



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**«Διαχείριση των απορροών υδροπονικής καλλιέργειας σε πραγματικό χρόνο με τη
χρήση ιοντοεκλεκτικών αισθητήρων»**



ΛΑΖΑΡΕΛΗ ΦΩΤΕΙΝΗ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΑΤΣΟΥΛΑΣ
ΒΟΛΟΣ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2025

«Διαχείριση των απορροών υδροπονικής καλλιέργειας σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση ιοντοεκλεκτικών αισθητήρων»

«Real time management of the drainage solution of a hydroponic crop based on ion selective sensors».

Λαζαρέλη Φωτεινή

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Νικόλαος Κατσούλας (Επιβλέπων), Καθηγητής, Γεωργικές Κατασκευές-Θερμοκήπια. Π.Θ.

Σπυρίδων Πετρόπουλος (Μέλος), Καθηγητής, Λαχανοκομία. Π.Θ.

Ευαγγελινή Κίττα (Μέλος), ΕΔΙΠ, Γεωργικές Κατασκευές Π.Θ.

«Βεβαιώνω ότι εγώ, η Λαζαρέλη Φωτεινή είμαι η συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε σύμφωνα με τον Κανονισμό Εκπόνησης Πτυχιακής Εργασίας του ΤΓΦΠΑΠ».

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα πτυχιακή διατριβή θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της με κάθε τρόπο.

Αρχικά επιθυμώ να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Επιβλέποντα Καθηγητή μου, κ. Νικόλαο Κατσούλα, για την δυνατότητα που μου έδωσε να πραγματοποιήσω την πτυχιακή μου εργασία, καθώς επίσης για την βοήθεια και την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας αλλά και γενικότερα των σπουδών μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς επιτροπής κ. Σπυρίδωνα Πετρόπουλος και κα. Ευαγγελινή Κίττα (Μέλος) του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για την συμμετοχή τους στην αξιολόγηση της πτυχιακής μου διατριβής.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συνεργάτες του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος για τη αρωγή τους και τη άριστη συνεργασία τους κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων. Κυρίως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη κα. Σοφία Φαλιάγκα, για τον χρόνο που διέθεσε για την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας, για την επιμέλεια και τη διόρθωση της αλλά και για την πολύτιμη καθοδήγηση της καθ' όλη τη διεξαγωγή του πειραματικού μέρους. Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κ. Ναουνούλη Ιωάννη για την υποστήριξη και την καθοριστική συμβολή του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένεια, τους φίλους μου και ιδιαίτερα τον Αλέξανδρο, για την υποστήριξη, την συμπαράσταση και την βοήθεια που μου παρέχουν σε κάθε μου βήμα.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	11
1.1. Προκλήσεις του αγροτικού τομέα	11
1.2. Θερμοκήπια.....	12
1.2.1. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα θερμοκηπίων.....	12
1.2.2. Θερμοκήπια στην Ελλάδα.....	13
1.3. Υδροπονία.....	14
1.3.1. Ορισμός.....	14
1.3.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα υδροπονίας	14
1.3.3. Υποστρώματα στην υδροπονία	15
1.3.4. Τύποι υδροπονικών συστημάτων.....	16
1.3.5. Σύγκριση ανοιχτών και κλειστών υδροπονικών συστημάτων	17
1.3.6. Αρχή λειτουργίας ανοιχτών και κλειστών συστημάτων	18
1.4. Σύστημα επάλληλων καλλιεργειών	19
1.5. Υδροπονικές καλλιέργειες.....	20
1.5.1. Υδροπονική καλλιέργεια τομάτας.....	20
1.5.2. Υδροπονική καλλιέργεια τοματινιού	22
1.6. Ιοντοεκλεκτικοί αισθητήρες	24
1.7. Αποδοτικότητα χρήσης νερού	24
1.8. Σκοπός της εργασίας.....	26
2. Υλικά και μέθοδοι	28
2.1. Εγκαταστάσεις του πειράματος	28
2.2. Διαχείριση της καλλιέργειας.....	29
2.3. Μεταχειρίσεις	31
2.4. Συστήματα υδρολίπανσης.....	32
2.4.1. Επαναχρησιμοποίηση του διαλύματος απορροής με χρήση αισθητήρων ρύθμισης νιτρικών ιόντων.....	33
2.5. Σύστημα άρδευσης.....	34
2.6. Μετρήσεις.....	36
2.6.1. Δειγματοληψία	36
2.6.2. Μετρήσεις pH, ηλεκτρικής αγωγιμότητας και θερμοκρασίας του διαλύματος άρδευσης και απορροής	37
2.6.3. Μετρήσεις νιτρικών ιόντων	38
2.7. Υπολογισμοί	39
2.7.1. Υπολογισμός της κατανάλωσης νερού και λιπασμάτων.....	39

2.7.2. Υπολογισμός αποτελεσματικότητας χρήσης νερού και λιπασμάτων	40
2.8. Στατιστική ανάλυση.....	40
3. Αποτελέσματα	41
3.1. pH του θρεπτικού διαλύματος άρδευσης και απορροής.....	41
3.1.1. pH του θρεπτικού διαλύματος άρδευσης	41
3.1.2. pH του θρεπτικού διαλύματος απορροής.....	42
3.1.3. Μεταβολή της τιμής pH κατά τη καλλιεργητική περίοδο.....	43
3.2. EC του θρεπτικού διαλύματος άρδευσης και απορροής.....	44
3.2.1. EC του θρεπτικού διαλύματος άρδευσης.....	44
3.2.2. EC του θρεπτικού διαλύματος απορροής.....	45
3.2.3. Μεταβολή της τιμής της EC κατά τη καλλιεργητική περίοδο	46
3.3. NO ₃ ⁻ του θρεπτικού διαλύματος της άρδευσης και απορροής	47
3.3.1. NO ₃ ⁻ του θρεπτικού διαλύματος της άρδευσης.....	47
3.3.2. NO ₃ ⁻ του θρεπτικού διαλύματος της απορροής	48
3.3.3. Μεταβολή της τιμής των NO ₃ ⁻ κατά τη καλλιεργητική περίοδο	49
3.4. Κατανάλωση και αποτελεσματικότητα χρήσης νερού	50
3.5. Κατανάλωση και αποτελεσματικότητα χρήσης λιπασμάτων	52
4. Συζήτηση	54
5. Συμπεράσματα.....	59
6. Βιβλιογραφία	60
6.1. Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....	60
6.2. Ελληνική Βιβλιογραφία	65
6.3. Εικόνες από το διαδίκτυο.....	66

