8. Δορυφορική λήψη των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων (Google (n.d.)).....	29
Εικόνα 9. Τρεις διαδοχικοί θάλαμοι διεξαγωγής των πειραματικών μετρήσεων (Google (n.d.)).	30
Εικόνα 10. Ανεμιστήρες δυναμικού αερισμού (αριστερά) και σύστημα υγρής παρειάς (δεξιά).	30
Εικόνα 11. Ανεμιστήρας ανάμειξης του αέρα (αριστερά) και παράθυρα οροφής (δεξιά). 31	

Εικόνα 12. Μεταφορά θερμού νερού μέσω μεταλλικών σωλήνων (αριστερά) και πλαστικών σωλήνων (δεξιά).....	31
Εικόνα 13. Διαδικασία αραίματος των φύλλων (αριστερά) και αποφυλλωμένα φυτά αγγουριού (δεξιά)	32
Εικόνα 14. Εσωτερικός μετεωρολογικός σταθμός (αριστερά) και εξωτερικός μετεωρολογικός σταθμός με ανεμόμετρο (δεξιά)	33
Εικόνα 15. Σήμανση τυχαίων φυτών αγγουριάς στον χώρο του θερμοκηπίου	34

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1. Συνιστώμενες συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα σε ανοιχτά συστήματα υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριού, ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης των φυτών.....	27
Πίνακας 2. Συνιστώμενες συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα στον χώρο των ριζών, σε ανοιχτά συστήματα υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριού, ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης των φυτών.	28
Πίνακας 3. Σύγκριση μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και των μετρήσεων του μοντέλου SIOM.....	41
Πίνακας 4. Σύγκριση μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και των μετρήσεων του μοντέλου SIOM.....	48

Περιεχόμενα διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Μεταβολή του ύψους (cm) των φυτών αγγουριάς κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.....	35
Διάγραμμα 2. Μεταβολή του αριθμού των φύλλων των φυτών αγγουριάς κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.	36
Διάγραμμα 3. Μεταβολή του αριθμού των καρπών των φυτών αγγουριάς κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.	37
Διάγραμμα 4. Μεταβολή του πλάτους (cm) των φύλλων αγγουριάς κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.....	37
Διάγραμμα 5. Μεταβολή του μήκους (cm) των φύλλων αγγουριάς κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.....	38
Διάγραμμα 6. Σύγκριση των μέσων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω από την καλλιέργεια μεταξύ των μετρήσεων του πειράματος και του μοντέλου SIOM κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.	39

Διάγραμμα 7. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των μετρήσιμων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας (MJ m^{-2}) και των τιμών του μοντέλου SIOM κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.....	39
Διάγραμμα 8. Σύγκριση των μέσων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα πάνω από την καλλιέργεια μεταξύ των μετρήσεων του πειράματος και του μοντέλου SIOM κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.	40
Διάγραμμα 9. Σύγκριση των μέσων τιμών της σχετικής υγρασίας του αέρα πάνω από την καλλιέργεια (την χειμερινή περίοδο), μεταξύ των μετρήσεων του πειράματος και του μοντέλου SIOM.....	41
Διάγραμμα 10. Μεταβολή του ύψους (cm) των φυτών αγγουριάς κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.	42
Διάγραμμα 11. Μεταβολή του αριθμού φύλλων των φυτών αγγουριάς κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.....	43
Διάγραμμα 12. Μεταβολή του αριθμού καρπών των φυτών αγγουριάς κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.....	44
Διάγραμμα 13. Μεταβολή του πλάτους (cm) των φύλλων αγγουριάς κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.	44
Διάγραμμα 14. Μεταβολή του μήκους (cm) των φύλλων αγγουριάς κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.	45
Διάγραμμα 15. Σύγκριση των μέσων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω από την καλλιέργεια μεταξύ των μετρήσεων του πειράματος και του μοντέλου SIOM κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.....	46
Διάγραμμα 16. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των μετρήσιμων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας (MJ m^{-2}) και των τιμών του μοντέλου SIOM κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.....	46
Διάγραμμα 17. Σύγκριση των μέσων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα πάνω από την καλλιέργεια μεταξύ των μετρήσεων του πειράματος και του μοντέλου SIOM κατά τη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο.	47
Διάγραμμα 18. Σύγκριση των μέσων τιμών της σχετικής υγρασίας του αέρα πάνω από την καλλιέργεια μεταξύ των μετρήσεων του πειράματος και του μοντέλου SIOM κατά τη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο.	48

1. Εισαγωγή

1.1. Θερμοκήπιο

1.1.1. Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη

Ο άνθρωπος από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα έχει ως πρωταρχικό σκοπό την βελτίωση της ζωής του. Με το πέρασ των αιώνων η εξέλιξη έγινε ταυτόσημη με κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα. Έτσι, ο άνθρωπος ξεκίνησε ως θηρευτής και στην συνέχεια έμαθε να καλλιεργεί την γη και να εξασφαλίζει μόνος την τροφή του, έχοντας έτσι μεγαλύτερη σταθερότητα στην παροχή τροφής. Αξιοποίησε τις υπάρχουσες αυτόχθονες ποικιλίες φυτών και δημιούργησε με βάση αυτές νέα καλύτερα φυτά. Αύξησε την γονιμότητα των εδαφών, καταπολέμησε ασθένειες, έφτιαξε εργαλεία για την κατεργασία της γης και για την συγκομιδή της σοδειάς και πολλά ακόμα. Ωστόσο, όσο και να μοχθούσε να ελέγξει όλο και περισσότερους παράγοντες ώστε να πάρει την καλύτερη δυνατή παραγωγή, κάποια πράγματα ήταν πέραν των δυνατοτήτων του. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, οι καιρικές συνθήκες. Έτσι, ξεκίνησε η ιδέα για την δημιουργία ενός χώρου οπου ο ίδιος ο άνθρωπος θα μπορούσε να ελέγξει τις κλιματικές συνθήκες οι οποίες θα του έδιναν την δυνατότητα να παράγει τροφή ανεξάρτητα από την εποχή και τις καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία των πρώτων θερμοκηπίων.

Από τον 17^ο αιώνα μ.Χ. αρχίζουν να χρησιμοποιούνται τα πρώτα θερμοκήπια με την σημερινή μορφή, η κατασκευή των οποίων γινόταν από ξύλινο σκελετό και υαλοπίνακες. Στον επόμενο αιώνα αναγνωρίζεται η αξία του σωστού φωτισμού για την ανάπτυξη των φυτών και αρχίζει να λαμβάνεται υπόψιν η γωνία κλίσης των υαλοπινάκων. Το 1710 προτείνεται από τον Boerhaave, τις μεσημεριανές ώρες κατά την χειμερινή περίοδο οι υαλοπίνακες να έχουν κάθετη κατεύθυνση στις ακτίνες του ήλιου, ώστε να εισέρχεται μεγαλύτερη ποσότητα φωτισμού εντός του θερμοκηπίου. Επίσης, την ίδια περίοδο αρχίζει η χρήση της θερμοκουρτίνας κατά την διάρκεια της νύχτας, με την προσθήκη λαδόχαρτου ως δεύτερο υλικό κάλυψης του θερμοκηπίου (Clegg and Watkins, 1980). Η μεγαλύτερη εξέλιξη στην κατασκευή των θερμοκηπίων ξεκινά από τον 19^ο αιώνα. Το 1816 χρησιμοποιείται για πρώτη φορά αυτόματος μηχανικός θερμοστάτης για τον εξαερισμό του θερμοκηπίου. Τέλος, από τον 20^ο αιώνα έως και σήμερα εξελίσσεται συνεχώς η κατασκευή και η λειτουργία του θερμοκηπίου, τόσο από πλευράς υλικών κατασκευής όσο και των αυτοματισμών του θερμοκηπίου μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών και προγραμμάτων (Μαυρογιανόπουλος, 2005).

1.1.2. Ορισμός, γενικά στοιχεία και τύποι θερμοκηπίου

Θερμοκήπιο είναι μια κατασκευή με διαφανές υλικό, ώστε να είναι δυνατή η είσοδος περισσότερου φυσικού φωτισμού, που είναι απαραίτητος για την ανάπτυξη των φυτών. Το θερμοκήπιο δίνει την δυνατότητα στο καλλιεργητή να καλλιεργεί φυτά σε ελεγχόμενες συνθήκες, καθώς αποτελεί ένα περιορισμένο χώρο στον οποίο μπορεί να ελεγχθεί το μικροκλίμα. Ταυτόχρονα παρέχει προστασία στην καλλιέργεια από τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες, ενώ παρέχεται η δυνατότητα αποτελεσματικής φυτοπροστασίας από ασθένειες και έντομα (Μαυρογιαννόπουλος, 2017).

Τα θερμοκήπια διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες με βάση το σχήμα της κατασκευαστικής μονάδας, στα τοξωτά και αμφικλινή (Εικόνα 1). Αντίθετα, με βάση τα υλικά κάλυψης τους διακρίνονται σε θερμοκήπια κατηγορίας Α' (υαλόφρακτα) και Β' (καλυμμένα με πλαστικό). Ως υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων χρησιμοποιούνται το γυαλί ή το πλαστικό (πολυαιθυλένιο), καθώς μπορούν να συγκεντρώνουν υψηλά ποσά θερμότητας (Von Elsner *et al.*, 2000). Η εισερχόμενη σε αυτά ακτινοβολία, θερμαίνει τις εγκαταστάσεις και το χώρο, και έτσι τα φυτά προστατεύονται από τις διάφορες αντίξοες συνθήκες. Επίσης, επειδή ο χώρος είναι περιορισμένος, είναι πιο εύκολη η διαχείριση και ο έλεγχος τόσο των εντόμων - εχθρών όσο και των ασθενειών (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).



Εικόνα 1. Τύποι θερμοκηπίων με βάση το σχήμα της κατασκευαστικής μονάδας. Τοξωτό θερμοκήπιο (αριστερά, Πηγή 1) και αμφικλινές θερμοκήπιο (δεξιά, Πηγή 2).

Ακόμα και το πιο απλό κατασκευαστικά θερμοκήπιο μπορεί να εμποδίσει τυχόν ζημιές στα φυτά από ακραία καιρικά φαινόμενα όπως ο ισχυρός αέρας, η βροχή, το χαλάζι και το χιόνι. Σε θερμοκήπια όπου ο εξοπλισμός είναι εκσυγχρονισμένος, μπορούν να ρυθμιστούν με ακρίβεια οι περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως για παράδειγμα η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα, ώστε να επιτευχθεί

αύξηση της παραγωγής, βελτίωση της ποιότητας με ταυτόχρονη μείωση του κόστους παραγωγής (Van Os, 2000).

Στην σύγχρονη όμως εποχή οι απαιτήσεις για περισσότερη τροφή είναι ιδιαίτερα αυξημένες λόγω της ραγδαίας αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού αλλά και την ζήτηση ποιοτικών παραγόμενων προϊόντων. Αυτοί οι παράγοντες έφεραν δύο νέες προκλήσεις, την ανάγκη εύρεσης νέων καλλιεργήσιμων εκτάσεων, καθώς οι υπάρχουσες δεν επαρκούσαν και την συνεχή και ποιοτική παραγωγή αγαθών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Αυτές οι δύο ανάγκες εξέλιξαν την απλή θερμοκηπιακή καλλιέργεια, σε υδροπονική θερμοκηπιακή καλλιέργεια.

1.2. Υδροπονία

1.2.1. Ορισμός – Γενικά στοιχεία

Ως υδροπονία ορίζεται το σύστημα καλλιέργειας, κατά το οποίο τα φυτά δεν καλλιεργούνται σε έδαφος, αλλά σε αδρανή υποστρώματα (ανόργανα ή οργανικά) με την προσθήκη θρεπτικού διαλύματος ή μόνο σε θρεπτικό διάλυμα χωρίς την χρήση αδρανούς υποστρώματος (Jensen & Collins, 1985). Ο πετροβάμβακας είναι το κυριότερο μέσο ανάπτυξης μιας υδροπονικής καλλιέργειας και ένα από τα πιο διαδεδομένα αδρανή υποστρώματα. Ως θρεπτικά διαλύματα χρησιμοποιούνται διάφορες χημικές ενώσεις, οι οποίες περιέχουν τα απαραίτητα μακροστοιχεία και μικροστοιχεία ή ιχνοστοιχεία για την ανάπτυξη του φυτού. Τα μακροστοιχεία που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι το άζωτο, ο φώσφορος, το κάλιο, το θείο, το μαγνήσιο και το ασβέστιο. Τα μικροστοιχεία ή ιχνοστοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι ο σίδηρος, ο χαλκός, το μαγγάνιο, ο ψευδάργυρος, το βόριο και το μολυβδαίνιο (Savvas & Passam, 2002).

1.2.2. Ιστορική αναδρομή

Τα πρώτα πειράματα για την δημιουργία υδροπονικών συστημάτων έγιναν το 1860 από τον Sachs στην Γερμανία. Τέλη του 19ου αιώνα γίνονται προσπάθειες για την βελτίωση του υδροπονικού συστήματος καλλιέργειας. Μέχρι εκείνη την περίοδο η υδροπονική καλλιέργεια χρησιμοποιούταν για ερευνητικούς σκοπούς. Το 1929 εφαρμόζεται για πρώτη φορά, στις Η.Π.Α. από τον Geriecke, η υδροπονική καλλιέργεια με σκοπό την εμπορική καλλιέργεια φυτών. Λίγα χρόνια μετά εισάγει τον όρο υδροπονία (1937). Έναν χρόνο μετά, η τεχνική της υδροπονίας αντιγράφεται και προωθείται στην Αγγλία (Κατσούλας και Κίττας, 2011). Κατά την

διάρκεια του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου η υδροπονική καλλιέργεια επεκτείνεται και η υδροπονική καλλιέργεια φυτών αρχίζει εφαρμόζεται στην Ιαπωνία και τις Η.Π.Α. για την παραγωγή λαχανικών για τις ανάγκες του πολέμου. Τέλος, οι Hoagland and Arnon το 1950, ανέπτυξαν το θρεπτικό διάλυμα, το οποίο χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα στην έρευνα και σε εμπορικές καλλιέργειες.

1.2.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

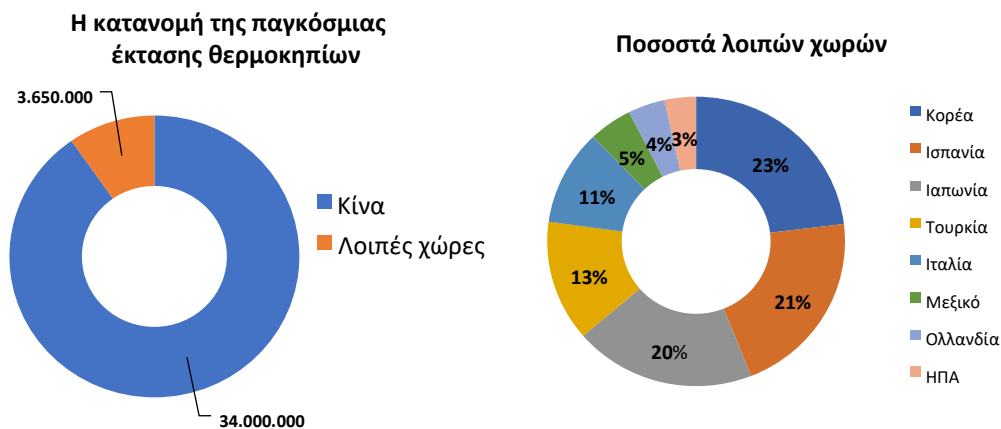
Η υδροπονική καλλιέργεια αναπτύσσεται συνεχώς καθώς παρέχει τη δυνατότητα καλλιέργειας σε μέρη όπου η υπαίθρια καλλιέργεια δεν είναι αποδοτική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παραγωγή δεν επηρεάζεται από το έδαφος και από τα προβλήματα που σχετίζονται με αυτό. Η εφαρμογή της υδροπονίας ως τεχνική καλλιέργειας έχει πολλά πλεονεκτήματα. Αρχικά, η ανάπτυξη της καλλιέργειας είναι ανεξάρτητη από τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους, επομένως είναι απαλλαγμένη από εχθρούς και ασθένειες του εδάφους. Επίσης, τα θρεπτικά στοιχεία κατανέμονται ελεγχόμενα, σταθερά και ομοιογενώς σε όλα τα φυτά και ο έλεγχος των ζιζανίων είναι πιο αποτελεσματικός. Η κατανομή της υγρασίας στις ρίζες των φυτών είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και ελεγχόμενη, με αποτέλεσμα να αποφεύγονται περιπτώσεις υδατικής καταπόνησης. Επιπλέον, πριν την εγκατάσταση των φυτών δεν χρειάζεται να γίνεται κατεργασία ή προετοιμασία (όπως συμβαίνει με την καλλιέργεια στο έδαφος), η χειρωνακτική εργασία περιορίζεται και το περιβάλλον εργασίας είναι πιο καθαρό. Τέλος, σημαντικό όφελος από την υδροπονία είναι ότι αποφεύγεται η ρύπανση του υδροφόρου ορίζοντα από τα χημικά λιπάσματα (Τζωρτζάκης, 2008).