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1. Κατανομή θερμοκηπιακών εκτάσεων στην Ελλάδα (ΕΛΣΤΑΤ, 2021).	13
Εικόνα 2. Δείγματα ανόργανων και οργανικών υποστρωμάτων που χρησιμοποιούνται στις υδροπονικές καλλιέργειες. 1) πετροβάμβακας, 2) πολυουρεθάνη, 3) άργιλος, 4) κοκκοφοίνικας, 5) περλίτης. (πηγή ydroponia.gr).....	16
Εικόνα 3. Θερμοκηπιακή καλλιέργεια τομάτας σε υδροπονικό σύστημα κατά το στάδιο της συγκομιδής. (Πηγή: luciasfarm.gr)	20
Εικόνα 4. α) Κάτοψη του θερμοκηπιακού πάρκου (πηγή: Google Earth). Με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι επιλεγμένοι θάλαμοι για την εκπόνηση της πειραματικής διαδικασίας και β) πρόσοψη του θερμοκηπίου γοθικού τύπου.	28
Εικόνα 5. Σπορόφυτα τομάτας σε κύβους πετροβάμβακα κατά την παραλαβή, πριν τη μεταφύτευση στο υπόστρωμα πετροβάμβακα.	29

Εικόνα 6. Εγκατάσταση φυτών (α) τομάτας και (β) τοματινιού σε σάκους πετροβάμβακα μετά το στάδιο μεταφύτευσης στο θερμοκήπιο	30
Εικόνα 7. Απεικόνιση των πειραματικών καναλιών της (α) πρωτεύουσας και (β) δευτερεύουσας καλλιέργειας: με γκρι τα μη χρησιμοποιηθέντα, με μπλε οι μετρήσεις στην τομάτα (αριστερά) και στη μεταχείριση T ₁ (δεξιά), και με κίτρινο οι μετρήσεις στη μεταχείριση T ₂	32
Εικόνα 8. Μονάδα αυτοματοποιημένης λίπανσης για την παραγωγή θρεπτικών διαλυμάτων	33
Εικόνα 9. Τοποθέτηση σταλακτών στο υπόστρωμα πετροβάμβακα σε κάθε φυτό και σάκο για την εξασφάλιση άρδευσης και θρέψης.	35
Εικόνα 10. Δειγματοληψία θρεπτικού διαλύματος απορροής από (α) το τέλος υδροπονικού καναλιού και (β) μέσω σταλακτών από τη καλλιέργεια του τοματινιού.	36
Εικόνα 11. Μέτρηση pH, EC και θερμοκρασίας του διαλύματος άρδευσης και απορροής της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας καλλιέργειας με ειδικό φορητό, αδιάβροχο όργανο (Combo by Hanna, USA).....	37
Εικόνα 12. Φορητός αναλυτής νιτρικών ιόντων (NO _x –monitrix Mobile, Aquamonitrix Ltd., Tullow, Carlow, Ιρλανδία).....	39

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Μέση μεταβολή της τιμής του pH του διαλύματος άρδευσης της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T ₀) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T ₁) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T ₂) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Με τα a και b σημειώνονται οι στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων T ₁ και T ₂ . ..	41
Διάγραμμα 2. Μέση μεταβολή της τιμής του pH του διαλύματος απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T ₀) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T ₁) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T ₂) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Με τα a και b σημειώνονται οι στατιστικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων T ₁ και T ₂	42
Διάγραμμα 3. Μέση μεταβολή της τιμής του pH του διαλύματος άρδευσης και απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T ₀) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T ₁) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T ₂) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.....	43
Διάγραμμα 4. Μέση μεταβολή της τιμής της EC (dS m ⁻¹) του διαλύματος άρδευσης της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T ₀) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T ₁) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T ₂) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Με τα a και b σημειώνονται οι στατιστικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων T ₁ και T ₂	44
Διάγραμμα 5. Μέση μεταβολή της τιμής της EC (dS m ⁻¹) του διαλύματος απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T ₀) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T ₁) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T ₂) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Με τα a και b σημειώνονται οι στατιστικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων T ₁ και T ₂	45
Διάγραμμα 6. Μέση μεταβολή της τιμής του EC (dS m ⁻¹) του διαλύματος άρδευσης και απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T ₀) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T ₁) και της	

διαδοχικής μεταχείρισης (T_2) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής.....	46
Διάγραμμα 7. Μέση μεταβολή της τιμής των NO_3^- (ppm) του διαλύματος άρδευσης της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T_0) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T_1) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T_2) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Με τα a και b σημειώνονται οι στατιστικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων T_1 και T_2	47
Διάγραμμα 8. Μέση μεταβολή της τιμής των NO_3^- (ppm) του διαλύματος απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T_0) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T_1) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T_2) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Με τα a και b σημειώνονται οι στατιστικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων T_1 και T_2	49
Διάγραμμα 9. Μέση μεταβολή της τιμής των NO_3^- (ppm) του διαλύματος άρδευσης και απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T_0) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T_1) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T_2) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.....	50
Διάγραμμα 10. Συνολική κατανάλωση νερού (L m^{-2}) της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T_0) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T_1) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T_2) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Με τα a και b σημειώνονται οι στατιστικά σημαντικές διαφορές.	51
Διάγραμμα 11. Αποτελεσματικότητα χρήσης νερού (kg m^{-3}) της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T_0) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T_1) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T_2) της δευτερεύουσας καλλιέργειας. Με τα a και b σημειώνονται οι στατιστικά σημαντικές διαφορές.	51
Διάγραμμα 12. Συνολική κατανάλωση λιπασμάτων (kg) της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T_0) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T_1) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T_2) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Με τα a και b σημειώνονται οι στατιστικά σημαντικές διαφορές.	52
Διάγραμμα 13. Αποτελεσματικότητα χρήσης λιπασμάτων (kg kg^{-1}) της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T_0) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T_1) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T_2) της δευτερεύουσας καλλιέργειας. Με τα a και b σημειώνονται οι στατιστικά σημαντικές διαφορές.	53

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1. Μέση τιμή pH του διαλύματος άρδευσης και απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας για κάθε μήνα της καλλιεργητικής περιόδου.	38
Πίνακας 2. Μέση τιμή EC (dS m^{-1}) του διαλύματος άρδευσης και απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας για κάθε μήνα της καλλιεργητικής περιόδου.	38
Πίνακας 3. Μέση τιμή θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) του διαλύματος άρδευσης και απορροής της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας καλλιέργειας για κάθε μήνα της καλλιεργητικής περιόδου.	38
Πίνακας 4. Μέση τιμή NO_3^- (ppm) του διαλύματος άρδευσης και απορροής της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας καλλιέργειας για κάθε μήνα της καλλιεργητικής περιόδου.	39

Περίληψη

Η αυξανόμενη κατανάλωση υδατικών πόρων, σε συνδυασμό με την ανάγκη περιορισμού της ρύπανσης που προκύπτει από γεωργικές πρακτικές, καθιστούν αναγκαία την ανάπτυξη και υιοθέτηση εναλλακτικών καλλιεργητικών μεθόδων. Στο πλαίσιο αυτό, τα συστήματα ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης των διαλυμάτων απορροής σε υδροπονικές καλλιέργειες αποτελούν σύγχρονες στρατηγικές τόσο για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων, όσο και για τη μακροπρόθεσμη μείωση του κόστους παραγωγής. Η λειτουργία τους στηρίζεται στη συλλογή και την απολύμανση του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος μιας καλλιέργειας-δότη και έπειτα στην επαναχρησιμοποίηση του για την άρδευση μιας καλλιέργειας-δέκτη.

Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στην αξιολόγηση ενός συστήματος επάλληλων καλλιεργειών σε υδροπονικές συνθήκες, με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης της άρδευσης μιας δευτερεύουσας καλλιέργειας τοματινιού με το απορρέον θρεπτικό διάλυμα μιας πρωτεύουσας καλλιέργειας τομάτας. Για τον σκοπό αυτό, η καλλιέργεια-δέκτης (τοματίνι) χωρίστηκε σε δύο μεταχειρίσεις: α) μάρτυρας (T_1), όπου το τοματίνι αρδευόταν με ενδεδειγμένο θρεπτικό διάλυμα, και β) διαδοχική μεταχείριση (T_2), όπου το τοματίνι αρδευόταν αποκλειστικά με το απορρέον διάλυμα της τομάτας, με χρήση αισθητήρων ρύθμισης νιτρικών ιόντων. Η αξιολόγηση επικεντρώθηκε σε βασικούς δείκτες ποιότητας του διαλύματος άρδευσης και απορροής, καθώς και στην εκτίμηση της κατανάλωσης νερού, και της αποδοτικότητας χρήσης νερού και λιπασμάτων.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μεταχείριση T_2 , χάρη στη ρύθμιση του διαλύματος άρδευσης μέσω ενός ιοντοεκλεκτικού αισθητήρα, διατήρησε την συγκέντρωση των νιτρικών, του pH και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα επιθυμητά επίπεδα, ενώ παράλληλα παρουσίασε τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα της χρήσης λιπασμάτων με ταυτόχρονη μείωση της κατανάλωσή τους. Η αυξημένη συγκέντρωση των νιτρικών στο διάλυμα απορροής της τομάτας μειώθηκε επιτυχώς, εξασφαλίζοντας την κατάλληλη τροφοδοσία της μεταχείρισης T_2 . Τέλος, η αποτελεσματικότητα χρήσης νερού ήταν ίδια και στις δύο μεταχειρίσεις, ενώ η συνολική κατανάλωση νερού της T_1 ήταν υψηλότερη από την T_2 .

Λέξεις κλειδιά: σύστημα επάλληλων καλλιεργειών, επαναχρησιμοποίηση απορροών, αποτελεσματικότητα χρήσης νερού, ρύθμιση νιτρικών ιόντων

Summary

The increasing consumption of water resources, combined with the need to mitigate pollution arising from agricultural practices, highlights the necessity of developing and adopting alternative cultivation methods. In this context, systems for recycling and reusing runoff solutions in hydroponic crops constitute modern strategies for managing the above-mentioned problems while achieving long-term cost savings. Their operation is based on the collection and disinfection of the nutrient solution drained from a donor crop and its subsequent reuse for the irrigation of a recipient crop.

The present thesis focuses on the evaluation of a cascade soilless system, with the aim of investigating the effect of fertigating a secondary cherry tomato crop with the nutrient solution drained from a primary tomato crop. For this purpose, the recipient crop (cherry tomato) was divided into two treatments: a) control (T_1), where cherry tomatoes were irrigated with the recommended nutrient solution, and b) cascade (T_2), where the cherry tomatoes were irrigated exclusively with the tomato runoff solution, using nitrate ion selective electrodes. The evaluation focused on key quality indicators of the irrigation and drainage solution, as well as on the assessment of water consumption, water, and fertilizer use efficiency.

The results showed that the cascade treatment, due to the regulation of its irrigation solution with an ion-selective sensor, maintained the nitrate concentration, pH, and electrical conductivity values at the desired levels. At the same time, it achieved higher fertilizer use efficiency and lower overall fertilizer consumption. The elevated nitrate concentration of the tomato drainage solution was successfully reduced to achieve the appropriate nutrient supply for treatment T_2 . Furthermore, water use efficiency was found to be similar in both treatments, although the total water consumption in T_1 was higher compared to T_2 .

Keywords: cascade cropping system, drainage reuse, water use efficiency, nitrate regulation

1. Εισαγωγή

1.1. Προκλήσεις του αγροτικού τομέα

Η ρύπανση του περιβάλλοντος σε συνδυασμό με την έλλειψη γλυκού νερού συνιστούν δύο από τις σοβαρότερες προκλήσεις του 21^{ου} αιώνα, με τον τομέα της γεωργίας να αποτελεί επίκεντρο αυτών των προβλημάτων. Σύμφωνα με τους Yalin et al. (2023), το 70% της παγκόσμιας κατανάλωσης γλυκού νερού αφορά τον αγροτικό τομέα με τις αρδευόμενες καλλιέργειες να καταλαμβάνουν το 40% των καλλιεργούμενων εκτάσεων, γεγονός που τον καθιστά ως τον πιο απαιτητικό χρήστη των υδατικών πόρων και έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες επιδείνωσης της υδατικής κρίσης. Επιπλέον, οι αυξανόμενες ανάγκες τροφής και νερού λόγω της αδιάκοπης ανάπτυξης του πληθυσμού, αλλά και της κλιματικής αλλαγής, έχει οδηγήσει στην εντατικοποίηση της γεωργίας με αποτέλεσμα την υπερεκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων (Biswas et al., 2025).