Εκτός από τα πολλά πλεονεκτήματα, τα συστήματα υδροπονικής καλλιέργειας παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα. Το κόστος εγκατάστασης είναι αρκετά υψηλό, καθώς μια επαγγελματική υδροπονική μονάδα απαιτεί σημαντικά κεφάλαια για την απόκτηση του απαραίτητου εξοπλισμού. Επίσης, στην περίπτωση όπου υπάρξει κάποιος λάθος χειρισμός, αυτό θα επηρεάσει άμεσα την καλλιέργεια, με όλες τις δυσμενείς συνέπειες. Τέλος, στα κλειστά υδροπονικά συστήματα όπου τα θρεπτικά διαλύματα επαναχρησιμοποιούνται, αυξάνεται ο κίνδυνος εξάπλωσης μιας ασθένειας ή μόλυνσης (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

1.3. Η διεθνής εξέλιξη και ανάπτυξη των θερμοκηπίων

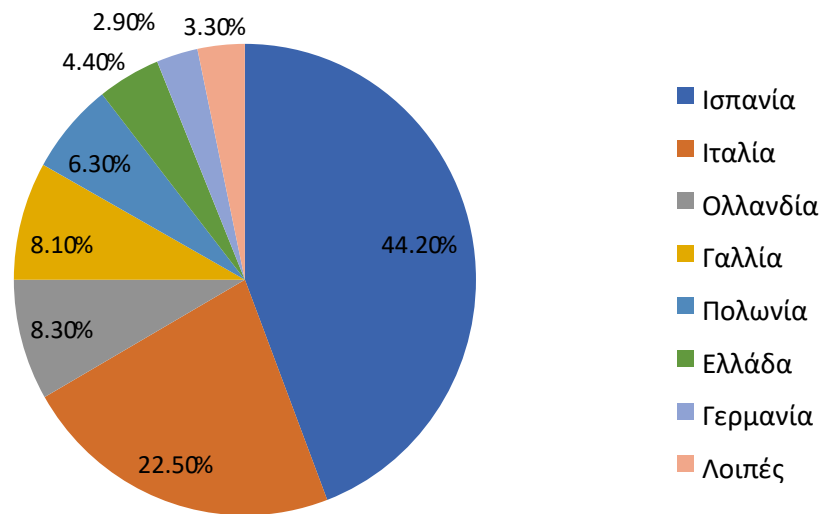
Οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες εμφανίζουν ραγδαία ανάπτυξη στη σύγχρονη εποχή. Σε παγκόσμια κλίμακα η έκταση των θερμοκηπίων το 2015 υπολογίζεται σε 37.650.000 στρέμματα. Την πρώτη θέση με ποσοστό 90% της παγκόσμιας έκτασης καταλαμβάνει η Κίνα με 34.000.000 στρέμματα, την οποία ακολουθούν η Κορέα με 574.500 στρ., η Ισπανία με 520.720 στρ., η Ιαπωνία με 490.500 στρ., η Τουρκία με 336.000 στρ., η Ιταλία με 265.000 στρ., το Μεξικό με 118.000 στρ., η Ολλανδία με 100.000 στρ. και η ΗΠΑ με 85.000 στρ. (Εικόνα 2) (Kacira, 2011).

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο το σύνολο της έκτασης ανέρχεται σε 1.200.000 στρέμματα, με την Ισπανία να κατέχει την πρώτη θέση με 44,2% και να ακολουθούν η Ιταλία με 22,5%, η Ολλανδία με 8,3%, η Γαλλία με 8,1%, η Πολωνία με 6,3%, η Ελλάδα με 4,4%, η Γερμανία με 2,9% και οι υπόλοιπες χώρες με μικρότερα ποσοστά (Εικόνα 3). Όσον αφορά στα μεσογειακά κράτη, εκτός ευρωπαϊκής ένωσης, πρώτη κατατάσσεται η Τουρκία με 336.000 στρέμματα και ακολουθούν η Αλγερία με 34.000 στρέμματα, το Ισραήλ με 24.000 στρέμματα και έπονται οι υπόλοιπες χώρες με μικρότερες εκτάσεις. Σε εθνικό επίπεδο η Ελλάδα κατέχει την 6^η θέση στην ευρωπαϊκή ένωση με 53.420 στρέμματα και ποσοστό 4,4% (Μαυρογιανόπουλος, 2015).



Εικόνα 2. Η κατανομή της έκτασης των θερμοκηπίων της Κίνας (αριστερά) σε σύγκριση με τις υπόλοιπες χώρες και τα επί τοις εκατό % ποσοστά των στρεμμάτων των λοιπών χωρών (δεξιά, Πηγή: Μαυρογιανόπουλος, 2015).

Ποσοστά έκτασης θερμοκηπίων στην Ε.Ε



Εικόνα 3. Επί τοις εκατό % ποσοστά της έκτασης θερμοκηπίων στις χώρες της Ε.Ε (Πηγή: Μαυρογιανόπουλος, 2015).

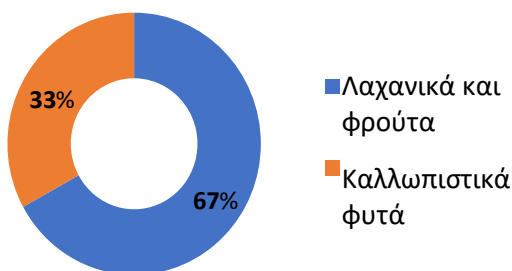
1.4. Ανάπτυξη θερμοκηπίων στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα τα πρώτα θερμοκήπια εμφανίστηκαν την δεκαετία του 50'. Από τότε μέχρι και σήμερα χρησιμοποιήθηκαν σε διάφορες παραλλαγές από τους εγχώριους παραγωγούς. Τα πρώτα θερμοκήπια που εμφανίστηκαν στην χώρα ήταν υαλόφρακτα κυρίως για την παραγωγή ανθοκομικών προϊόντων. Με την είσοδο του πλαστικού φύλλου πολυαιθυλενίου στην ελληνική αγορά το 1965, οι παραγωγοί στράφηκαν στην κατασκευή απλών θερμοκηπίων με ξύλινο σκελετό, τόσο λόγω μειωμένου κόστους όσο και λόγω έλλειψης τεχνογνωσίας. Σήμερα υπολογίζεται πως το 60% των θερμοκηπίων της χώρας βρίσκεται σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο τεχνολογίας. Συγκεκριμένα το 1982, τα τυποποιημένα θερμοκήπια στην Ελλάδα ανέρχονταν σε ποσοστό 14,5%, ενώ το 2015 έφτασε σε 63% του συνόλου (Μαυρογιανόπουλος, 2015).

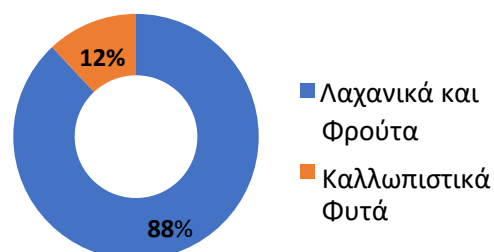
Ο μεγαλύτερος αριθμός θερμοκηπίων βρίσκεται στην νότια Ελλάδα και κυρίως στην ευρύτερη περιοχή της Κρήτη και της Πελοποννήσου. Στην βόρεια Ελλάδα τα περισσότερα θερμοκήπια απαντώνται στην Μακεδονία. Συγκεκριμένα το μεγαλύτερο ποσοστό των θερμοκηπιακών καλλιεργειών (39%) συναντάται στην Κρήτη ενώ το αμέσως επόμενο στην Πελοπόννησο (23%). Στη συνέχεια ακολουθεί η Μακεδονία με ποσοστό 19% και τέλος οι υπόλοιπες περιοχές με μικρότερα ποσοστά, κάτω της

τάξης του 10% (Εικόνα 5). Στην χώρα μας, η παραγωγή λαχανικών και φρούτων αποτελεί το 88% της θερμοκηπιακής παραγωγής, με τα καλλωπιστικά φυτά να καταλαμβάνουν μόνο το 12%, ενώ σε παγκόσμια κλίμακα τα ποσοστά είναι 67% και 33%, αντίστοιχα (Εικόνα 4). Πλέον η χρήση τυποποιημένων θερμοκηπίων με μεταλλικό σκελετό εμφανίζεται όλο και πιο συχνά με σκοπό την μεγαλύτερη αντοχή στο χρόνο. Σε αυτά τα θερμοκήπια το επικρατέστερο υλικό κάλυψης που χρησιμοποιείται είναι το φύλλο πολυαιθυλενίου. Επίσης, όλο και συχνότερα οι παραγωγοί επιλέγουν να εγκαταστήσουν συστήματα σωστού αερισμού, δροσισμού και σκίασης της καλλιέργειας αλλά και συστήματα θέρμανσης με σκοπό την αύξηση της θερμοκρασίας του χώρου ιδιαίτερα κατά τους χειμερινούς μήνες. Με την εγκατάσταση όλων αυτών των συστημάτων αύξηση της παραγωγικότητας και αποδοτικότητας της καλλιέργειας καθώς και της ποιότητας των προϊόντων. Τέλος, ένα νέο φαινόμενο στο χώρο των θερμοκηπίων είναι η αξιοποίηση κοινοτικών κονδυλίων για αντικατάσταση παλαιότερων μεθόδων, όπως η χρήση ορυκτών καυσίμων για θέρμανση αλλά και η διαχείριση των αποβλήτων τις καλλιέργειας, με χρήση νέων πιο φιλικών στο περιβάλλον τρόπων (Μαυρογιανόπουλος, 2015).

Ποσοστά των θερμοκηπιακών καλλιεργειών παγκοσμίως

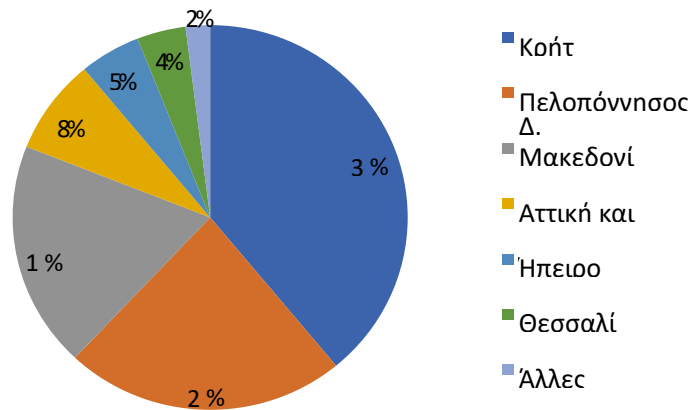


Ποσοστά των θερμοκηπιακών καλλιεργειών στην Ελλάδα



Εικόνα 4. Θερμοκηπιακές καλλιέργειες παγκοσμίως (αριστερά) και στην Ελλάδα (δεξιά), (Πηγή: Μαυρογιανόπουλος, 2015).

Ποσοστά έκτασης θερμοκηπίων στην Ελλάδα



Εικόνα 5. Κατανομή θερμοκηπίων εκτάσεων στην Ελλάδα (Πηγή: Μαυρογιανόπουλος, 2015).

1.4.1. Προβλήματα των θερμοκηπίων στην Ελλάδα

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί αύξηση των θερμοκηπιακών εκτάσεων και των αποδόσεων ανά στρέμμα. Όμως, η αύξηση αυτή θεωρείται πολύ μικρότερη συγκριτικά με αυτή των άλλων χωρών. Σύμφωνα με το Υπουργείο Γεωργίας, η αύξηση των αποδόσεων στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις οφείλεται στη βελτίωση των θερμοκηπίων και στη χρησιμοποίηση αποδοτικότερων υβριδίων. Αντιθέτως, η βελτίωση της τεχνογνωσίας των παραγωγών συμβάλλει ελάχιστα (Γεωργία - Κτηνοτροφία, 2011). Η τεχνολογική εξέλιξη των θερμοκηπίων θεωρείται απαραίτητη για την αύξηση της απόδοσης των θερμοκηπιακών προϊόντων, καθώς ο αριθμός των θερμοκηπίων σύγχρονης τεχνολογίας με δυνατότητα πλήρους ελέγχου των κλιματικών συνθηκών είναι ελάχιστος (Μπαρτζάνας, 2004).

Ένα από τα κυριότερα προβλήματα των θερμοκηπίων στη χώρα μας και σε όλη τη μεσογειακή λεκάνη, είναι η θέρμανση. Η Ελλάδα είναι χώρα με σχετικά ήπιο χειμώνα, όμως οι χαμηλές θερμοκρασίες που σημειώνονται εκείνη την εποχή δεν θεωρούνται ιδανικές για την παραγωγή υψηλής ποιότητας ανθοκομικών ή λαχανοκομικών προϊόντων σε μη θερμαινόμενα θερμοκήπια. Ακόμη, οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες κατά την περίοδο του καλοκαιριού, αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα για την ανάπτυξη φυτών σε θερμοκήπια απουσία συστήματος ψύξης και αερισμού. Για να αυξηθούν οι θερμοκηπιακές εκτάσεις, να αναπτυχθεί ο συγκεκριμένος κλάδος και να παράγονται πιο ανταγωνιστικά προϊόντα, θα πρέπει να γίνει ορθολογικός

σχεδιασμός της κατασκευής, καλύτερη χρήση των συστημάτων θέρμανσης και αερισμού και χρήση ήπιων μορφών ενέργειας και συστημάτων εξοικονόμησης ενέργειας (Μπαρτζάνας, 2004).

1.5. Οι κλιματικές συνθήκες στην Ελλάδα και στην Θεσσαλία

Η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από ήπιους χειμώνες και ζεστά καλοκαίρια. Ένα από τα κύρια προβλήματα σε μια θερμοκηπιακή καλλιέργεια στην Ελλάδα είναι η ψύξη κατά τους θερινούς μήνες, σε αντίθεση με την Βόρεια Ευρώπη που το κυριότερο πρόβλημα των θερμοκηπίων είναι η θέρμανση το χειμώνα. Ο κύριος όγκος θερμοκηπίων στην χώρα μας εντοπίζεται στη νησιωτική και νότια ηπειρωτική χώρα, σε ποσοστό 65% (Μαυρογιανόπουλος, 2017). Κατά τους χειμερινούς μήνες λόγω των σχετικά υψηλών τιμών της θερμοκρασίας και ηλικιακής ακτινοβολίας, είναι δυνατή η παραγωγή φυτών, με μικρά κόστη για θέρμανση, ακόμα και σε μη θερμαινόμενα θερμοκήπια. Αντίθετα τους θερινούς μήνες οι μέσες θερμοκρασίες που επικρατούν τόσο στο εξωτερικό όσο και στο εσωτερικό χώρο του θερμοκηπίου, καθιστούν επιτακτική την ανάγκη για δροσισμό.

Στην Θεσσαλία διακρίνονται τρεις κλιματικές περιοχές, οι οποίες καθορίζονται από το ανάγλυφο, το υψόμετρο και την έκθεση στους ανέμους. Η ανατολική παράκτια και ορεινή Θεσσαλία, χαρακτηρίζεται από μεσογειακό κλίμα, η κεντρική πεδινή Θεσσαλία από ηπειρωτικό κλίμα και η δυτική ορεινή Θεσσαλία από ορεινό κλίμα. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται στους 16°C. Οι πιο θερμοί μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος ενώ οι πιο ψυχροί ο Δεκέμβριος, Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος. Επίσης, στην δυτική Θεσσαλία υπάρχει μεγάλος αριθμός βροχοπτώσεων, ενώ στην Κεντρική και Ανατολική μειώνεται (Κουτσογιάννης και συν., 2008).

1.6. Εξέλιξη και βελτίωση των θερμοκηπίων

Οι διαδικασίες παραγωγής στον αγροτικό τομέα βιομηχανοποιούνται όλο και περισσότερο. Τα θερμοκήπια έχουν εξελιχθεί σε εγκαταστάσεις παραγωγής υψηλής τεχνολογίας που είναι εξαιρετικά αυτοματοποιημένα και προηγμένα συστήματα για τον έλεγχο του κλίματος, της άρδευσης, την παρακολούθηση των καλλιεργειών, τη συγκομιδή, την εσωτερική μεταφορά, τη διαλογή και τη συσκευασία (Fitz-Rodriguez *et al.*, 2010). Ωστόσο, η παράγωγή θερμοκηπιακών προϊόντων, η επιλογή του κατάλληλου τύπου θερμοκηπίου και των υλικών κατασκευής, αναλόγως το κλίμα

κάθε περιοχής, είναι πολύπλοκοι παράγοντες, οι οποίοι μπορούν να επιφέρουν μείωση ή αύξηση της παραγωγής (Alhama *et al.*, 2000; Verdouw *et al.*, 2015). Ένας ακόμη παράγοντας, ο οποίος καθορίζει την εξέλιξη της παραγωγής είναι το κλίμα εντός του θερμοκηπίου. Το κλίμα είναι ένα δυναμικό σύστημα, του οποίου οι μεταβλητές εξαρτώνται άμεσα από τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες, το σχήμα του θερμοκηπίου, τα υλικά κάλυψης, αλλά και από την αλληλεπίδρασή αυτών, μέσω των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Η πρόβλεψη των κλιματικών συνθηκών του περιβάλλοντος εντός του θερμοκηπίου απαιτείται, για την παροχή σταθερών περιβαλλοντικών συνθηκών και την μείωση της ενεργειακής δαπάνης. Γι' αυτό τον λόγο δημιουργήθηκαν τεχνικά συστήματα, τα οποία ελέγχουν αυτόν τον όγκο πληροφοριών με σκοπό την βελτίωση των θερμοκηπιακών καλλιεργειών (Bakker, 2006; Kittas *et al.*, 2003; Lopez-Cruz *et al.*, 2003).