Εκτός από την υπερκατανάλωση υδατικών πόρων, η γεωργία αποτελεί σημαντική πηγή ρύπανσης του περιβάλλοντος, λόγω της μη ορθολογικής και βιώσιμης διαχείρισης των απορροών της και συνιστά την κύρια αιτία υποβάθμισης της ποιότητας των ποταμών και των λιμναζόντων υδάτων (U.S. Environmental Protection Agency, 2025). Το απορρέον διάλυμα των καλλιεργειών που καταλήγει ανεξέλεγκτα στο περιβάλλον είναι ικανό να προκαλέσει διάβρωση και απώλεια θρεπτικών στοιχείων του εδάφους, αύξηση βακτηρίων, και μόλυνση με ποικιλία φυτοφαρμάκων, παράγοντες οι οποίοι συντελούν στη μείωση της ποιότητας του νερού στο οικοσύστημα (U.S. Environmental Protection Agency, 2025). Επιπρόσθετα, οι γεωργικές δραστηριότητες είναι υπεύθυνες για ένα μεγάλο ποσοστό εκπομπών αμμωνίας, η οποία ενισχύει τον σχηματισμό συγκεκριμένων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (PM_{2.5}) υποβαθμίζοντας την ποιότητά της και προκαλώντας επικίνδυνες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία (Guthrie et al., 2018), και παράλληλα σύμφωνα με την επίσημη πλατφόρμα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (European Commission, 2025) ευθύνονται για νιτρορύπανση ποικίλων περιοχών. Λαμβάνοντας υπόψιν το παρόν πρόβλημα η Ευρωπαϊκή Ένωση στόχευσε με συγκεκριμένη νομοθεσία (Οδηγία 2000/60/EC) για την προστασία των υδάτων, αποτρέποντας τις ανεξέλεγκτες μολύνσεις και προωθώντας τη χρήση εναλλακτικών και ορθολογικών γεωργικών πρακτικών. Αυτή η πρόκληση της ρύπανσης του περιβάλλοντος και της υπερβολικής κατανάλωσης υδατινών πόρων, καθιστά αναγκαία την εύρεση βιώσιμων πρακτικών λύσεων.

Μία από τις υποσχόμενες στρατηγικές για την βελτίωση της αποδοτικότητας στη χρήση υδατικών πόρων και την ταυτόχρονη διατήρηση ή ακόμα και αύξηση της ποιότητας παραγωγής, αποτελεί η εφαρμογή ενός καινοτόμου συστήματος διαχείρισης της άρδευσης, που ονομάζεται σύστημα επάλληλων καλλιεργειών, βασιζόμενο στην επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση νερού (Garcia-Caparrós et al., 2018). Τα συστήματα αυτά συμβάλλουν στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και προάγουν την κυκλική οικονομία, θέτοντας εφικτή την ανακύκλωση των απορροών και αξιοποιώντας τα θρεπτικά απόβλητα μιας καλλιέργειας για την ανάπτυξη μιας άλλης (Crovela, 2024). Με τον τρόπο αυτό, ο γεωργικός τομέας μπορεί να μετατραπεί από παράγοντα υποβάθμισης και ρύπανσης σε πηγή βιώσιμης αξιοποίησης φυσικών πόρων.

1.2. Θερμοκήπια

1.2.1. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα θερμοκηπίων

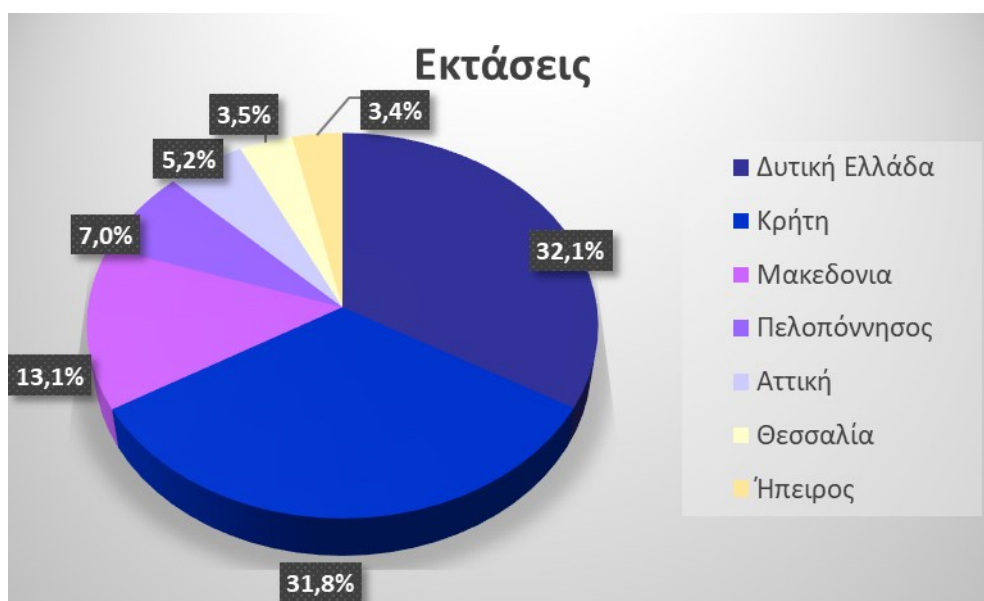
Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί ραγδαία αύξηση του αριθμού των θερμοκηπίων τόσο στην Ελλάδα όσο και στις υπόλοιπες χώρες του κόσμου, λόγω του πλεονεκτήματος που έχουν να ανταποκρίνονται αποτελεσματικότερα στις συνεχόμενες και ολοένα αυξανόμενες ανάγκες παραγωγής τροφίμων. Σύμφωνα με τους Aznar-Sánchez et al. (2020), οι θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις συνιστούν μέσο εντατικοποίησης της γεωργίας αλλά παράλληλα αποτελούν πηγή της βιωσιμότητας του περιβάλλοντος και της οικονομίας. Η σύγχρονη βιβλιογραφία αναδεικνύει ότι μέσω του ελέγχου του μικροκλίματος του θερμοκηπίου, καθώς και της ευκολότερης διαχείρισης μικροοργανισμών, εχθρών και εντόμων, σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους καλλιέργειας, βελτιώνεται η αποδοτικότητα και η ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων και παράλληλα επιτυγχάνεται η καλύτερη προστασία του οικοσυστήματος και η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος στην παραγωγή λαχανικών (Stanghellini, 2014).

Ωστόσο, εκτός των πολλαπλών οφελών, τα θερμοκήπια παρουσιάζουν και μειονεκτήματα, με κύριο να είναι το υψηλό ενεργειακό κόστος τους (Farvardin et al., 2024). Εξαιτίας της ανάγκης τους για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό, η ενεργειακή κατανάλωση αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό (Paris et al., 2022). Σε ορισμένες περιπτώσεις η κατανάλωση μπορεί να φτάσει να είναι 82 φορές μεγαλύτερη συγκριτικά με τη συμβατική γεωργία, ενώ ο μέσος όρος που καταγράφεται είναι περίπου 17% υψηλότερη ενεργειακή δαπάνη (Farvardin et al., 2024). Τέλος, αν και απαιτούν υψηλότερες επενδύσεις για την κατασκευή τους και την αγορά των κατάλληλων

συστημάτων και εργαλείων για την σωστή λειτουργία τους, η μακροπρόθεσμη αύξησης της παραγωγής καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, η βιωσιμότητα και η αποδοτικότερη διαχείριση των πόρων καθιστούν τα θερμοκήπια ως ένα χρήσιμο εργαλείο στη σύγχρονη γεωργία.

1.2.2. Θερμοκήπια στην Ελλάδα

Σύμφωνα με την IOBE (2025), η θερμοκηπιακή καλλιέργεια κηπευτικών και ανθοκομικών στην Ελλάδα έχει αναπτυχθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, με την παράλληλη ενίσχυση κατασκευής των υδροπονικών συστημάτων. Συγκεκριμένα καταγράφηκε άνοδος του ποσοστού των θερμοκηπιακών εκτάσεων από το 2010 έως το 2023 σε ποσοστό 22%. Σύμφωνα με τον ΕΛΣΤΑΤ (2021), η Κρήτη έχει συγκεντρώσει περίπου το 1/3 της συνολικής έκτασης θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων της χώρας, με την περιφέρεια της Δυτικής Ελλάδας, και την Μακεδονία να ακολουθούν με τρόπο όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1. Κατανομή θερμοκηπιακών εκτάσεων στην Ελλάδα (ΕΛΣΤΑΤ, 2021).

Η πλειοψηφία των θερμοκηπιακών καλλιεργειών διατίθεται για την παραγωγή λαχανικών σε ποσοστό 92% (Savvas et al., 2016), με την τομάτα να καταλαμβάνει τη πρώτη θέση με 50% και να ακολουθεί το αγγούρι με 25%. Οι καλλιέργειες σε ανθοκομικά είδη καλύπτουν ένα πολύ μικρό ποσοστό, με το τριαντάφυλλο και το γαρύφαλλο να υπερτερούν των υπολοίπων (Σάββας, 2011).

1.3. Υδροπονία

1.3.1. Ορισμός

Οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες, εκτός του ρόλου τους στην εντατικοποίηση της παραγωγή, αποτελούν υπόβαθρο για την ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογικά μεθόδων. Το κυριότερο παράδειγμα επιβεβαίωσης των προαναφερόμενων είναι η καλλιέργεια σε υδροπονικά συστήματα, τα οποία ενισχύουν την αποδοτικότητα της χρήσης νερού και θρεπτικών στοιχείων και παράλληλα συμβάλλουν στην ανάπτυξη της βιώσιμης γεωργίας.

Η υδροπονία χαρακτηρίζεται ως μια τεχνική καλλιέργειας απουσία εδάφους. Τα φυτά που καλλιεργούνται υδροπονικά αναπτύσσονται είτε σε νερό, εμπλουτισμένο με απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία, είτε σε υπόστρωμα (Mielcarek et al., 2024). Η επιλογή αξιοποίησης αδρανών υποστρωμάτων ή όχι καθορίζεται από τον κάθε παραγωγό ή τις ερευνητικές ανάγκες και το επιστημονικό πλαίσιο που θα θέσει κάθε ερευνητής. Η ευέλικτη μορφή της υδροπονίας την καθιστά κατάλληλη ακόμα και για αστική γεωργία, περιορίζοντας έτσι την ανάγκη για μεταφορές σε αγροτικούς οικισμούς (Bunyuth, 2024).

1.3.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα υδροπονίας

Συγκρίνοντας την υδροπονία με την συμβατική γεωργία, διαπιστώνεται ότι η πρώτη υπερέχει σε ποικίλους τομείς και προσφέρει μια πληθώρα λύσεων στα προβλήματα που αντιμετωπίζει ο σύγχρονος αγροτικός τομέας. Η εκμετάλλευση των άγονων εδαφών σε συνδυασμό με την δυνατότητα καλλιέργειας ακόμα και όταν παρατηρείται έλλειψη στη διαθεσιμότητα νερού, αναδεικνύει την υδροπονία ως ιδανικό μέσο καλλιέργειας στη σημερινή εποχή. Εξαιτίας της ιδιαιτερότητάς της να μην αξιοποιεί εδαφικούς πόρους, καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση και ο έλεγχος των συνθηκών ανάπτυξης των ριζών των φυτών, με αποτέλεσμα την αποδοτικότερη χρήση διαθέσιμων πόρων και την παράλληλη εξασφάλιση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων (Rajaseger et al., 2023). Ένα από τα σημαντικότερα οφέλη της υδροπονίας συνιστά η εξοικονόμηση στη χρήση νερού. Σύμφωνα με τους Rajaseger et al. (2023), η κατανάλωση νερού σε ένα υδροπονικό σύστημα μπορεί να μειωθεί έως και 90% σε σχέση με την γεωργία στον ανοιχτό αγρό. Ταυτόχρονα, η συγκεκριμένη μέθοδος έχει αποδειχθεί ότι μειώνει σημαντικά τη χρήση φυτοφαρμάκων, εφόσον παρατηρείται απουσία παθογόνων μικροοργανισμών που αναπτύσσονται και στη συνέχεια μεταδίδονται από το έδαφος (Khatri et al., 2024). Η μείωση χρήσης φυτοπροστατευτικών σκευασμάτων αποτελεί