1.6.1. Ολοκληρωμένα συστήματα και μοντέλα βελτιστοποίησης (SIOM)

Η κατασκευή θερμοκηπίων αποτελεί μια μεγάλη επένδυση για κάποιον που αποφασίζει να ασχοληθεί ή να επεκτείνει τις δραστηριότητες του στον τομέα αυτόν. Οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για ένα τέτοιο εγχείρημα είναι αρκετοί και πολύπλοκοι. Απαιτούν καλή γνώση και πληθώρα πληροφοριών ώστε να παρθούν οι σωστές αποφάσεις. Γι' αυτό τον λόγο τα σύγχρονα θερμοκήπια υψηλής τεχνολογίας είναι ένας συνδυασμός διαφόρων τεχνικών συστημάτων, τα οποία αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Ο τύπος του θερμοκηπίου έχει άμεση σχέση με την περιοχή που θα εγκατασταθεί, τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην τοποθεσία αυτή καθώς και με την καλλιέργεια που θα αναπτυχθεί στο εσωτερικό του. Επομένως, είναι δύσκολο να προσαρμοστεί ο σχεδιασμός του θερμοκηπίου σε περιοχές με διαφορετικό κλίμα (Sarounas, 2019).

Το SIOM (System Integration and Optimization Model) λειτουργεί ως προσωπικός σύμβουλος για κατασκευαστές και καλλιεργητές, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα παροχής μιας άμεσης εικόνας των αποτελεσμάτων που θα έχει μελλοντικά η κάθε επιλογή που θα αποφασιστεί (Janssen *et al.*, 2014). Με την χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου δίνεται πρόσβαση σε μια εκτεταμένη βάση δεδομένων με ειδικά εξαρτήματα και συστήματα για το θερμοκήπιο, όπως η κατασκευή, η θέρμανση, ο εξαερισμός, η ψύξη και η άρδευση. Με την χρήση του SIOM δίνεται η δυνατότητα να συγκριθούν διαφορετικές σχεδιαστικές παραλλαγές του θερμοκηπίου μεταξύ τους. Επιπλέον, παρέχει πληροφορίες με βάση τη θέση όπως, ώρες ηλιοφάνειας,

βροχοπτώσεις, υπόγεια ύδατα κ.α. Το δίκτυο των πληροφοριών αυτών ανανεώνεται καθημερινά παρέχοντας ρεαλιστικά δεδομένα στον εκάστοτε ενδιαφερόμενο. Έτσι επιταχύνεται η διαδικασία σχεδιασμού και παρέχονται πολύτιμες πληροφορίες σε πτυχές όπως η περίοδος απόσβεσης του αρχικού κεφαλαίου που επενδύθηκε καθώς και η αποτελεσματικότητα των σχεδιασμών. Με αυτό τον τρόπο οι κατασκευαστές θερμοκηπίων μπορούν να σχεδιάζουν καλύτερης ποιότητας θερμοκήπια με μεγαλύτερη ακρίβεια, για τις πιο συνηθισμένες καλλιέργειες σε διάφορες κλιματολογικές ζώνες. Οι πτυχές αυτές έχουν μεγάλη σημασία για τους επενδυτές προκειμένου να επιτευχθεί η υψηλότερη δυνατή απόδοση με το χαμηλότερο δυνατό κόστος. Παρόλα αυτά, απαιτείται επικύρωση των αποτελεσμάτων, πρόσθετα μοντέλα σχεδίασης και ένα σχέδιο διαδικασίας σχεδιασμού για να καταστεί δυνατή η εφαρμογή του SIOM από τους κατασκευαστές θερμοκηπίου (Janssen *et al.*, 2014).

Στη μελέτη των Rodriguez *et al.* (2010), αναφέρεται πως ο εξομοιωτής περιβάλλοντος του θερμοκηπίου με μετρήσεις στην ανάπτυξη των φυτών, που πραγματοποιούνται με το μοντέλο SIOM, είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης υπολογιστών που έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιείται ως εκπαιδευτικό εργαλείο για την επίδειξη της φυσικής των συστημάτων θερμοκηπίου και των αρχών περιβαλλοντικού ελέγχου. Δεδομένου του αριθμού των διαθέσιμων επιλογών μέσω του κινούμενου περιβάλλοντος χρήστη του προσομοιωτή με μετρήσεις στην ανάπτυξη των φυτών, που πραγματοποιούνται με το μοντέλο SIOM, μπορεί να αναπαραχθεί ένας μεγάλος αριθμός πιθανών σεναρίων, καθιστώντας το πρόγραμμα προσομοίωσης χρήσιμο ως εκπαιδευτικό εργαλείο για σκοπούς επίδειξης. Χρησιμοποιείται ο προσομοιωτής για να δείξει πώς θα μπορούσε να λειτουργήσει ένας σχεδιασμός θερμοκηπίου για διάφορες κλιματικές συνθήκες (για τέσσερις εποχές σε τέσσερις διαφορετικές τοποθεσίες) και ο προσομοιωτής ανέφερε επίσης ποια συστήματα μπορεί να χρειαστούν για την επίτευξη των επιθυμητών περιβαλλοντικών συνθηκών. Το απλοποιημένο μοντέλο περιβάλλοντος του θερμοκηπίου με μετρήσεις στην ανάπτυξη των φυτών, που πραγματοποιούνται με το μοντέλο SIOM, παρήγαγε καλές προσεγγίσεις της δυναμικής συμπεριφοράς των περιβαλλόντων του θερμοκηπίου με διαφορετικές διαμορφώσεις για περιόδους προσομοίωσης 28 ωρών. Το μοντέλο ενσωματώθηκε επίσης σε μια διαδικτυακή εφαρμογή όπου τα σενάρια προσομοίωσης θα μπορούσαν να αναπαραχθούν χωρίς δαπανηρό λογισμικό προσομοίωσης.

1.6.2. Λοιπά συστήματα και μοντέλα πρόβλεψης και βελτιστοποίησης

Κατά την παραγωγική διαδικασία σε ένα πλήρως εξοπλισμένο θερμοκήπιο, το κόστος λειτουργίας των συστημάτων είναι πολύ υψηλό. Το μεγαλύτερο μέρος του κόστους, σχετίζεται με τον έλεγχο του κλίματος στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Τα τελευταία χρόνια η προσπάθεια για αποτελεσματική διαχείριση του κλίματος των θερμοκηπιακών μονάδων, οδήγησε στη δημιουργία νέων κλιματικών προσομοιωμάτων. Αυτά είναι τα GDGCM (Pieters and Deltour, 1997), MICGREEN (Singh *et al.*, 2006), HORTITRANS (Jolliet, 1994).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν για το κάθε κλιματικό προσομοίωμα, το GDGCM υπολόγιζε μειωμένες κατά 15% τις απαιτήσεις σε θέρμανση των γυάλινων θερμοκηπίων, ενώ στα πλαστικά θερμοκήπια οι ανάγκες για θέρμανση υπερεκτιμώταν κατά 20% (Pieters and Deltour, 1997). Το προσομοίωμα MICGREEN, αντί να λαμβάνει υπόψιν την ενέργεια που εισάγεται από το σύστημα θέρμανσης, υπολόγιζε την μεταβολή της ενέργειας που εξέρχεται από το θερμοκήπιο (με το άνοιγμα των παραθύρων) (Singh *et al.*, 2006). Τέλος, από τα αποτελέσματα του προσομοιώματος HORTITRANS, προέκυψε ότι η πρόβλεψη της υγρασίας, της διαπνοής των φυτών και της ποσότητας του νερού που υδροποιείται, εμπεριέχει σφάλμα της τάξεως του 8% (Jolliet, 1994). Επομένως και στα τρία μοντέλα προσομοίωσης παρατηρήθηκαν αστοχίες και χρειάζεται περαιτέρω πειραματικά δεδομένα για πιο αξιόπιστα συμπεράσματα.

1.7. Αγγούρι (*Cucumis sativus* L.)

1.7.1. Ταξινόμηση και βοτανικά χαρακτηριστικά

Η αγγουριά ανήκει στην οικογένεια των κολοκυνθοειδών (Cucurbitaceae) και στο είδος *Cucumis sativus* L. Τα καλλιεργούμενα φυτά αγγουριάς είναι είτε διπλοειδή ($2n=14$), είτε τετραπλοειδή ($4n=28$) (Κανάκης, 2002). Είναι ετήσιο, ποώδες φυτό θερμής εποχής. Ο βλαστός του φυτού είναι ποώδης με έρπουσα αύξηση ενώ στην επιφάνεια του φέρει τριχίδια. Το μήκος του εξαρτάται από τον γονότυπο και μπορεί είτε να έχει μεγάλη ανάπτυξη με μεγάλα μεσογονάτια διαστήματα και να φτάνει συνήθως 3-5 m σε μήκος, ή να έχει θαμνώδη ανάπτυξη με μικρότερα μεσογονάτια διαστήματα (Ολύμπιος, 2001).

Για υπαίθρια καλλιέργεια προτιμώνται οι γονότυποι με θαμνώδη ανάπτυξη, ενώ αντίθετα για θερμοκηπιακές καλλιέργειες αυτοί με τα μεγαλύτερα μεσογονάτια διαστήματα (Ντόγρας, 2006; Χα και Πετρόπουλος, 2014). Τα φύλλα εκφύονται

εναλλάξ στον βλαστό. Έχουν αρκετά μεγάλο έλασμα, μακρύ μίσχο και φέρουν τρίχες. Τα άνθη εκφύονται από τις μασχάλες των φύλλων και είναι είτε μονήρη ή σε δέσμες. Τα αρσενικά άνθη φέρουν μακρύ και λεπτό ποδίσκο, με τρεις χωρισμένους στήμονες. Στα θηλυκά άνθη ο ποδίσκος είναι μακρύς αλλά διογκωμένος και η ωοθήκη είναι τρίχωρη και φέρει τρία στίγματα. Αυτά τα άνθη ανοίγουν τις πρωινές ώρες και παραμένουν ανοιχτά για 1-2 ημέρες. Ο καρπός είναι ράγα κυλινδρικού σχήματος, μακρύς ή κοντός με επιφάνεια λεία ή με μικρά εξογκώματα ή αγκάθια και χρώματος πράσινου ή κιτρινοπράσινου, ανάλογα με την ποικιλία (Δημητράκης, 1998; Παρασκευόπουλος, 2002).



Εικόνα 6. Καλλιέργεια αγγουριάς (Πηγή: Schrader *et al.*, 2013).

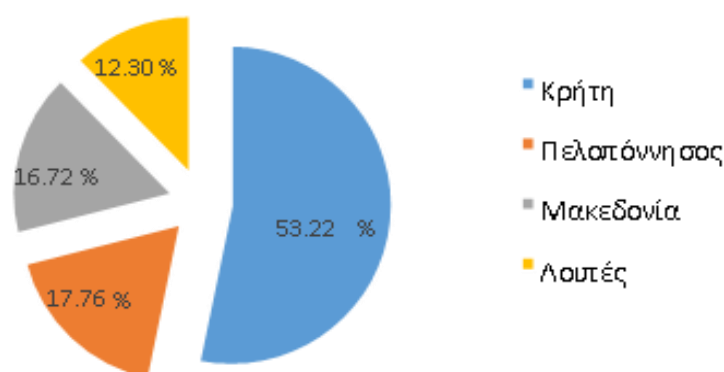
1.7.2. Θερμοκηπιακή καλλιέργεια αγγουριάς στην Ελλάδα

Τα φυτά αγγουριάς καλλιεργούνται είτε στην ύπαιθρο είτε σε θερμοκήπια. Όταν η φύτευση τους γίνεται στην ύπαιθρο τότε η καλλιέργεια τους ξεκινά από τον σπόρο, σε αντίθεση με τα θερμοκήπια όπου τα φυτά αφού αναπτυχθούν αρχικά σε σπορεία μεταφυτεύονται στις τελικές τους θέσεις στο θερμοκήπιο. Στην θερμοκηπιακή καλλιέργεια αγγουριάς η πρώτη συγκομιδή γίνεται 30-40 ημέρες μετά την εγκατάσταση των φυτών, το οποίο ποικίλει ανάλογα με την ποικιλία και τις κλιματικές συνθήκες (Hochmuth, 2012).

Στην Ελλάδα η θερμοκηπιακή καλλιέργεια του αγγουριού αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές καλλιέργειες κηπευτικών. Η συνολική καλλιεργούμενη έκταση αγγουριών στην χώρα ανέρχεται στα 30.000 στρέμματα από τα οποία τα 16.000 αποτελούν θερμοκηπιακές καλλιέργειες, ενώ τα υπόλοιπα 14.000 στρέμματα

καταλαμβάνονται από υπαίθριες καλλιέργειες αγγουριάς. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία η Κρήτη κατέχει το 53,22% της θερμοκηπιακής καλλιεργούμενης έκτασης αγγουριάς σε εθνικό επίπεδο, ενώ ακολουθούν η Πελοπόννησος και η Μακεδονία με ποσοστά 17,76% και 16,72% αντίστοιχα (Εικόνα 7). Ενώ, όλες οι υπόλοιπες περιοχές ακολουθούν με χαμηλότερα ποσοστά (Κανάκης,2002).

Ποσοστά έκτασης θερμοκηπιακής καλλιέργειας αγγουριάς στην Ελλάδα



Εικόνα 7. Ποσοστά % έκτασης της θερμοκηπιακής καλλιέργειας αγγουριάς στην Ελλάδα.

Τα φυτά αγγουριάς μπορούν να αναπτυχθούν σε πολλούς τύπους εδαφών. Ωστόσο, η ανάπτυξη τους προάγεται στα βαθιά μέσης σύστασης, γόνιμα και πλούσια σε οργανική ύλη, πηλώδη ή αργιλοπηλώδη εδάφη. Το pH του εδάφους θα πρέπει να είναι μεταξύ 5.5 - 7.0 με άριστη τιμή το 6.5 (Χα και Πετρόπουλος, 2014).

Η θερμοκρασία του υποστρώματος για το φύτρωμα του σπόρου πρέπει να είναι πάνω από 14°C. Η θερμοκρασία του εδάφους του θερμοκηπίου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 15°C, (με άριστη τους 21°C). Όταν η θερμοκρασία του εδάφους πέσει κάτω από τους 13°C, η ανάπτυξη των φυτών περιορίζεται. Η άριστη θερμοκρασία του αέρα για την φυσιολογική ανάπτυξη του φυτού είναι 24-28 °C κατά την διάρκεια της ημέρας. Για την άνθηση των φυτών, η θερμοκρασία του αέρα θα πρέπει να ξεπερνά τους 14°C, ενώ οι άριστες θερμοκρασίες είναι 18-21°C. Οι απαιτήσεις του αγγουριού έχουν άμεση σχέση με την ένταση του ηλιακού φωτός. Η θερμοκρασία δεν θα πρέπει να ξεπερνά τους 23°C όταν επικρατεί συννεφιά και τους 28°C όταν υπάρχει λιακάδα. Μεταξύ ημέρας και νύχτας, η θερμοκρασία δεν θα πρέπει να έχει μεγάλη διαφορά. Οι μεγάλες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας

προκαλούν διαταραχές στη φυσιολογική ανάπτυξη του φυτού (Papadopoulos, 1994). Η άριστη ένταση του φωτός είναι μεταξύ 15.000-40.000 Lux (Κανάκης, 2002). Εκτός από την ένταση του φωτός, σημαντικό ρόλο στην καλλιέργεια των φυτών έχει και η φωτοπερίοδος, καθώς η χαμηλή φωτοπερίοδος επηρεάζει αρνητικά την έκφυση των φύλλων. Η ανάπτυξη, η άνθιση και η καρποφορία του φυτού είναι άριστη σε μήκος μέρας, μικρότερο από 12 ώρες, με την προϋπόθεση ότι η ένταση του φωτός θα βρίσκεται σε ικανοποιητικό επίπεδο. Σε μέρες βραχείας διάρκειας (κάτω των 8 ωρών) επιμηκύνεται το στέλεχος του φυτού, τα μεσογονάτια διαστήματα είναι μικρά, τα φύλλα γίνονται μικρά χωρίς έλικες, τα φυτά αποκτούν αδύνατη, χλωμή όψη, μεγαλώνουν και καρποφορούν δύσκολα και περιορίζονται οι αποδόσεις. Επίσης, για την επίτευξη υψηλότερων αποδόσεων είναι απαραίτητη η υψηλή ένταση φωτός μεγάλης διάρκειας (Χα και Πετρόπουλος, 2014).

Τα φυτά της αγγουριάς απαιτούν υψηλά επίπεδα σχετικής υγρασίας (70-80%) στο χώρο του θερμοκηπίου. Όμως η υπερβολική υγρασία (>90%) και ειδικότερα τα επίπεδα κορεσμού της ατμόσφαιρας μπορεί να αποδειχτούν καταστροφικά επειδή ευνοούν τον πολλαπλασιασμό και τη διασπορά των παθογόνων μικροοργανισμών. Σημαντική είναι η αποφυγή σχηματισμού σταγονιδίων νερού στην εσωτερική επιφάνεια του υλικού κάλυψης και η πτώση αυτών πάνω στην φυλλική επιφάνεια. Γι' αυτό επιβάλλεται το άνοιγμα του καλύμματος του θερμοσπορείου ή η λειτουργία του συστήματος εξαερισμού (Κανάκης, 2002).

Το φυτό αναπτύσσεται καλύτερα και δίνει μεγαλύτερες αποδόσεις με τον εμπλουτισμό του αέρα του θερμοκηπίου με CO₂. Η άριστη συγκέντρωση είναι μεταξύ 1000-1200 ppm. Τέλος, η αποτελεσματικότητα της ανθρακολίπανσης προϋποθέτει άριστες ή ικανοποιητικές συνθήκες φωτισμού, θερμοκρασίας και θρέψης (Ολύμπιος, 1994). Η συγκομιδή ξεκινά δύο μήνες μετά την μεταφύτευση, όταν ο καρπός είναι ακόμη άγουρος και έχει μέγεθος 13-17cm. Η παραγωγή επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες (ποικιλία, συνθήκες καλλιέργειας, κ.α.) και η απόδοση είναι γύρω στους 10-12 τόνους/στρέμμα.

1.7.3. Υδροπονική καλλιέργεια αγγουριού

Εκτός από την αυξανόμενη ζήτηση θερμοκηπιακών προϊόντων, τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον για τις υδροπονικές καλλιέργειες λαχανικών. Τα τελευταία χρόνια, η υδροπονική καλλιέργεια αγγουριάς στην Ελλάδα έχει αρχίσει να αναπτύσσεται σημαντικά.

Μέχρι προσφάτως, τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υποστρώματα σε υδροπονική καλλιέργεια αγγουριού ήταν αδρανή υποστρώματα. Όπως, μη ανανεώσιμοι πόροι, όπως τύρφη), ή μη βιοαποικοδομήσιμα ή μη ανακυκλώσιμα υλικά, όπως ο πετροβάμβακας (Hardgrave, 1995; Wilson and Stoffella, 2003).

Τα θρεπτικά διαλύματα που χρησιμοποιούνται στην υδροπονική καλλιέργεια του αγγουριού, διαφοροποιούνται ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης του φυτού και τον τύπο του υδροπονικού συστήματος. Σε ανοιχτά υδροπονικά συστήματα, η σύσταση του διαλύματος με το οποίο τροφοδοτούνται τα φυτά δεν είναι η ίδια με αυτή του θρεπτικού διαλύματος στον χώρο των ριζών. Επομένως, είναι σημαντικό να ελέγχεται τακτικά η σύσταση, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και το pH του θρεπτικού διαλύματος στον χώρο των ριζών, αφού αυτό είναι το διάλυμα με το οποίο έρχονται σε άμεση επαφή οι ρίζες και αντλούν τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία. Παρακάτω δίνονται οι συνιστώμενες συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα τροφοδοσίας και στο θρεπτικό διάλυμα στον χώρο των ριζών σε διάφορα στάδια ανάπτυξης του αγγουριού (Πίνακες 1 και 2) (Σάββας, 2009).

Πίνακας 1. Συνιστώμενες συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα σε ανοιχτά συστήματα υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριού, ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης των φυτών.

		Διαβροχή	Μέχρι Κορυφολ.	Κορυφολ.-Τέλος
EC	dS/m	2,50	2,20	2,00
pH opt,		5,60	5,60	5,60
[K]	mmol/l	7,10	7,00	6,00
[Ca]	mmol/l	4,25	3,50	3,35
[Mg]	mmol/l	2,25	1,50	1,25
[NH₄]	mmol/l	1,00	1,25	1,00
[NO₃]	mmol/l	14,6	14,0	12,20
[SO₄]	mmol/l	2,50	1,25	1,25
[H₂PO₄]	mmol/l	1,00	1,25	1,00
[Fe]	μmol/l	15	15	15
[Mn]	μmol/l	10	10	10
[Zn]	μmol/l	4	4	4
[Cu]	μmol/l	0,7	0,7	0,7
[B]	μmol/l	35	25	25
[Mo]	μmol/l	0,5	0,5	0,5

Πίνακας 2. Συνιστώμενες συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα στον χώρο των ριζών, σε ανοιχτά συστήματα υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριού, ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης των φυτών.

		Μέχρι Κορυφολ.	Κορυφολ.-Τέλος
EC	dS/m	2,5-2,8	2,6-3,0
pH opt,		5,5-6,5	5,5-6,5
[K]	mmol/l	7,00	7,00
[Ca]	mmol/l	5,50	6,00
[Mg]	mmol/l	3,00	3,00
[NH₄]	mmol/l	<0,8	<0,4
[Na]	mmol/l	<5,0	<8,0
[SO₄]	mmol/l	3,50	3,00
[NO₃]	mmol/l	16,0	18,0
[H₂PO₄]	mmol/l	1,00	1,00
[Cl]	mmol/l	<6,0	<8,0

Στα κλειστά συστήματα υδροπονικής καλλιέργειας, λόγω της ανακύκλωσης του θρεπτικού διαλύματος, οι συγκεντρώσεις του ασβεστίου (Ca^{2+}), μαγνησίου (Mg^{2+}) και θεικών (SO_4^{2-}) είναι μικρότερες στο θρεπτικό διάλυμα, συγκριτικά με τα ανοιχτά υδροπονικά συστήματα, γιατί τα στοιχεία αυτά συνήθως απορροφώνται δυσκολότερα και συσσωρεύονται στο νερό της ανακύκλωσης, με αποτέλεσμα να μην διατηρείται η σωστή αναλογία ιόντων (Σάββας, 2009).

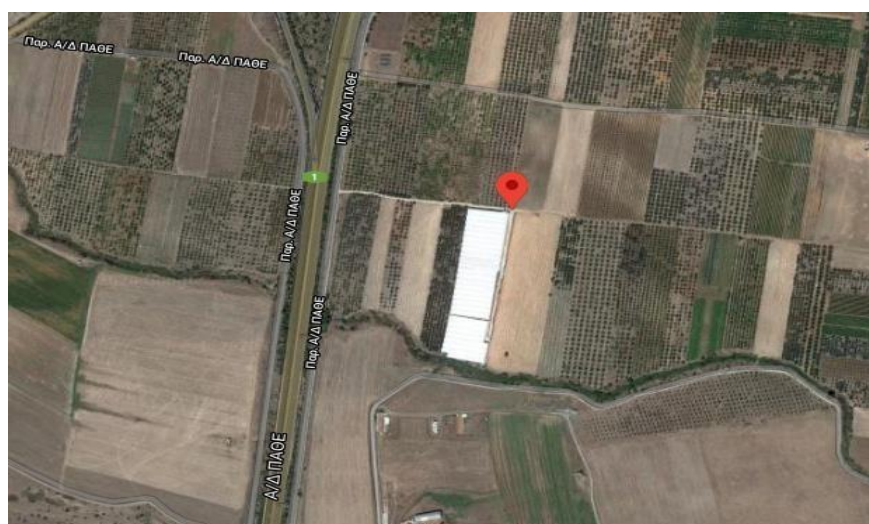
1.8. Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας πειραματικής μελέτης ήταν η σύγκριση της πραγματικής ανάπτυξης των φυτών αγγουριάς υδροπονικής καλλιέργειας σε σχέση με την προσδοκώμενη ανάπτυξη που προέκυψε από το υπολογιστικό μοντέλο SIOM. Ο κύριος στόχος της παρούσας διατριβής ήταν η εξαγωγή συμπερασμάτων από την χρήση του μοντέλου SIOM και ο εντοπισμός πιθανών αποκλίσεων, ώστε να οδηγηθούμε σε μια σειρά βελτιωτικών ενεργειών με στόχο την ανάπτυξη μιας πιο ανταγωνιστικής καλλιέργειας.

2. Υλικά και Μέθοδοι

2.1. Πειραματικές εγκαταστάσεις

Η παρούσα πτυχιακή διατριβή πραγματοποιήθηκε σε ιδιόκτητο υδροπονικό θερμοκήπιο, το οποίο εδρεύει στην περιοχή της Νέας Αγκιάλου του νομού Μαγνησίας, σε απόσταση 27 χιλιομέτρων από την πόλη του Βόλου, με γεωγραφικές συντεταγμένες $39^{\circ} 15'$, $22^{\circ} 44'$ και υψόμετρο 21 m (Εικόνα 8 και 9). Το πείραμα διεξήχθη σε τρία όμοια, διαδοχικά θερμοκήπια που σχημάτιζαν έναν ενιαίο χώρο. Το θερμοκήπιο ήταν πολλαπλό τροποποιημένο τοξωτό με μήκος 60 m και 48 m πλάτος, ενώ η συνολική έκταση των εγκαταστάσεων ήταν 2.880 m². Το ύψος του κορφιάτη ήταν 5.2 m και το ύψος της υδρορροής 3.5 m. Ο σκελετός του θερμοκηπίου ήταν από γαλβανισμένο χάλυβα. Το υλικό κάλυψης που χρησιμοποιήθηκε για την οροφή αποτελούνταν από διπλό στρώμα πολυαιθυλενίου. Αντίθετα, τα πλαϊνά τοιχώματα ήταν καλυμμένα με πολυκαρβονικό στρώμα. Κατά την είσοδο στο θερμοκήπιο, υπήρχαν ειδικά διαμορφωμένοι χώροι με σκοπό την αποφυγή της άμεσης επαφής με την καλλιέργεια στους οποίους στεγάζονταν τα γραφεία, τα αποδυτήρια των εργαζομένων, οι τουαλέτες, το συσκευαστήριο, ο χώρος του λέβητα, το αντλιοστάσιο, καθώς επίσης και η είσοδος των φορτηγών τροφοδοσίας.



Εικόνα 8. Δορυφορική λήψη των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων (Google (n.d.)).



Εικόνα 9. Τρεις διαδοχικοί θάλαμοι διεξαγωγής των πειραματικών μετρήσεων (Google (n.d.)

2.2. Αερισμός και σκίαση θερμοκηπίου

Το θερμοκήπιο διαθέτει ένα πλήρες και σύγχρονο σύστημα αερισμού και δροσισμού. Πιο αναλυτικά, ήταν εξοπλισμένο με παράθυρα οροφής, καθώς και με τοίχωμα υγρής παρειάς. Ακριβώς απέναντι από την υγρή παρειά ήταν εγκατεστημένο ένα σύστημα μεγάλων ανεμιστήρων δυναμικού αερισμού. Επίσης, κατά μήκος του θερμοκηπίου και στο ύψος της υδρορροής ήταν εγκατεστημένοι μικρότεροι ανεμιστήρες ανάμειξης του αέρα, οι οποίοι υποβοηθούσαν στη σωστή και οριζόντια κίνηση του αέρα στον εσωτερικό χώρο του θερμοκηπίου (Εικόνα 10).



Εικόνα 10. Ανεμιστήρες δυναμικού αερισμού (αριστερά) και σύστημα υγρής παρειάς (δεξιά).



Εικόνα 11. Ανεμιστήρας ανάμειξης του αέρα (αριστερά) και παράθυρα οροφής (δεξιά).

2.3. Θέρμανση θερμοκηπίου

Για την κάλυψη των αναγκών σε θέρμανση, το θερμοκήπιο ήταν εξοπλισμένο με καυστήρα μαζούτ. Η μεταφορά του θερμού νερού γινόταν με μεταλλικούς σωλήνες μέχρι ένα σημείο της καλλιέργειας και έπειτα με πλαστικούς σπιράλ σωλήνες στο δάπεδο, διανέμοντας ομοιόμορφα την θερμότητα στο χώρο (Εικόνα 12).



Εικόνα 12. Μεταφορά θερμού νερού μέσω μεταλλικών σωλήνων (αριστερά) και πλαστικών σωλήνων (δεξιά)

2.4. Καλλιέργειες εντός του θερμοκηπίου

Κατά την περίοδο διεξαγωγής του πειράματος, στο θερμοκήπιο καλλιεργούνταν φυτά τομάτας και αγγουριού. Στις Εικόνες 13 και 14 παρουσιάζεται ο θάλαμος όπου ήταν εγκατεστημένη η καλλιέργεια αγγουριού και έλαβε χώρα η διεξαγωγή της

παρούσας μελέτης. Η θερμοκηπιακή καλλιέργεια αγγουριάς πραγματοποιήθηκε για δύο καλλιεργητικές περιόδους μέσα στο έτος. Η πρώτη καλλιέργεια εγκαταστάθηκε στο θερμοκήπιο από τον Ιανουάριο έως τα μέσα Ιουνίου του ίδιου έτους, όπου και αποξηλώθηκε με σκοπό την εγκατάσταση της δεύτερης καλλιέργειας από τα τέλη Ιουνίου μέχρι τις αρχές Ιανουαρίου. Η φύτευση έγινε σε υπόστρωμα πετροβάμβακα ($3 \text{ φυτά}/\text{m}^2$). Οι εργασίες που γίνονταν τις πρώτες εβδομάδες από την εγκατάσταση της καλλιέργειας αφορούσαν στην στήριξη των φυτών σε σχοινιά καθώς και σε προγραμματισμένους ψεκασμούς. Το τελευταίο δεκαήμερο του πρώτου μήνα ξεκίνησε η συγκομιδή των καρπών και η αραίωση των φύλλων από την βάση των φυτών. Στη συνέχεια, έλαβε χώρα το κατέβασμα των φυτών στην περίπτωση όπου το ύψος των φυτών ξεπερνούσε το όριο.



Εικόνα 13. Διαδικασία αραίωσης των φύλλων (αριστερά) και αποφυλλωμένα φυτά αγγουριού (δεξιά)

2.5. Εγκατάσταση συστήματος αισθητήρων

Για την καταγραφή των απαιτούμενων μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν δύο αυτόνομοι μετεωρολογικοί σταθμοί τύπου iMETOS (PessI instruments), οι οποίοι ήταν ενεργειακά ανεξάρτητοι και εξοπλισμένοι με ενσωματωμένο modem UMTS/CDMA, για απευθείας επικοινωνία με την online πλατφόρμα FieldClimate. Οι μετεωρολογικοί σταθμοί έχουν τη δυνατότητα να χειριστούν μέχρι και 600 αισθητήρες. Η συγκεκριμένη πλατφόρμα αποτελεί ένα διαδικτυακό cloud, για τους χρήστες των συστημάτων iMETOS. Όλες οι συσκευές iMETOS στέλνουν δεδομένα στους διακομιστές του ιστού FieldClimate. Έτσι οι πληροφορίες αυτές είναι εύκολα

προσβάσιμες διαδικτυακά μέσω επιτραπέζιου υπολογιστή ή από την εφαρμογή ενός κινητού.



Εικόνα 14. Εσωτερικός μετεωρολογικός σταθμός (αριστερά) και εξωτερικός μετεωρολογικός σταθμός με ανεμόμετρο (δεξιά)

Τέλος, τα κλιματολογικά δεδομένα που είχαν συλλεχθεί για την περιοχή και τα κατασκευαστικά στοιχεία του θερμοκηπίου εισήχθησαν στο μοντέλο SIOM όπου προέκυψε μια προσομοίωση με την πορεία του κλίματος εντός του θερμοκηπίου και της προσδοκώμενης θερμοκηπιακής καλλιέργειας αγγουριάς.

2.6. Πειραματική διαδικασία

Στο πλαίσιο της παρούσας πτυχιακής διατριβής πραγματοποιήθηκαν δύο πειραματικές μελέτες στο θερμοκήπιο. Η πρώτη πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε από τις 08/10/18 έως και τις 07/12/18 (χειμερινή περίοδος). Η δεύτερη περίοδος ξεκίνησε στις 28/03/19 και ολοκληρώθηκε στις 16/05/19 (εαρινή περίοδος).

Για την καταγραφή των μετρήσεων τοποθετήθηκαν δύο μετεωρολογικοί σταθμοί, ένας στο εσωτερικό και ένας στο εξωτερικό μέρος του θερμοκηπίου. Οι μετεωρολογικοί σταθμοί τοποθετήθηκαν με σύρμα σε σημεία που θα κατέγραφαν απρόσκοπτα τα δεδομένα στη διάρκεια του εικοσιτετράωρου, σε καθημερινή βάση, χωρίς να εμποδίζουν τις καλλιεργητικές εργασίες. Ο ένας σταθμός τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, καταγράφοντας την μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας, την μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή της θερμοκρασίας του αέρα, την μέση τιμή της σχετικής υγρασίας και την ελάχιστη και μέση τιμή του σημείου

δρόσου. Ο δεύτερος μετεωρολογικός σταθμός τοποθετήθηκε εξωτερικά του θερμοκηπίου μετρώντας την μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας, την μέγιστη και μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου, την μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή της θερμοκρασίας του αέρα καθώς και την μέση τιμή της σχετικής υγρασίας. Οι σταθμοί παρέμειναν στις ίδιες θέσεις, χωρίς να μετακινηθούν και για τις δύο περιόδους διεξαγωγής των πειραμάτων. Όλες οι παραπάνω τιμές καταγράφονταν ανά 10 λεπτά μέσω της εφαρμογής FieldClimate και των αισθητήρων iMETOS.

Κατά την πρώτη πειραματική διαδικασία, επιλέχθηκαν 12 τυχαία φυτά τα οποία βρίσκονταν σε διαφορετικά σημεία στον χώρο του θερμοκηπίου, ώστε να επιτευχθεί αυξημένη ποικιλομορφία των δεδομένων. Οι πειραματικές μετρήσεις ξεκίνησαν 20 ημέρες μετά τη μεταφύτευση των φυτών. Οι μετρήσεις που έλαβαν χώρα αφορούσαν το ύψος του κάθε φυτού, τον αριθμό των φύλλων και των καρπών, καθώς και το μήκος και πλάτος των φύλλων του και πραγματοποιούνταν κάθε δέκα ημέρες. Ομοίως, κατά την διεξαγωγή του δεύτερου πειράματος συλλέχθηκαν τα ίδια δεδομένα αλλά σε αυτή τη περίπτωση επιλέχθηκαν 14 φυτά. Σε αυτή τη περίπτωση η έναρξη της καταγραφής των δεδομένων έγινε 20 ημέρες μετά τη μεταφύτευση. Τα φυτά επιλέχθηκαν με την ίδια μέθοδο, όπως και στην πρώτη περίοδο. Κατά τη διάρκεια των πέντε πρώτων εβδομάδων οι τιμές καταγράφονταν ανά 7 ημέρες, ενώ οι δύο τελευταίες μετρήσεις έλαβαν χώρα με διαφορά 10 ημερών. Τέλος, κατά τη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο πραγματοποιήθηκε καταγραφή των δεδομένων θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας ανά 10 λεπτά.