κρίσιμο πλεονέκτημα της υδροπονίας, καθώς συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος και στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Ένα πρόσθετο πρόβλημα, στο οποίο ανταποκρίνεται και δίνει λύση η υδροπονία, αφορά την διαχείριση της έλλειψης καλλιεργήσιμης γης. Με την σύγχρονη τάση της αστικοποίησης αλλά και με την έλλειψη εύρεσης καλλιεργήσιμων εδαφών, είτε λόγω διάβρωσης από την κλιματική αλλαγή, είτε λόγω ανεπαρκούς σύστασης σε θρεπτικά στοιχεία, η υδροπονία μπορεί να εφαρμοστεί στα πιο άγονα εδάφη ή ακόμα και σε ταράτσες ή εσωτερικούς χώρους (Rajaseger et al., 2023, Kumar, 2024). Συνοψίζοντας, η υδροπονία δεν αποτελεί απλώς μια εναλλακτική καλλιεργητική μέθοδο αλλά μια ολοκληρωμένη απάντηση στα προβλήματα του σύγχρονου κόσμου.

Ωστόσο, παρά τα ποικίλα οφέλη της υδροπονίας εντοπίζονται ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία δεν πρέπει να παραβλέπονται. Το υψηλό κόστος αρχικής εγκατάστασης συνιστά τη μεγαλύτερη δυσκολία για τους ενδιαφερόμενους παραγωγούς, ενώ παράλληλα η απόκτηση των απαραίτητων ειδικών γνώσεων για τη λειτουργία των συστημάτων δεν είναι εφικτή για τον καθένα (Pomoni et al., 2023). Επιπλέον, οι υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια καθ' όλη τη διάρκεια του έτους αποτελεί οικονομικό εμπόδιο. Τέλος, σύμφωνα με τον Jones (2004), επισημαίνεται ότι οι εμπορικές ποικιλίες των φυτών δεν παρουσιάζουν πάντα πλήρη προσαρμοστικότητα στις υδροπονικές καλλιέργειες.

1.3.3. Υποστρώματα στην υδροπονία

Στην υδροπονία, η επιλογή υποστρώματος είναι κρίσιμη για μια καλλιέργεια καθώς διαδραματίζει καίριο ρόλο στην στήριξη των ριζών, την απορρόφηση νερού και θρεπτικών στοιχείων και τον περιορισμό ανάπτυξης παθογόνων. Το κάθε υπόστρωμα διαθέτει διαφορετικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά, τα οποία επιδρούν στην φυσιολογική ανάπτυξη των φυτών. Υποστρώματα μπορεί να αποτελούν τόσο οργανικά υλικά, όπως τύρφη, κοκκοφοίνικας, πολυουρεθάνη και πριονίδι, όσο και ανόργανα υλικά, όπως ο πετροβάμβακας, η διογκωμένη άργιλος, ο περλίτης και η ελαφρόπετρα (Εικόνα 2). Προκειμένου να γίνει η κατάλληλη επιλογή, λαμβάνονται ως βασικά κριτήρια το κόστος αγοράς, οι ιδιότητες του υλικού (π.χ. η ικανότητα συγκράτησης νερού) και η δυνατότητα εξασφάλισης σταθερού περιβάλλοντος για επαναλαμβανόμενες καλλιέργειες (Patil et al., 2020).

Ένα από τα πιο διαδεδομένα ανόργανα υποστρώματα που χρησιμοποιείται στην υδροπονία είναι ο πετροβάμβακας. Παρά την υψηλότερη, τιμή του σε σχέση με άλλα

υλικά, όπως ο περλίτης, ο πετροβάμβακας είναι ευρέως χρησιμοποιούμενος λόγω της υψηλής παραγωγικότητας που προσφέρει αλλά και της ευκολίας στη διαχείριση. Η σύσταση του από ηφαιστειακά πετρώματα έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη πορώδη ικανότητά του (92-98%) και επομένως θεωρείται ιδανικό για την συγκράτηση των υδάτων και την εξασφάλιση ικανοποιητικών επιπέδων υγρασίας.



Εικόνα 2. Δείγματα ανόργανων και οργανικών υποστρωμάτων που χρησιμοποιούνται στις υδροπονικές καλλιέργειες. 1) πετροβάμβακας, 2) πολυουρεθάνη, 3) άργιλος, 4) κοκκοφοίνικας, 5) περλίτης. (πηγή ydroponia.gr)

Ακόμα, ως αδρανές υλικό, επιτρέπει στον καλλιεργητή την δυνατότητα απόλυτης ρύθμισης και ελέγχου της θρέψης των φυτών μέσω της άρδευσης, χωρίς να επηρεάζεται από το υπόστρωμα. Ένα ακόμα όφελος του πετροβάμβακα συνιστά ο περιορισμός του κινδύνου εμφάνισης παθογόνων μικροοργανισμών, λόγω της αρχικής του αποστείρωσης. Συνεπώς, οι ιδιαίτερες ιδιότητές του καθώς και η δομή του προσφέρουν υψηλές αποδόσεις των καλλιεργειών, κατάλληλη στήριξη των φυτών, καθώς και την δυνατότητα εντατικής καλλιέργειας. (Thomas et al., 2023).

1.3.4. Τύποι υδροπονικών συστημάτων

Τα υδροπονικά συστήματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο διαχείρισης του διαλύματος απορροής τους. Συγκεκριμένα, στα ανοικτά συστήματα το θρεπτικό διάλυμα άρδευσης διοχετεύεται στις ρίζες των φυτών και μετά τη χρήση απορρίπτεται, χωρίς να επαναχρησιμοποιηθεί. Το απορρέον διάλυμα αποβάλλεται στο περιβάλλον με αποτέλεσμα την πρόκληση ρύπανσης και παράλληλα με το σύστημα

αυτό σπαταλούνται οι υδατικοί πόροι και τα θρεπτικά στοιχεία που είναι πλήρως ικανά να ανακυκλωθούν σε άλλη καλλιέργεια.