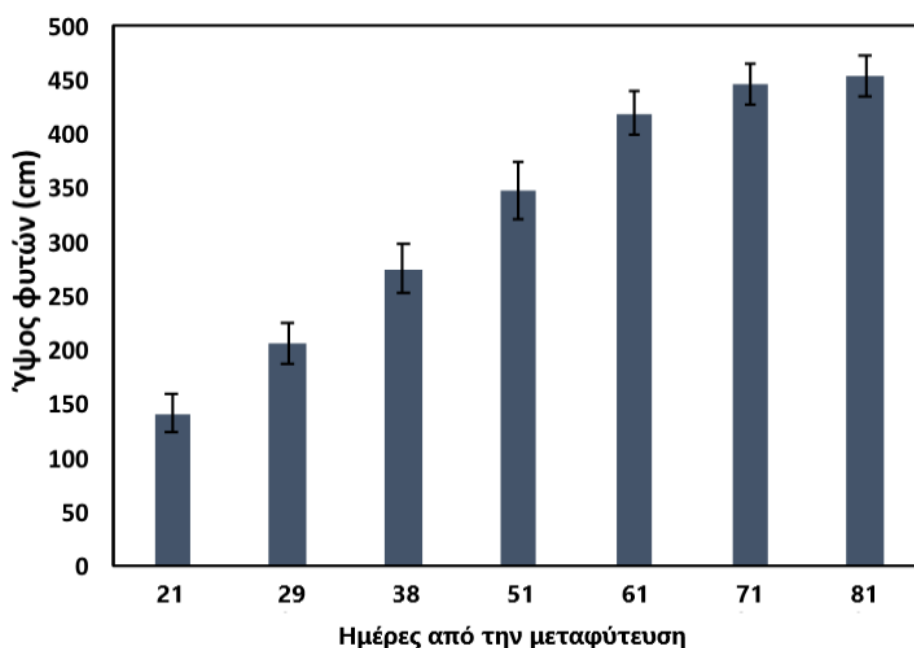
Εικόνα 15. Σήμανση τυχαίων φυτών αγγουριάς στον χώρο του θερμοκηπίου

3. Αποτελέσματα

3.1. Πρώτη καλλιεργητική περίοδος

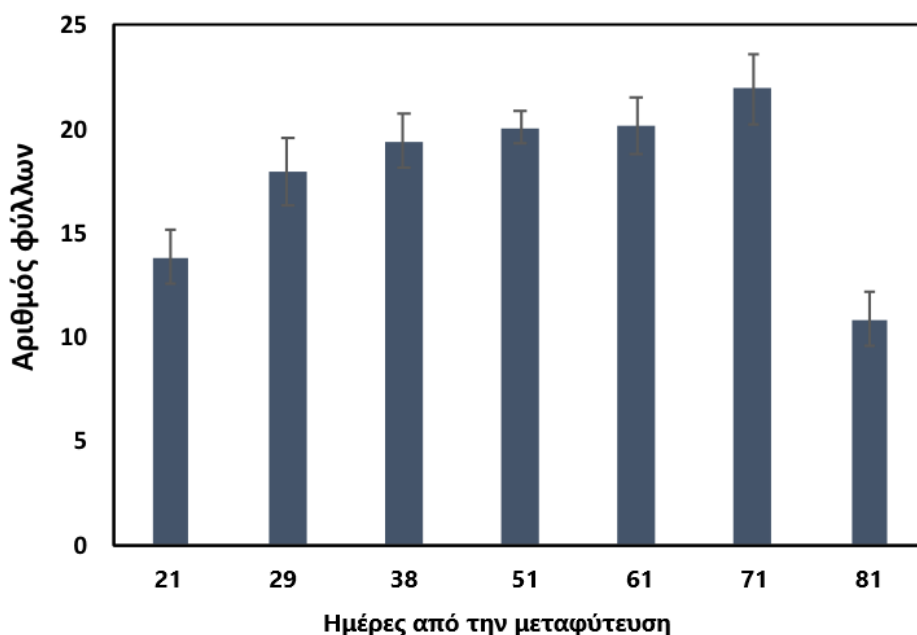
3.1.1. Ανάπτυξη καλλιέργειας

Γενικά, τα φυτά αγγουριάς αναπτύχθηκαν σε ικανοποιητικό βαθμό. Το ύψος των φυτών αυξήθηκε με την πάροδο των ημερών φτάνοντας προς το τέλος της ανάπτυξης τους τα 4.55 m (Διάγραμμα 1). Ο ρυθμός ανάπτυξης της καλλιέργειας ήταν σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος με μέσο ύψος αύξησης τα 70 cm ανά 10 περίπου ημέρες. Την 81^η ημέρα των μετρήσεων το τελικό ύψος των φυτών έφτασε τα 4.55 m (αύξηση του ύψους κατά 10 cm συγκριτικά με την 71^η ημέρα).



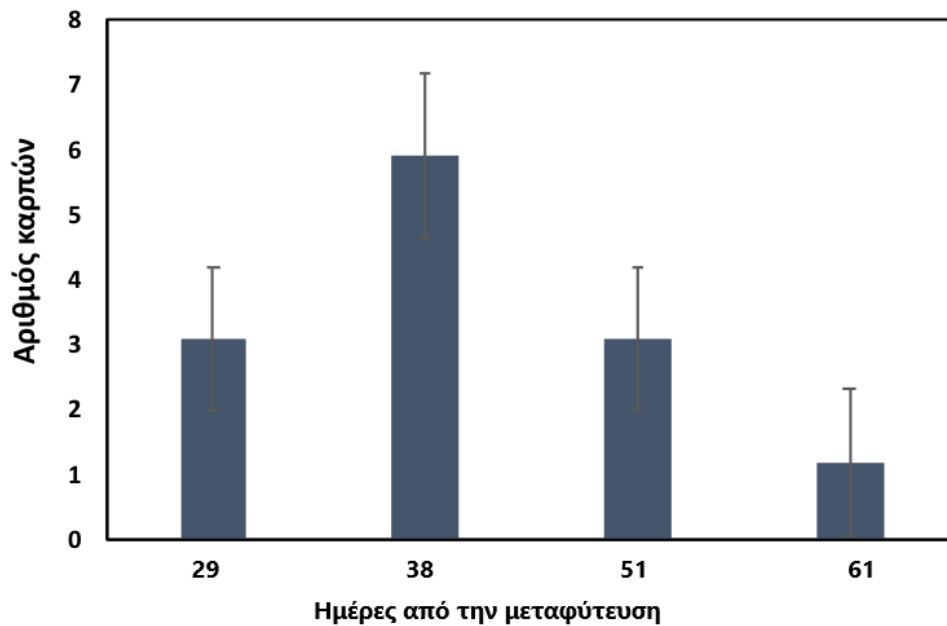
Διάγραμμα 1. Μεταβολή του ύψους (cm) των φυτών αγγουριάς κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.

Ο μέσος αριθμός φύλλων των φυτών κυμαίνονταν από 20 έως 22 φύλλα ανά φυτό. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2, από την 21^η ημέρα μέχρι και την 71^η ημέρα των μετρήσεων ο αριθμός των φύλλων ανά φυτό παρουσίαζε αύξηση. Ωστόσο, την τελευταία εβδομάδα του πειράματος πραγματοποιήθηκε αραίωμα των φύλλων από την βάση των φυτών που αποτελεί μια απαραίτητη καλλιεργητική τεχνική. Για το λόγο αυτό την 81^η ημέρα των μετρήσεων καταγράφηκε μικρότερος αριθμός φύλλων των φυτών αγγουριάς.



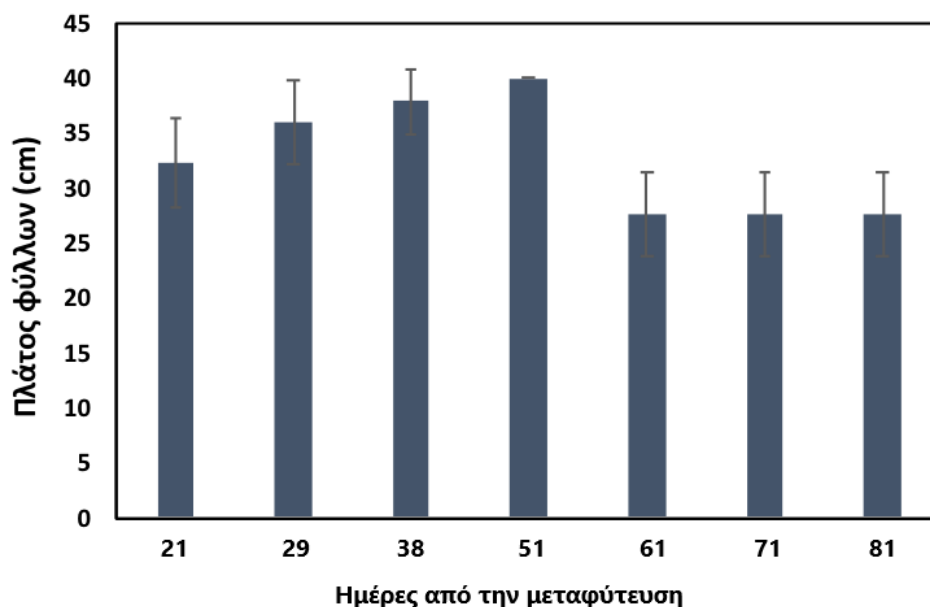
Διάγραμμα 2. Μεταβολή του αριθμού των φύλλων των φυτών αγγουριάς κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.

Η μέγιστη παραγωγή καρπών παρατηρήθηκε την 38^η ημέρα από την έναρξη των μετρήσεων. Η παραγωγή καρπών ξεκίνησε από την 29^η ημέρα από την τελική μεταφύτευση των φυτών στο θερμοκήπιο μέχρι και την 61^η. Την 29^η ημέρα η παραγωγή κατά μέσο όρο ανήλθε στους 3 καρπούς/φυτό. Αντίθετα, την 38^η ημέρα η απόδοση της καλλιέργειας ήταν διπλάσια συγκριτικά με την 29^η ημέρα, καταγράφοντας κατά μέσο όρο 6 καρπούς/φυτό. Την 51^η ημέρα η παραγωγή μειώθηκε σε 3 καρπούς/φυτό, ενώ την 61^η ημέρα παρατηρήθηκε περεταίρω μείωση καταγράφοντας συνολικά 1 καρπό/φυτό. Από εκείνη την χρονική περίοδο μέχρι και το τέλος του πειράματος η παραγωγή ήταν μηδενική (Διάγραμμα 3).

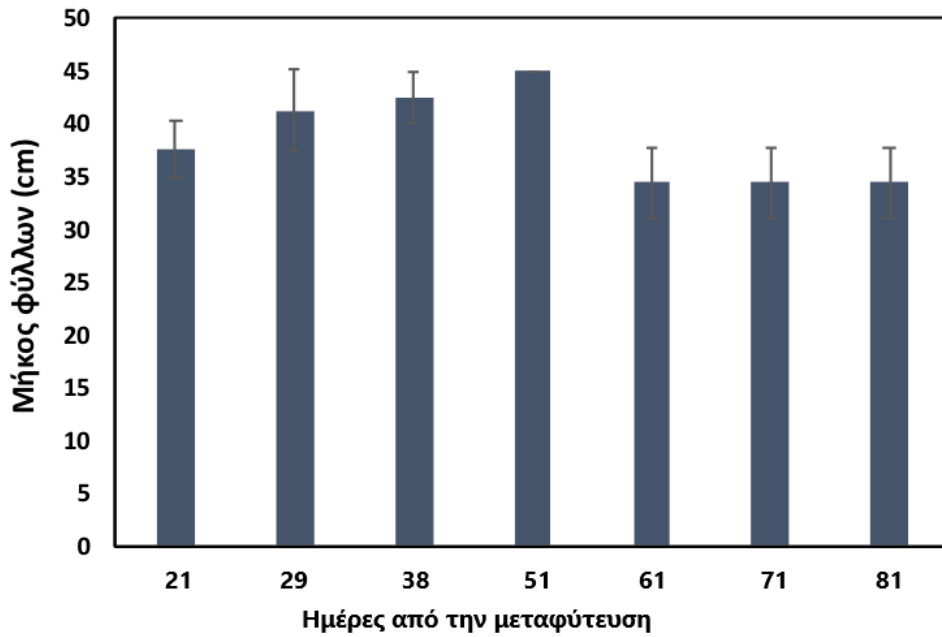


Διάγραμμα 3. Μεταβολή του αριθμού των καρπών των φυτών αγγουριάς κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.

Στα Διαγράμματα 4 και 5 παρουσιάζεται το πλάτος και το μήκος των φυτών κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Τα φυτά ανέπτυξαν μεγάλα και πλατιά φύλλα. Όμως, από την 61^η ημέρα των μετρήσεων και έπειτα παρατηρήθηκε μείωση του μεγέθους των φύλλων, τόσο σε πλάτος όσο και σε μήκος.



Διάγραμμα 4. Μεταβολή του πλάτους (cm) των φύλλων αγγουριάς κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.

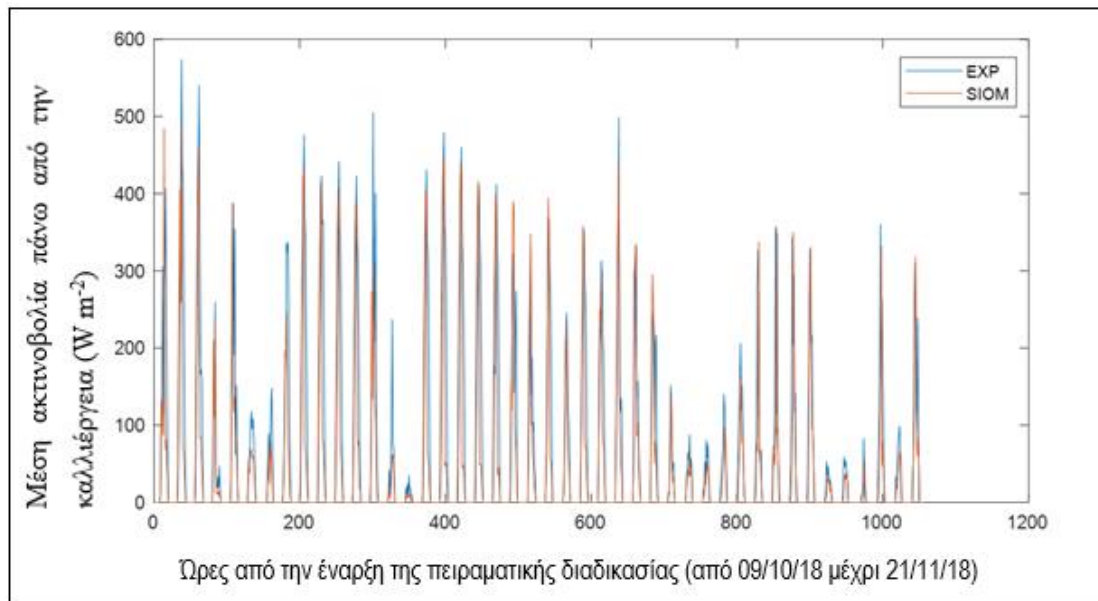


Διάγραμμα 5. Μεταβολή του μήκους (cm) των φύλλων αγγουριάς κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.

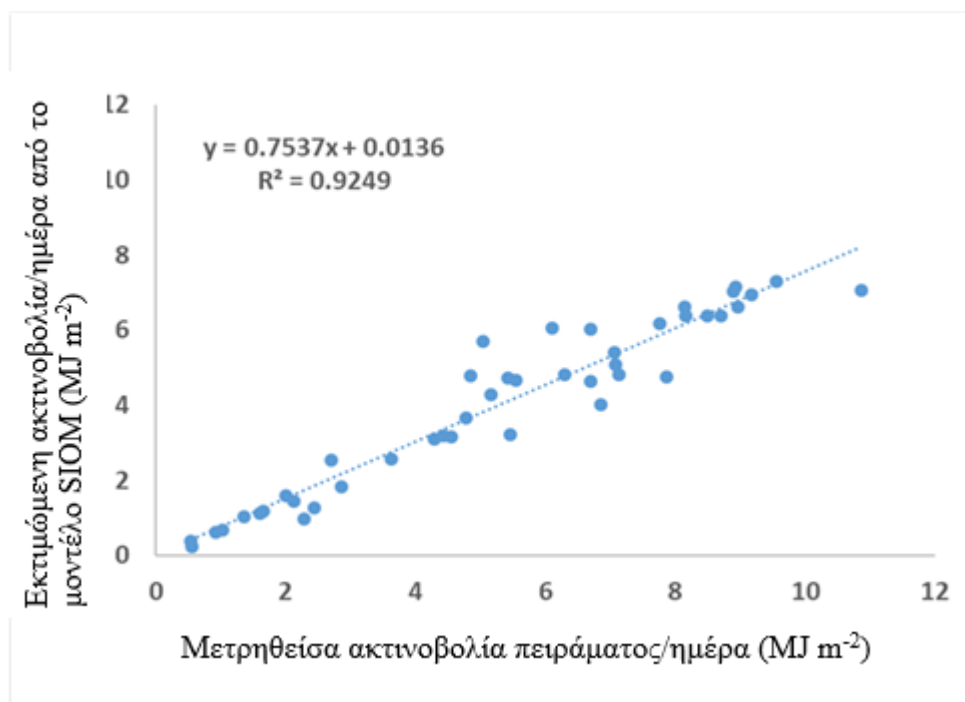
3.1.2. Παρατηρήσεις πειράματος έναντι μοντέλου SIOM

3.1.2.1. Ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία πάνω από την καλλιέργεια κυμαινόταν σε επιθυμητά επίπεδα το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, με εξαίρεση το τέλος της πειραματικής διαδικασίας όπου σημειώθηκε μια μείωση των τιμών της ακτινοβολίας. Οι τιμές που καταγράφονταν για την ηλιακή ακτινοβολία πάνω από την καλλιέργεια, ταυτιζόταν με αυτές που προέκυψαν από το μοντέλο SIOM, διότι ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 ήταν ίσος με 0.92. Επομένως, το μοντέλο SIOM κατάφερε να προσδιορίσει με επιτυχία την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω από την καλλιέργεια (Διάγραμμα 6 και 7).



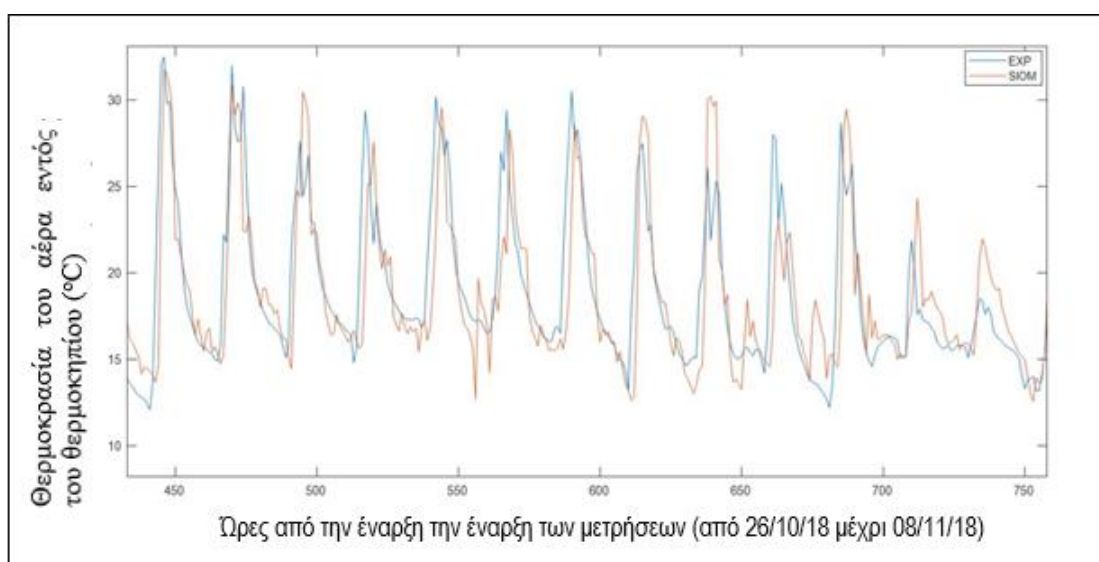
Διάγραμμα 6. Σύγκριση των μέσων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω από την καλλιέργεια μεταξύ των μετρήσεων του πειράματος και του μοντέλου SIOM κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.



Διάγραμμα 7. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των μετρήσιμων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας ($MJ m^{-2}$) και των τιμών του μοντέλου SIOM κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.

3.1.2.2. Θερμοκρασία του αέρα

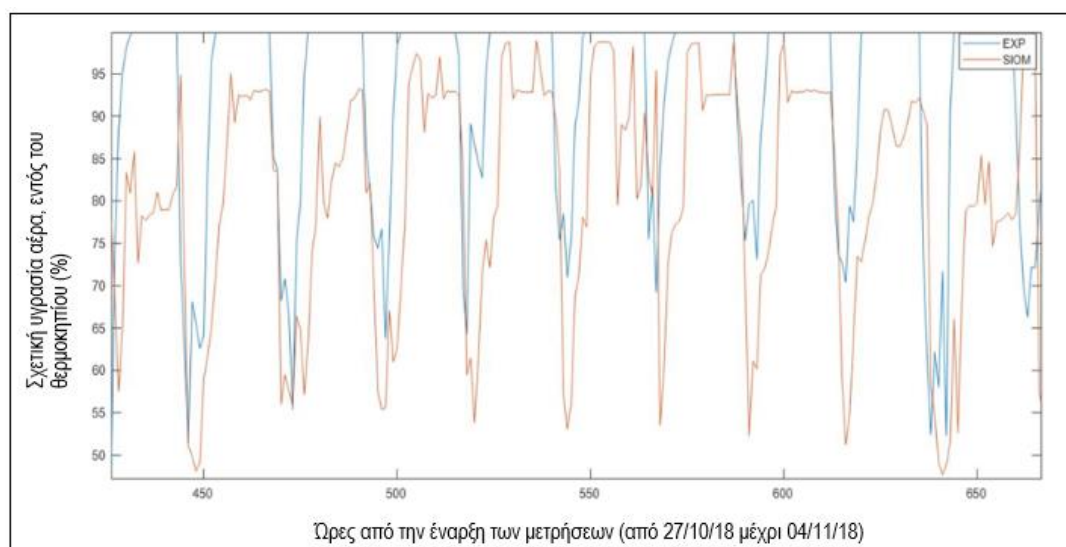
Όσον αφορά στις μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα πάνω από την καλλιέργεια, οι μετρήσεις του πειράματος ταυτιζόταν τις περισσότερες μέρες με τις τιμές που προέκυψαν από το μοντέλο SIOM (Διάγραμμα 8). Παρόλα αυτά, οι τιμές δεν συμφωνούσαν πλήρως καθώς ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 ήταν 0.50.



Διάγραμμα 8. Σύγκριση των μέσων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα πάνω από την καλλιέργεια μεταξύ των μετρήσεων του πειράματος και του μοντέλου SIOM κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.

3.1.2.3. Σχετική υγρασία του αέρα

Η σχετική υγρασία του αέρα παρουσίασε μεγάλες διακυμάνσεις κατά την διάρκεια του εικοσιτετράωρου. Η σχετική υγρασία εντός του θερμοκηπίου την ημέρα ήταν 50-55% και την νύχτα έφτανε σε επίπεδα κορεσμού. Οι τιμές της σχετικής υγρασίας στο μοντέλο SIOM είχαν προβλεφθεί επίσης με κάποια διακύμανση (διαφορά ημέρας – νύχτας) αλλά όχι με τόσο μεγάλο εύρος διακύμανσης όσο καταγράφονταν κατά την διάρκεια του πειράματος. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο SIOM δεν ήρθαν σε συμφωνία με αυτά των μετρήσεων του πειράματος (Διάγραμμα 9). Οι τιμές δεν είχαν καλή συσχέτιση και ο συντελεστής προσδιορισμού ήταν $R^2 < 0.55$.



Διάγραμμα 9. Σύγκριση των μέσων τιμών της σχετικής υγρασίας του αέρα πάνω από την καλλιέργεια (την χειμερινή περίοδο), μεταξύ των μετρήσεων του πειράματος και του μοντέλου SIOM.

3.1.2.4 Ολική απόδοση

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, η ολική απόδοση της καλλιέργειας στη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου ήταν 55.7 kg, ενώ το μοντέλο SIOM είχε προβλέψει ότι η συνολική παραγωγή θα ήταν 44.8 kg. Η διαφορά μεταξύ των πραγματικών και των προσομοιωμένων τιμών είναι 11 μονάδες. Ωστόσο, οι τιμές της απόδοσης σε εβδομαδιαία βάση του πειράματος ήταν πολύ κοντά σε αυτές που προέβλεψε το μοντέλο SIOM.

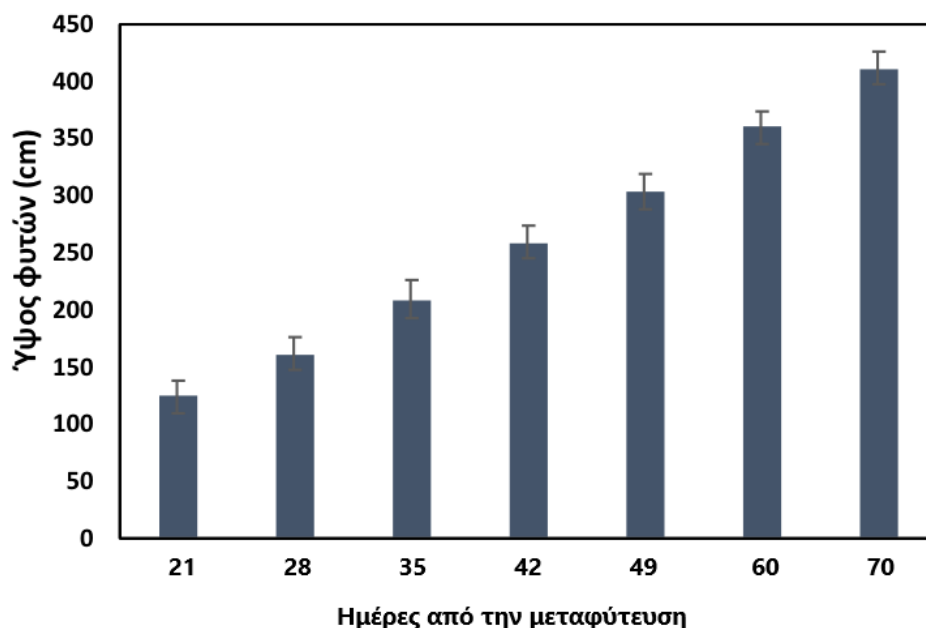
Πίνακας 3. Σύγκριση μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και των μετρήσεων του μοντέλου SIOM.

Πρώτη καλλιεργητική περίοδος	SIOM	Πειραματικές μετρήσεις
Συνολική περίοδος μετρήσεων	51.0	51.0
Σύνολο εβδομάδων	7.30	7.30
Μέση ημερήσια ακτινοβολία (MJ m ⁻²)	4.60	4.03
Απόδοση (kg m ⁻²)	6.72	8.35
Απόδοση ανά εβδομάδα (kg m ⁻²)	0.92	1.15
Ολική απόδοση (kg)	44.8	55.7

3.2. Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος

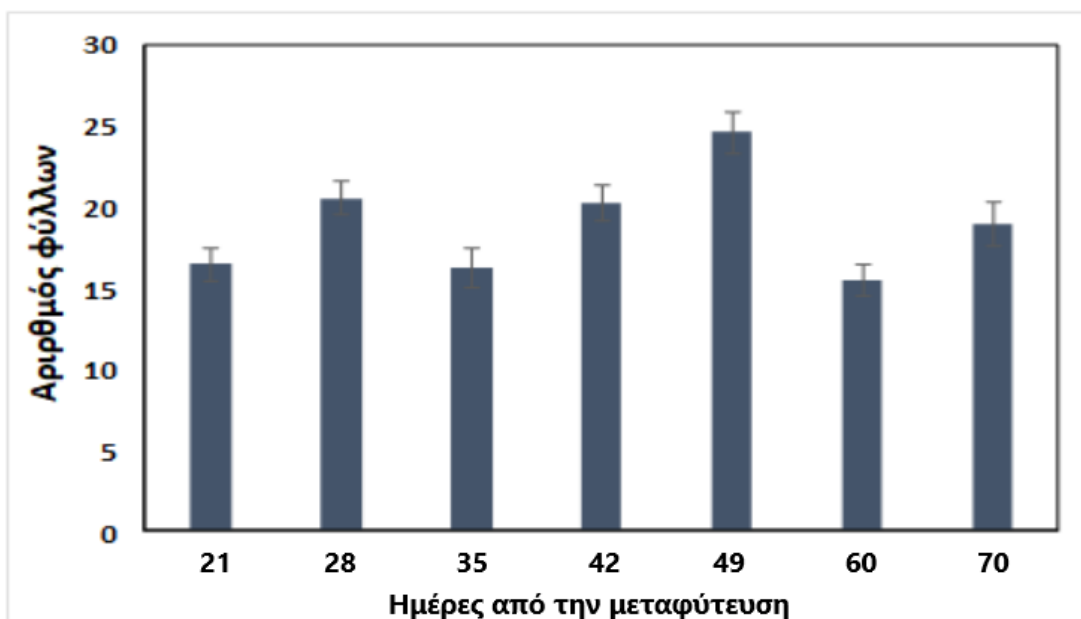
3.2.1. Ανάπτυξη καλλιέργειας

Το μέσο ύψος των φυτών την 21^η ημέρα ήταν 1.23 m, ενώ με την πάροδο των ημερών παρουσίασε αυξητική τάση. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 10, το μέγιστο ύψος των φυτών αγγουριάς την τελευταία ημέρα των μετρήσεων ήταν 4.11 m. Η μέση μεταβολή αύξησης του ύψους των φυτών κατά τη διάρκεια της 2^{ης} καλλιεργητικής περιόδου ήταν 50 cm την εβδομάδα.



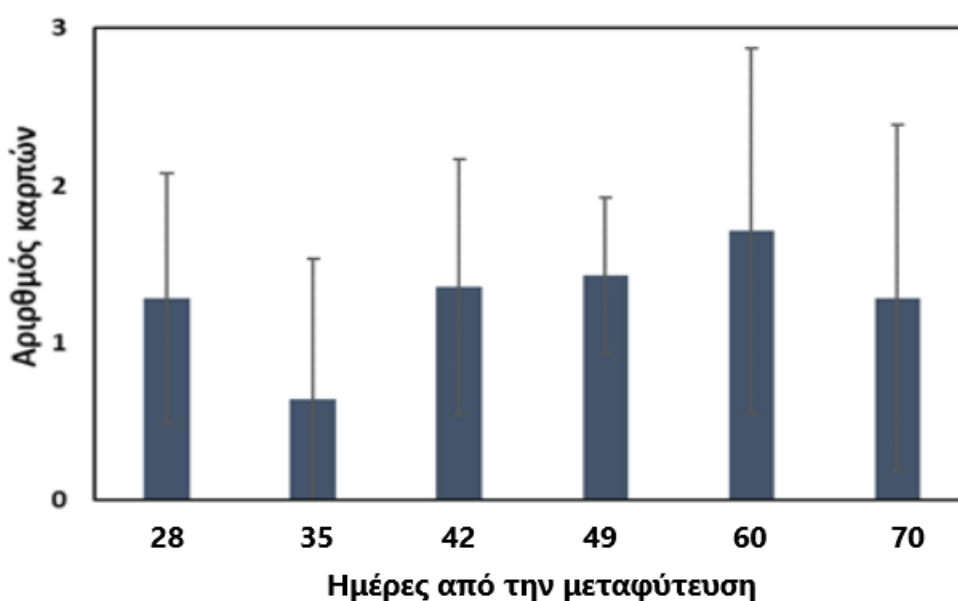
Διάγραμμα 10. Μεταβολή του ύψους (cm) των φυτών αγγουριάς κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.

Ο αριθμός των φύλλων των φυτών παρουσίασε σημαντικές διαφορές μεταξύ των μετρήσεων λόγω της καλλιεργητικής πρακτικής του αραιώματος από την βάση των φυτών. Την 21^η, και 28^η ημέρα των μετρήσεων τα φυτά είχαν κατά μέσο όρο 16 και 20, φύλλα, αντίστοιχα. Ωστόσο, την 35^η ημέρα πραγματοποιήθηκε αραιώμα των κατώτερων φύλλων με αποτέλεσμα ο αριθμός τους να ανέλθει στα 16. Στην συνέχεια, ο αριθμός των φύλλων ακολούθησε αυξητική πορεία μέχρι και την 49^η ημέρα όπου έλαβε χώρα το δεύτερο αραιώμα των φύλλων. Από εκεί και έπειτα ο αριθμός τους μειώθηκε ξανά μέχρι την 70^η ημέρα όπου ολοκληρώθηκε το πείραμα, σημειώνοντας κατά μέσο όρο 18 φύλλα ανά φυτό (Διάγραμμα 11).



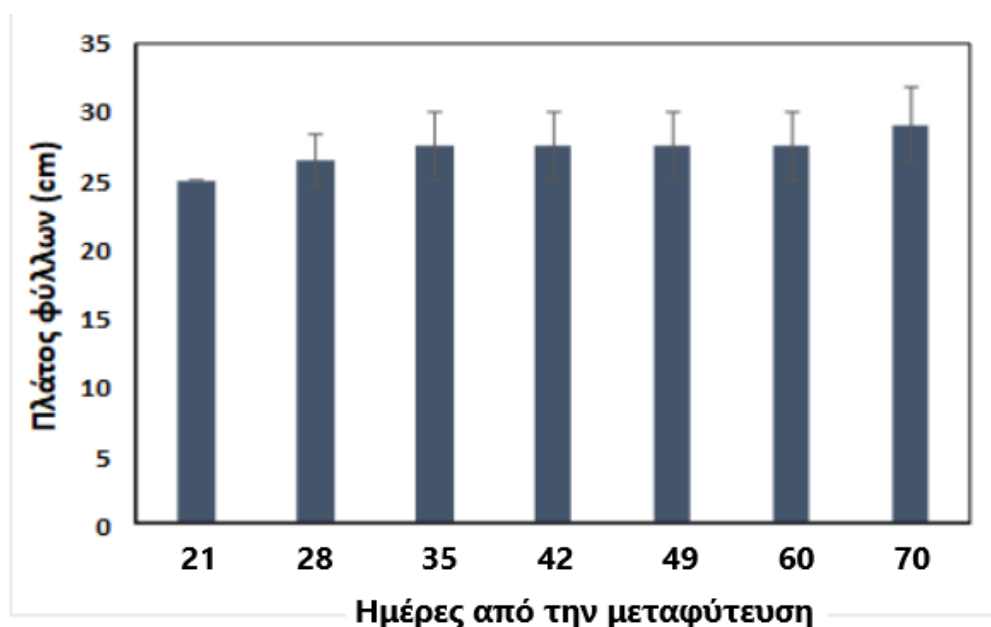
Διάγραμμα 11. Μεταβολή του αριθμού φύλλων των φυτών αγγουριάς κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.

Η απόδοση των φυτών σε καρπούς κυμάνθηκε σε μικρά επίπεδα, χαμηλότερα συγκριτικά με αυτά της πρώτης περιόδου. Η παραγωγή καρπών ανά φυτό ήταν κατά μέσο όρο 1.10, χαμηλότερη συγκριτικά με αυτή της πρώτης περιόδου, όπου ο μέσος όρος ήταν 1.9. Όμως, στην δεύτερη καλλιεργητική περίοδο τα φυτά παρήγαγαν καρπούς καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων (από την 28^η ημέρα μετά την μεταφύτευση των φυτών στο θερμοκήπιο μέχρι και την 70^η ημέρα (Διάγραμμα 12)).