Αντιθέτως, στα κλειστά υδροπονικά συστήματα το θρεπτικό διάλυμα που απορρέει από την καλλιέργεια συλλέγεται, απολυμαίνεται και επαναχρησιμοποιείται, με αποτέλεσμα την μείωση κατανάλωσης νερού και των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που παρατηρούνταν στο ανοιχτό σύστημα (Treftz et al., 2015).

Ημίκλειστα υδροπονικά συστήματα θεωρούνται εκείνα τα οποία επαναχρησιμοποιούν το θρεπτικό διάλυμα απορροής μια καλλιέργειας ανακυκλώνοντας ένα μέρος του και όχι ολόκληρο. Έτσι διοχετεύουν στο περιβάλλον μικρότερες ποσότητες του απορρέοντος νερού σε σχέση με τα ανοιχτά συστήματα αλλά δεν κάνουν πλήρη ανακύκλωση του διαλύματος όπως στα κλειστά. Ο λόγος που συμβαίνει το παραπάνω αφορά την αντιμετώπιση συσσώρευσης αλάτων στα υδροπονικά συστήματα. Συγκεκριμένα, στα ημίκλειστα συστήματα το διάλυμα ανακυκλώνεται μέχρι η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) να ξεπεράσει ένα όριο και στη συνέχεια πραγματοποιείται έκπλυση και απόρριψη μέρους του θρεπτικού διαλύματος (Carmassi et al., 2005).

Παρά τα περιβαλλοντικά, καλλιεργητικά και παραγωγικά πλεονεκτήματα των κλειστών συστημάτων, η εφαρμογή τους είναι περιορισμένη. Σύμφωνα με τους Papadopoulos et al. (2008), στην Ελλάδα κυριαρχούν τα ανοιχτά συστήματα, ενώ τα κλειστά είναι ελάχιστα, λόγω του υψηλού τους κόστους, των τεχνικών δυσχερειών που παρουσιάζουν, καθώς και της δυσκολίας αντιμετώπισης του προβλήματος της συσσώρευσης αλάτων στο ανακυκλωμένο θρεπτικό διάλυμα.

1.3.5. Σύγκριση ανοιχτών και κλειστών υδροπονικών συστημάτων

Σύμφωνα με τους Abd-Elmoniem et al. (2006), η σύγκριση μεταξύ ανοιχτών και κλειστών υδροπονικών συστημάτων καταδεικνύει σημαντικές διαφορές σε σχέση τόσο με το οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο, όσο και με την ίδια την παραγωγή.

Τα κλειστά συστήματα υπερέχουν των ανοιχτών, συμβάλλοντας στην βελτίωση της αποδοτικότητας της χρήσης νερού (Katsoulas et al., 2015), ιδίως σε ξηρές περιοχές της Μεσογείου και εξυπηρετούν στην εξοικονόμηση νερού ακόμα και σε ποσοστό 15-17% (Abd-Elmoniem et al., 2006). Η μείωση κατανάλωσης λιπασμάτων λόγω της επαναχρησιμοποίησης του απορρέοντος διαλύματος μιας καλλιέργειας, που είναι πλούσιο σε θρεπτικά στοιχεία, δεν είναι αμελητέα. Οι αναλογίες των θρεπτικών αυτών στοιχείων δεν βρίσκονται σε απόλυτη ισορροπία με αποτέλεσμα την ανάγκη για

ρύθμιση του διαλύματος πριν επαναχρησιμοποιηθεί σε άλλη καλλιέργεια. Επιπλέον, σύμφωνα με την έρευνα των Alemzadeh και Darei (2024), τα κλειστά συστήματα λειτούργησαν πιο αποδοτικά σε σχέση με τα ανοιχτά, σημειώνοντας αύξηση της αποτελεσματικότητας χρήσης νερού κατά 80,8%, και βελτίωση της πρόσληψης των θρεπτικών στοιχείων κατά 81,9%.

Συνολικά, η επιλογή ενός κλειστού συστήματος αποτελεί μια βιώσιμη πρακτική από άποψη κατανάλωσης πόρων και μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε μεγάλο βαθμό.

1.3.6. Αρχή λειτουργίας ανοιχτών και κλειστών συστημάτων

Στα ανοιχτά υδροπονικά συστήματα, το θρεπτικό διάλυμα άρδευσης τροφοδοτεί την καλλιέργεια και το απορρέον διάλυμα διοχετεύεται στο περιβάλλον χωρίς να ανακυκλώνεται. Με τον τρόπο αυτό η καλλιέργεια εμπλουτίζεται συνεχώς με νέο διάλυμα, περιορίζοντας έτσι τον κίνδυνο συσσώρευσης αλάτων.

Αντιθέτως, η λειτουργία των κλειστών συστημάτων βασίζεται στην ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος απορροής και την επαναχρησιμοποίηση της ύστερα από την κατάλληλη επεξεργασία. Συγκεκριμένα, το απορρέον διάλυμα συλλέγεται σε δεξαμενές απορροής και στη συνέχεια φιλτράρεται και απολυμαίνεται. Η απολύμανση κρίνεται αναγκαία για τον έλεγχο και την αποφυγή εξάπλωσης παθογόνων μικροοργανισμών και μπορεί να επιτευχθεί με βιοφίλτρα, UV ακτινοβολία ή χημικές μεθόδους (Ehret et al., 2001, Yosef, 2008).

Στη συνέχεια, ακολουθεί ρύθμιση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και του pH, με σκοπό τον έλεγχο της ανώτατης επιτρεπόμενης τιμής. Σε περίπτωση που η τιμή της EC υπερβεί το συγκεκριμένο όριο που έχει τεθεί τότε το διάλυμα δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί ξανά, απορρίπτεται και αντικαθίσταται με νέο. Η συγκεκριμένη διαδικασία εφαρμόζεται για την αποφυγή συγκέντρωσης μεγάλων ποσοτήτων αλάτων στο διάλυμα. Η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης αλατότητας στο θρεπτικό διάλυμα διαφέρει ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας και έτσι το επιτρεπόμενο όριο της EC καθορίζεται ανάλογα με αυτή. Η τιμή του pH είναι επίσης καθοριστική κατά την επεξεργασία του θρεπτικού διαλύματος επαναχρησιμοποίησης καθώς η διατήρηση του στο βέλτιστο πιθανό εύρος εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων. Σύμφωνα με την μελέτη του Yosef (2008), η συχνότητα άρδευσης επηρεάζει δραστικά το pH. Συγκεκριμένα, η αύξηση των εφαρμογών από 6 σε 12 φορές την ημέρα προκαλεί μικρή μείωση του pH στο απορρέον διάλυμα, ενώ με περαιτέρω αύξηση της