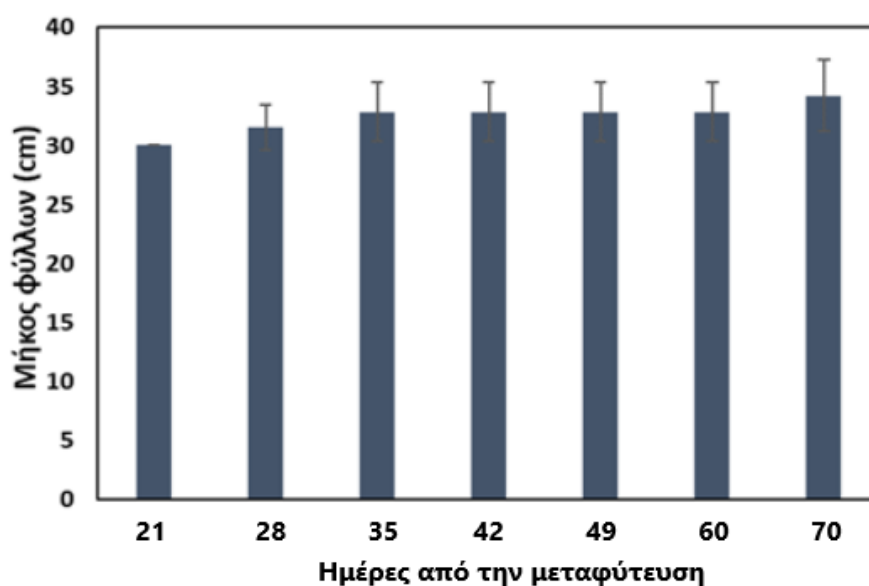


Διάγραμμα 12. Μεταβολή του αριθμού καρπών των φυτών αγγουριάς κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.

Επιπλέον, το πλάτος και το μήκος των φυτών δεν παρουσίασε σημαντικές διαφορές, σημειώνοντας μια μικρή αύξηση μέχρι το τέλος των μετρήσεων (Διάγραμμα 13 και 14). Το πλάτος των φύλλων από 25 cm την πρώτη ημέρα καταγραφής έφτασε τα 29 cm την τελευταία ημέρα του πειράματος. Το μήκος των φύλλων αυξήθηκε κατά 4 cm από την πρώτη έως και την τελευταία πειραματική ημέρα. Αυτό είναι λογικό καθώς τα επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω από την καλλιέργεια αυξάνονταν με την πάροδο των ημερών φτάνοντας σε ιδανικά επίπεδα για την αύξηση του μεγέθους των φύλλων.



Διάγραμμα 13. Μεταβολή του πλάτους (cm) των φύλλων αγγουριάς κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.

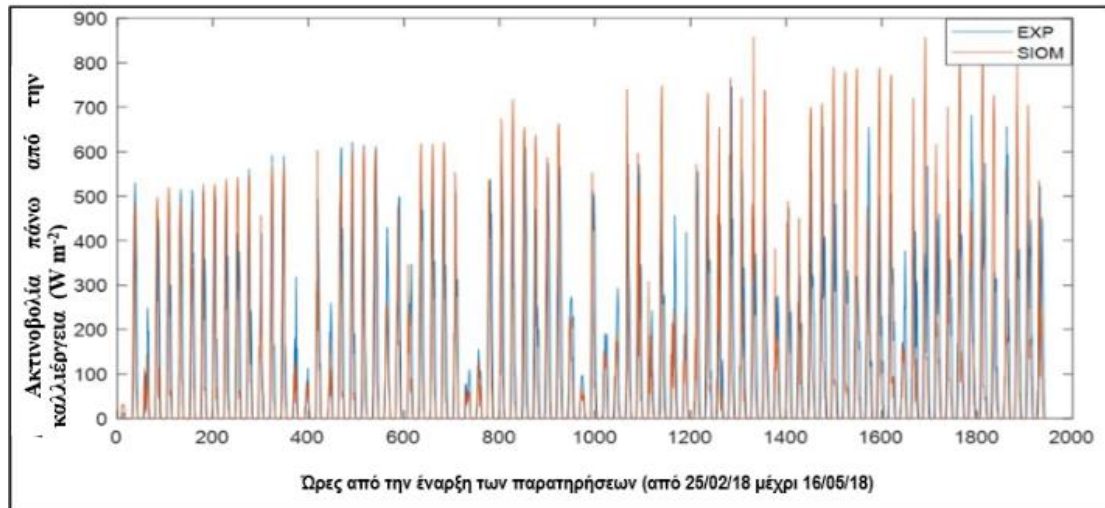


Διάγραμμα 14. Μεταβολή του μήκους (cm) των φύλλων αγγουριάς κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.

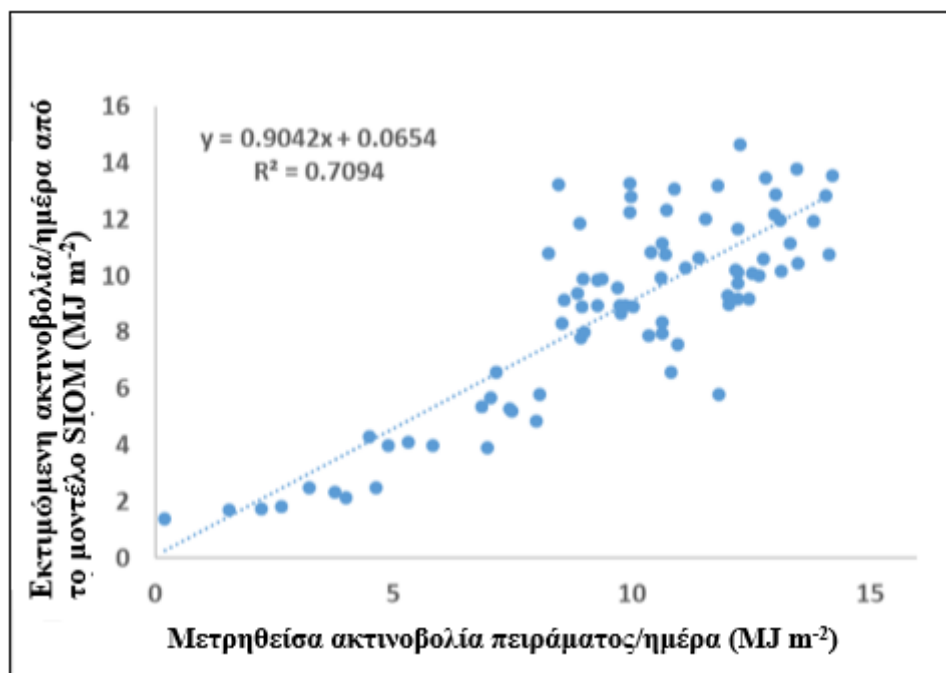
3.2.2. Παρατηρήσεις πειράματος έναντι μοντέλου SIOM

3.2.2.1. Ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία πάνω από την καλλιέργεια κυμαινόταν σε επιθυμητά επίπεδα και με την πάροδο των ημερών παρουσίασε αύξηση (Διάγραμμα 15). Για τη σύγκριση των πραγματικών τιμών με εκείνες που προέκυψαν από το μοντέλο SIOM, έγινε γραμμική συσχέτιση των τιμών. Σύμφωνα με την γραμμική παλινδρόμηση και τον συντελεστή προσδιορισμού R^2 , ο οποίος ήταν ίσος με 0.7, αποδείχθηκε ότι το μοντέλο SIOM κατάφερε να προσομοιάσει με επιτυχία τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω από την καλλιέργεια (Διάγραμμα 16). Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 15, η ακτινοβολία κατά την δεύτερη καλλιεργητική περίοδο κυμάνθηκε σε ένα εύρος $100\text{-}650 \text{ W m}^{-2}$ ανάλογα με την ώρα κατά τη διάρκεια της ημέρας.



Διάγραμμα 15. Σύγκριση των μέσων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω από την καλλιέργεια μεταξύ των μετρήσεων του πειράματος και του μοντέλου SIOM κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.

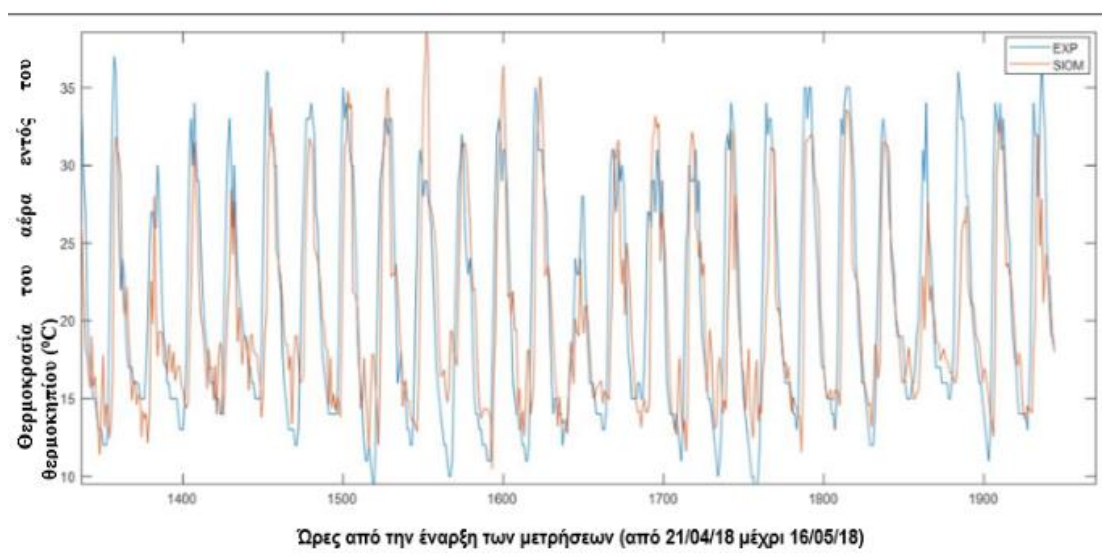


Διάγραμμα 16. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ των μετρήσιμων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας (MJ m^{-2}) και των τιμών του μοντέλου SIOM κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.

3.2.2.2. Θερμοκρασία αέρα

Όσον αφορά στα αποτελέσματα που προέκυψαν από την σύγκριση των πραγματικών μέσων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα και του μοντέλου SIOM, οι

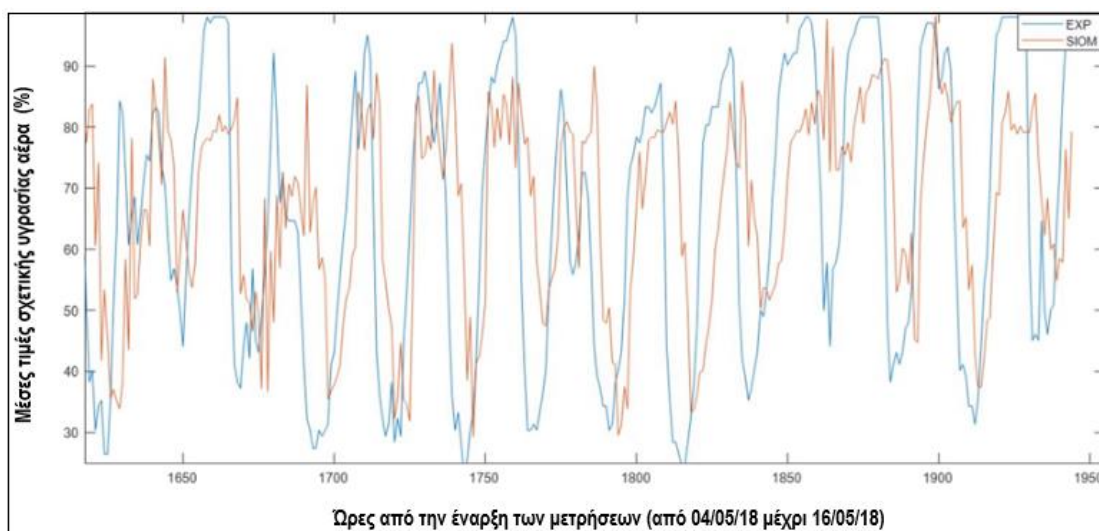
τιμές δεν παρουσίασαν καλή συσχέτιση, καθώς ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 ήταν 0.55.



Διάγραμμα 17. Σύγκριση των μέσων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα πάνω από την καλλιέργεια μεταξύ των μετρήσεων του πειράματος και του μοντέλου SIOM κατά τη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο.

3.2.2.3. Σχετική υγρασία του αέρα

Στο Διάγραμμα 18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των τιμών της σχετικής υγρασίας του αέρα μεταξύ των μετρήσιμων και των προσομοιωμένων τιμών. Οι τιμές της σχετικής υγρασίας του αέρα του πειράματος και του μοντέλου SIOM δεν ταυτίζονται καθώς ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 ήταν 0.4.



Διάγραμμα 18. Σύγκριση των μέσων τιμών της σχετικής υγρασίας του αέρα πάνω από την καλλιέργεια μεταξύ των μετρήσεων του πειράματος και του μοντέλου SIOM κατά τη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο.

3.2.2.4. Ολική απόδοση

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, η ολική απόδοση των πραγματικών μετρήσεων ήταν 58.8 kg, ενώ το μοντέλο SIOM είχε προβλέψει 45 kg. Οι τιμές της απόδοσης σε εβδομαδιαία βάση του πειράματος ήταν πολύ κοντά σε αυτές που προέβλεψε το μοντέλο SIOM. Συνεπώς, το μοντέλο SIOM μπόρεσε να προβλέψει με μικρή διαφορά την απόδοση σε καρπούς αγγουριού ανά εβδομάδα. Όσον αφορά την μέση ημερήσια ακτινοβολία, οι τιμές που προέκυψαν από το μοντέλο SIOM είχαν υψηλό βαθμό συσχέτισης με αυτές του πειράματος. Στο πείραμα, η τιμή της μέσης ακτινοβολίας ήταν 10.38 MJ m^{-2} και το SIOM είχε προβλέψει 9.96 MJ m^{-2} .

Πίνακας 4. Σύγκριση μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και των μετρήσεων του μοντέλου SIOM.

Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος	SIOM	Πειραματικές μετρήσεις
Συνολική περίοδος μετρήσεων	50.0	50.0
Σύνολο εβδομάδων	7.10	7.10
Μέση ημερήσια ακτινοβολία (MJ m^{-2})	9.96	10.38
Απόδοση (kg m^{-2})	8.82	6.76
Απόδοση ανά εβδομάδα (kg m^{-2})	1.24	0.95
Ολική απόδοση (kg)	58.8	45.0

4. Συζήτηση

4.1. Πρώτη καλλιεργητική περίοδος

Στην πρώτη καλλιεργητική περίοδο, τα φυτά αγγουριάς αναπτύχθηκαν ικανοποιητικά ως προς το ύψος και τον αριθμό φύλλων. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία το μέσο ύψος των φυτών κυμαίνεται από 3 έως 5 m (Ολύμπιος, 2001). Όμοια αποτελέσματα παρουσιάστηκαν στην πρώτη καλλιεργητική περίοδο των πειραμάτων, όπου το μέσο τελικό ύψος των φυτών ήταν 4.5 m. Όσον αφορά την παραγωγή σε καρπούς, αυτή κυμάνθηκε σε μέτρια επίπεδα, καθώς από την 61^η ημέρα των μετρήσεων και έπειτα παρατηρήθηκε μείωση της παραγωγής η οποία την τελευταία ημέρα των παρατηρήσεων έφτασε σε μηδενικά επίπεδα. Αυτή η μεταβολή οφείλεται στην μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας του αέρα, στοιχεία τα οποία συντέλεσαν στην μηδενική παραγωγή. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία οι άριστες θερμοκρασίες για την άνθηση των φυτών είναι 18-21°C. Όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 14°C και σε συνδυασμό με την μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας οδηγεί στην αναστολή της παραγωγή των καρπών (Papadopoulos, 1994; Κανάκης, 2002).

Όσον αφορά το μήκος και το πλάτος των φύλλων από την 61^η ημέρα και έπειτα παρατηρήθηκε μείωση του μεγέθους των φύλλων τόσο σε πλάτος όσο και σε μήκος. Σύμφωνα με ερευνητικές μελέτες, η μείωση της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας φαίνεται να μειώνει την φυλλική επιφάνεια των φυτών σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες (Papadopoulos, 1994; Κανάκης, 2002).

Επιπλέον, όσον αφορά την συσχέτιση των τιμών που υπολόγισε το μοντέλο SIOM με αυτές του πειράματος, το μοντέλο SIOM υποεκτίμησε κατά 19% την ολική παραγωγή και οι τιμές της μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας παρουσίασαν χαμηλή συσχέτιση. Ακόμη χαμηλότερη συσχέτιση παρουσίασαν οι τιμές της θερμοκρασίας του αέρα και της σχετικής υγρασίας του αέρα (συσχέτιση κατά 50%). Σε αντίθεση με τα αποτελέσματα από μοντέλα προσομοίωσης GDGCM, MICGREEN και HORTITRANS, τα οποία αναλύονται στην εισαγωγή της παρούσας διατριβής (Κεφ. 1.6.2), το μοντέλο SIOM στην πρώτη περίοδο δεν είχε καλή συσχέτιση των τιμών (Pieters and Deltour, 1997; Singh *et al.*, 2006; Jolliet, 1994).

Σε έρευνα των Tuzel *et al.* (2014) μελετήθηκε το μοντέλο προσομοίωσης SIOM, σε θερμοκηπιακή καλλιέργεια αγγουριού. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι η ποσότητα νερού που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της πρώτης και

δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου για την καλλιέργεια αγγουριών στο θερμοκήπιο, διέφερε μόνο κατά 9%, από την μέτρηση που προέβλεψε το μοντέλο SIOM. Επίσης σύμφωνα με το μοντέλο SIOM, η συχνότητα των αρδεύσεων ήταν διαφορετική και τα μεγάλα διαστήματα μεταξύ των αρδεύσεων, αναμενόταν να δημιουργήσουν καταπόνηση στα φυτά ανάμεσα στις περιόδους μετρήσεων και των καλλιεργειών.

4.2. Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος

Στην δεύτερη καλλιεργητική περίοδο, τα φυτά αγγουριάς είχαν όμοια ανάπτυξη με αυτή της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου, καθώς έφτασαν το ύψος των 4.11 m.

Επιπλέον, το πλάτος και το μήκος των φυτών δεν παρουσίασε σημαντικές διαφορές, σημειώνοντας μια μικρή αύξηση μέχρι το τέλος των μετρήσεων. Το πλάτος των φύλλων από 25 cm την πρώτη ημέρα καταγραφής έφτασε τα 29 cm την τελευταία ημέρα του πειράματος. Το μήκος των φύλλων αυξήθηκε κατά 4 cm από την πρώτη έως και την τελευταία πειραματική ημέρα. Αυτό είναι λογικό καθώς τα επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την εαρινή περίοδο πάνω από την καλλιέργεια αυξάνονταν με την πάροδο των ημερών φτάνοντας σε ιδανικά επίπεδα για την αύξηση του μεγέθους των φύλλων.

Το μοντέλο SIOM κατάφερε στην δεύτερη καλλιεργητική περίοδο να προσμοιάσει τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας με έναν συντελεστή συσχέτισης $R^2=0.7$, συγκριτικά χαμηλότερο με της πρώτης περιόδου, όπου το μοντέλο SIOM κατάφερε να προσμοιάσει με απόλυτη επιτυχία την μέση ημερήσια ακτινοβολία ο συντελεστής συσχέτισης ήταν μόλις $R^2=0.92$. Όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα, η ολική απόδοση των πραγματικών μετρήσεων ήταν 58.8 kg, ενώ το μοντέλο SIOM είχε προβλέψει 45.0 kg. Οι τιμές της απόδοσης σε εβδομαδιαία βάση του πειράματος ήταν πολύ κοντά σε αυτές που προέβλεψε το μοντέλο SIOM. Συνεπώς, το μοντέλο SIOM μπόρεσε να προβλέψει με μικρή διαφορά την απόδοση σε καρπούς αγγουριού ανά εβδομάδα.

Στη μελέτη των Garba *et al.*, (2020), σημειώνεται πως οι καλλιεργητές αγγουριών του θερμοκηπίου αντιμετωπίζουν συχνά διάφορα προβλήματα σχετικά με τις αγρονομικές πτυχές της παραγωγής των καλλιεργειών, καθώς σχετίζονται με τον χειρισμό μοτίβων ανάπτυξης για την ενίσχυση της ποιοτικής και ποσοτικής απόδοσης των καλλιεργειών.

5. Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα του πειράματος προέκυψε ότι το μοντέλο SIOM κατάφερε να υπολογίσει με πολύ καλή συσχέτιση τις μέσες τιμές της ημερήσιας ακτινοβολίας. Όσον αφορά την θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία του αέρα πάνω από την καλλιέργεια, το μοντέλο SIOM δεν φαίνεται να συμφωνεί πλήρως με τις πραγματικές τιμές κλίματος που καταγράφονταν κατά τη διάρκεια και των δυο πειραματικών διαδικασιών. Τέλος, οι τιμές που υπολόγισε το μοντέλο SIOM για την μέση ολική απόδοση ήταν λογικές, αλλά διέφεραν ως προς τις τιμές του πειράματος. Παρόλα αυτά, οι τιμές για την εβδομαδιαία απόδοση είναι αρκετά κοντά, δίχως όμως να ταιριάζουν απόλυτα.

Συμπερασματικά, το μοντέλο SIOM μπορεί να προσομοιώσει την πορεία της καλλιέργειας (όχι όμως με πλήρη ταύτιση όλων των τιμών), σύμφωνα με τις κλιματικές συνθήκες που θα υπολογίσει. Υπάρχουν μεν κάποιες αστοχίες ως προς τα κλιματικά δεδομένα, συνολικά όμως είναι ένα μοντέλο το οποίο προσομοιώνει την πορεία της καλλιέργειας με αρκετή επιτυχία και βοηθάει στην βελτίωση του σχεδιασμού του θερμοκηπίου. Για πιο ακριβή συμπεράσματα όσον αφορά την αποτελεσματικότητα της χρήσης του χρειάζεται να γίνουν περισσότερα πειράματα και να συλλεχθούν επιπλέον δεδομένα.

Τα σύγχρονα θερμοκήπια υψηλής τεχνολογίας είναι ένας συνδυασμός διαφόρων τεχνικών συστημάτων που σχετίζονται με μετρήσεις στην ανάπτυξη των φυτών και πραγματοποιούνται με το μοντέλο SIOM. Υπάρχουν όλο και περισσότερες αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών των συστημάτων. Επομένως, είναι δύσκολο να προσαρμοστεί ο σχεδιασμός του θερμοκηπίου σε άλλο κλίμα / κατάσταση. Υπάρχει ανάγκη για ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων, που να συνδυάζει πρακτική τεχνογνωσία, τοπικές παραμέτρους, διαθέσιμα μοντέλα σχεδίασης και δεδομένα επικύρωσης. Αυτό το σύστημα υποστήριξης αποφάσεων θα πρέπει επίσης να υποστηρίζει τους καλλιεργητές στη βελτιστοποίηση της επιχειρηματικής τους περίπτωσης.

Ένα πλαίσιο δημοσίευσης/εγγραφής που σχεδιάστηκε αρχικά για τον πολεοδομικό σχεδιασμό προσαρμόζεται για την εφαρμογή σχεδιασμού θερμοκηπίου. Σχεδιαστικά μοντέλα που αφορούν το κλίμα, το φως, την εξοικονόμηση, την ανάπτυξη των καλλιεργειών, συνδέονται με αυτό το πλαίσιο. Στις περιπτώσεις αυτές λοιπόν, το μοντέλο SIOM είναι μια αποτελεσματική προσέγγιση για το συνδυασμό γνώσεων που

είναι αποθηκευμένες σε διάφορα μοντέλα σχεδίασης και δίνει στους τελικούς χρήστες μια εικόνα για τις συνέπειες των σχεδιαστικών τους επιλογών. Απαιτείται επικύρωση των αποτελεσμάτων, πρόσθετα μοντέλα σχεδιασμού και σχέδιο διαδικασίας σχεδιασμού για να καταστεί δυνατή η εφαρμογή του SIOM από τους κατασκευαστές του κάθε θερμοκηπίου.

Σύμφωνα με τα ανωτέρω στοιχεία, η παραγωγή προϊόντων σε θερμοκήπια είναι μια σύνθετη δυναμική που καθοδηγείται από εξωτερικούς παράγοντες (καιρός), μηχανισμούς ελέγχου (ανοίγματα αερισμού, ανεμιστήρες καυσαερίων, θερμαντήρες, συστήματα ψύξης με εξάτμιση κλπ.) και εσωτερικούς παράγοντες (καλλιέργειες και εσωτερικά εξαρτήματα). Έτσι, όσο περισσότερο κατανοεί κανείς τη φυσική του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου με μετρήσεις στην ανάπτυξη των φυτών, που πραγματοποιούνται με το μοντέλο SIOM, τόσο καλύτερη είναι η σχεδίαση του θερμοκηπίου και η επιλογή εξαρτημάτων που θα βελτιώσουν τις πιθανότητες επιτυχίας. Γι' αυτό, έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για να αυξηθεί η κατανόηση των συστημάτων παραγωγής καλλιεργειών θερμοκηπίου μέσω της ανάπτυξης εκπαιδευτικών υλικών, διαθέσιμων στο Διαδίκτυο.

6. Βιβλιογραφία

Ελληνόγλωσση:

1. Δημητράκης Κ. Γ. (1998). Λαχανοκομία. Εκδ. Αγρότυπος. Αθήνα.
2. Κανάκης Α. Γ., 2002. Μαθήματα λαχανοκομίας 3. Καλαμάτα.
3. Κουτσογιάννης Δ., Ανδρεαδάκης Α., Μαυροδήμου Ρ., Χριστοφίδης Α., Μαμάσης Ν., Ευστρατιάδης Α., Κουκουβίνος Α., Καραβοκυρός Γ., Κοζάνης Σ., Μαμάης Δ., και Νουτσόπουλος Κ., 2008. «Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων, Υποστήριξη της κατάρτισης Εθνικού Προγράμματος Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων», σελ 377.
4. Μαυρογιανόπουλος Γ., 2005. “Θερμοκήπια”. Δ΄ έκδοση βελτιωμένη. Εκδόσεις Σταμούλης Α., Αθήνα. ISBN: 960-351-620-1.
5. Μαυρογιανόπουλος Γ., 2006. “Υδροπονικές Εγκαταστάσεις”. Εκδόσεις Σταμούλης Α., Αθήνα. ISBN: 960-351-675-9.
6. Μαυρογιανόπουλος Γ., 2017. “Τεχνολογία θερμοκηπίων. Μικρόκλιμα, κατασκευή, υλικά, εξοπλισμός”. Εκδόσεις UNIBOOKS, Αθήνα. ISBN: 978-618-530-451-1.
7. Μπαρτζάνας Θ., 2004. Διαχείριση της υψηλής υγραμετρίας σε ελληνικά θερμοκήπια. Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
8. Ντόγρας Κ., 2006. Γενική Λαχανοκομία. Α.Π.Θ. Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη.
9. Ολύμπιος Χ. Μ., 1994. Η τεχνική της καλλιέργειας των κηπευτικών στο θερμοκήπιο. Αθήνα.
10. Παρασκευόπουλος Α., 2002. Σημειώσεις για την καλλιέργεια του αγγουριού. Φιλιατρά.
11. Σάββας Δ., 2009. Υδροπονικές καλλιέργειες κηπευτικών στο θερμοκήπιο. Ειδικά θέματα, Αθήνα.
12. Τζωρτζάκης Ν., 2008. Καλλιέργειες εκτός εδάφους. Σημειώσεις θεωρίας. Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας, ΤΕΙ Κρήτης.
13. Χα Ι.Α. και Πετρόπουλος Σ., 2014. Γενική λαχανοκομία και υπαίθρια καλλιέργεια λαχανικών. Πανεπιστημιακές εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος. ISBN: 978-960-9439-24-4.

Ξενόγλωσση:

1. Alhama, F., Alarcon, M. and Gonzalez Fernandez, C., 2000. A transient greenhouse climate control model by the network simulation method. In: V International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates: Current Trends for Sustainable Technologies 559, 457-463, ISHS
2. Bakker, J.C. 2006. Model application for energy efficient greenhouses in the Netherlands: Greenhouse design, operational control and decision support systems. *Acta Horticulturae*, vol 718: 191-201.
3. Clegg P. and Watkins D., 1980. *The Complete Greenhouse Book: Building and Using Greenhouses from Cold-Frames to Solar Structures*. Garden Way Publishing. ISBN-13: 978-0882661414.
4. Fitz-Rodriguez, E, Kubota, C., Giacomelli, G.A., Tignor, M.E., Wilson, S.B., McMahon M., 2010. Dynamic modelling and simulation of greenhouse environments under several scenarios: A web-based application. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol 70: 105-116.
5. Garba I.I., Buhari F.Z. and Samaila B.K., 2020. Response of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to differential pruning under greenhouse. *Journal of Dryland Agriculture*.
6. Hardgrave M., 1995. An evaluation of polyurethane foam as a reusable substrate for hydroponic cucumber production. *Acta Hort.* 401: 201-208.
7. Hochmuth R., 2012. "Greenhouse Cucumber Production - Florida Greenhouse Vegetable Production Handbook, Vol 3." EDIS. University of Florida: IFAS Extension. Web. 02 Dec. 2015.
8. Janssen, E.G.O.N., Baart de la Faille, L.T. and Lohman, W.J.A., 2014. SYSTEM
9. INTEGRATION AND OPTIMIZATION MODEL (SIOM). *Acta Hort.* 1037, p.75-81. DOI: 10.17660/ActaHortic.2014.1037.5
10. Jensen M.H. and Collins W.L., 1985. Hydroponic Vegetable Production. *Horticultural reviews*, vol 7: 483-558.
11. Jolliet, 1994. HORTITRANS, a Model for Predicting and Optimizing Humidity and Transpiration in Greenhouses. Vol 57 (1): 23-37. <https://doi.org/10.1006/jaer.1994.1003>
12. Kacira M., 2011. Greenhouse Production in US Status, Challenges, and Opportunities. *Proceedings of GIGR International Symposium 2011*

- Sustainable Bioproduction Water, Energy, and Food, Tokyo, 19-23 September 2011.
13. Katsoulas N. and Kittas K., 2011. Greenhouse Crop Transpiration Modelling. In book: Evapotranspiration - From Measurements to Agricultural and Environmental Applications. DOI: [10.5772/23470](https://doi.org/10.5772/23470)
 14. Kittas, C., N. Katsoulas, and A. Baile, 2003. Influence of an aluminized thermal screen on greenhouse microclimate and canopy energy balance. *Trans. ASAE*, vol 46(6): 1653-1663.
 15. Lopez-Cruz I., Van Willigenburg, L. and Van Straten, G., 2003. Efficient differential evolution algorithms for multimodal optimal control problems. *Applied Soft Computing*, vol 3(2): 97-122.
 16. Papadopoulos A.P., 1994. Growing Greenhouse Cucumbers in Soil and in Soilless Media. Research Station, Harrow, Canada. Publication 1902/E. Communications Branch, Agriculture and Agri-Food Canada. Ottawa, ON K1A 0C7.
 17. Pieters J.G. and Deltour J.M., 1997. Performances of greenhouses with the presence of condensation on cladding. *J. Agric. Eng. Res.* 68, 125–137.
 18. Rodriguez E.F., Kubota C., Ciacomelli G.A. Tignor M., Wilson S.B. and McMahon M., 2010. Dynamic modeling and simulation of greenhouse environments under several scenarios: A web-based application. *Computer and Electronic in Agriculture*.
 19. Sapounas A., 2019. SIOM validation. TNO - GreenSys 2019.
 20. Savvas D. and Passam H., 2002. Hydroponic production of vegetables and ornamentals. Embryo public. Athens. Greece.
 21. Schrader W., Jose A., and Keith M., 2013. “Cucumber Production in California.” Agriculture and Natural Resources, Publication 8050. University of California. Web. 02 Dec. 2015.
 22. Singh G., Singh P., Lubana P.P., Singh K., 2006. Formulation and validation of a mathematical model of the microclimate of a greenhouse. *Renewable Energy* 31(10):1541-1560.
 23. Tuzel Y., Gul A.N., Tuncay O.C., Anac D., Madanlar N., Yoldas Z., Gumus M., Tuzel I.H. and Engindeniz S., 2014. Organic cucumber production in the greenhouse: A case study from Turkey. Research Article.

24. Van Os E. A., 2000. The 15th workshop on Agricultural structures and ACESYS (Automation, Culture, Environment & System) IV Conference, 81-91.
25. Verdouw C., Robbmond R. and Kruize J. W., 2015. Intergration of Production Control and Enterprise Management Systems in Horticulture. Conference paper at 7th International Conference on Information and Communication Technologies in Agriculture, Food and Environment (HAICTA), Kavala, Greece.
26. Von Elsner B., Briassoulis D., Waaijenberg D., Mistriotis A., von Zabeltitz Chr., Gratraud J., Russo G., and Suay-Cortes R., 2000. Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouses in European Union Countries, Part II: Typical Designs. Journal of Agricultural Engineering Research. Vol 75 (2): 111-126.

Ηλεκτρονικές διευθύνσεις:

1. Τύποι θερμοκηπίων με βάση το σχήμα της κατασκευαστικής μονάδας. (Πηγή 1: Τοξωτό θερμοκήπιο. Ανακτήθηκε στις 10/07/2020, 12:50, από <https://aggiehorticulture.tamu.edu/greenhouse/photoarchive/images/ridgefurrow.JPG>, Πηγή 2. Αμφικλινές θερμοκήπιο. Ανακτήθηκε στις 10/07/2020, 13:00, από <http://www.buildmyowngreenhouse.com/images/products/detail/HoopHouse12ft.2.JPG>).
2. Καλλιέργεια αγγουριάς “Cucumber Production in California.” Ανακτήθηκε στις 15/07/2020, 13:30, από http://www.wifss.ucdavis.edu/wp-content/uploads/2016/05/FDA_WIFSS_-Cucumbers_PDF.pdf
3. Εγχειρίδιο Υδροπονίας Εκπαιδευτικό Κέντρο Υδροπονίας ΙΓΕ, (Σάββας, 2009). Ανακτήθηκε στις 15/07/2020, 15:30, από http://news.ari.gov.cy/content/Ydrponia_Exeiridio.pdf
4. Εικόνα 8: Google (n.d.) 1χλμ. Παράλληλη Α/Δ ΠΑΘΕ Μικροθήβες Μαγνησίας, Ανάκτηση στις 20/07/2020, 13:25 από, <https://www.google.gr/maps/@39.25486,22.7393784,1208m/data=!3m1!1e3>).
5. Εικόνα 9: Google (n.d.) 1χλμ. Παράλληλη Α/Δ ΠΑΘΕ Μικροθήβες Μαγνησίας, Ανάκτηση στις 20/07/2020, 13:30 από,

<https://www.google.gr/maps/@39.2540215,22.7387374,359m/data=!3m1!1e3>

.