συχνότητας σε 18 εφαρμογές ημερησίως δεν παρατηρείται καμία αλλαγή στο pH. Επιπλέον, η αναλογία $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ επηρεάζει σημαντικά την τιμή του pH του διαλύματος. Πιο αναλυτικά, υψηλές συγκεντρώσεις NO_3^- στο διάλυμα οδηγούν σε αύξηση της τιμής του pH, ενώ υψηλές συγκεντρώσεις NH_4^+ συσχετίζονται με τη νιτροποίηση και συνήθως προκαλούν μείωση του pH. Κατόπιν της διαδικασίας, το διάλυμα εφοδιάζεται με τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία, που μπορεί να βρίσκονται σε έλλειψη, αλλά και με νερό μέσα στην κεφαλή της υδρολίπανσης. Τέλος, το έτοιμο πλέον διάλυμα τροφοδοτείται μέσω της άρδευσης στην καλλιέργεια. (Yosef, 2008).

1.4. Σύστημα επάλληλων καλλιεργειών

Σύμφωνα με τους Martinez et al. (2024), σύστημα επάλληλων καλλιεργειών θεωρείται εκείνο το οποίο πραγματοποιεί ταυτόχρονη καλλιέργεια διαφορετικών ειδών στην ίδια έκταση. Στο πλαίσιο αυτό ένα σύστημα επάλληλων καλλιεργειών εκμεταλλεύεται το θρεπτικό διάλυμα απορροής μιας καλλιέργειας, συλλέγοντας και επεξεργάζοντάς το κατάλληλα, με απώτερο στόχο την επαναχρησιμοποίηση του σε άλλη καλλιέργεια. Η μελέτη των Incrocci et al. (2003), πρότεινε την εφαρμογή ενός ημίκλειστου συστήματος διαδοχικών καλλιεργειών για τον περιορισμό της περιβαλλοντικής ρύπανσης και την αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων των διαλυμάτων απορροής, οι οποίοι απορρίπτονται στα ανοιχτά υδροπονικά συστήματα.

Ένα από τα βασικά προβλήματα που ανακύπτουν κατά την εφαρμογή των συστημάτων αυτών είναι η δυσκολία επιλογής καλλιεργειών με συμβατά φυσιολογικά και αγρονομικά χαρακτηριστικά. Η καλλιέργεια που δέχεται το διάλυμα απορροής πρέπει να έχει αυξημένη αντοχή στην αλατότητα, λόγω πιθανής αύξησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του διαλύματος που θα λάβει, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα απαιτητική την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού καλλιεργειών. Οι Incrocci et al. (2003), διαπίστωσαν ότι οι καλλιέργειες τομάτας και τοματινιού εξυπηρετούν τον παραπάνω σκοπό. Ομοίως, οι Naounoulis et al. (2024), εφάρμοσαν σύστημα διαδοχικών καλλιεργειών για την κάλυψη των αναγκών καλλιέργειας πεπονιού μέσω της άρδευσης από το θρεπτικό διάλυμα απορροής καλλιέργειας αγγουριού. Ο στόχος τους ήταν να εξοικονομήσουν υδατικούς πόρους και λιπάσματα, καθώς και να αξιολογήσουν την απόδοση της καλλιέργειας, παρουσιάζοντας θετικά αποτελέσματα όσον αφορά την επιλογή καλλιεργειών και το σύστημα επαναχρησιμοποίησης των απορροών. Παρόμοια προσέγγιση ακολούθησαν οι Karatsivou et al. (2023), που ανέλυσαν διάφορες παραμέτρους για την αξιολόγηση του συστήματος επάλληλων

καλλιιεργειών σε καλλιέργειες τομάτας (πρωτεύουσα καλλιέργεια) και μαρούλι, σπανάκι και μαϊντανό (δευτερεύουσες καλλιέργειες).

Προκειμένου, ωστόσο, να λειτουργήσει αποτελεσματικά ένα τέτοιο σύστημα απαιτείται συνεχής παρακολούθηση και ρύθμιση των τιμών pH, EC και ιδιαίτερα των NO_3^- εφόσον χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην εξασφάλιση όλων των θρεπτικών στοιχείων που έχει ανάγκη η καλλιέργεια δέκτης, καθώς και έλεγχο των συνθηκών θερμοκρασίας, υγρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας για να εξασφαλιστεί σταθερή ανάπτυξη και παραγωγή (Incrocci et al., 2003, Rajaseger et al., 2023).

1.5. Υδροπονικές καλλιέργειες

1.5.1. Υδροπονική καλλιέργεια τομάτας

Η τομάτα αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες λαχανοκομικές καλλιέργειες σε παγκόσμια κλίμακα, καταλαμβάνοντας την δεύτερη θέση μετά την πατάτα όσον αφορά την οικονομική και εμπορική της σημασία. Η χρήση της σε υδροπονικά συστήματα (Εικόνα 3) έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς σύμφωνα με την μελέτη των Verdoliva et al. (2021), οι τομάτες είχαν μεγαλύτερη απόδοση και χαμηλότερες ανάγκες για νερό από τις συμβατικές καλλιέργειες. Οι υδροπονικά καλλιεργημένες τομάτες παρουσιάζουν επιπλέον βελτιωμένα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, όπως γεύση και χρώμα (Korcok et al., 2021, Bhattacharya et al., 2025), λόγω της δυνατότητας καλύτερου ελέγχου των περιβαλλοντικών συνθηκών ανάπτυξής τους.



Εικόνα 3. Θερμοκηπιακή καλλιέργεια τομάτας σε υδροπονικό σύστημα κατά το στάδιο της συγκομιδής. (Πηγή: luciasfarm.gr)

Σύμφωνα με την πειραματική μελέτη των Rajatha et al, (2019) και των Kechasov et al. (2021), το κατάλληλο pH για καλλιέργεια υδροπονικής τομάτας πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 5,5-6,5. Η εφαρμογή των συγκεκριμένων τιμών pH οδηγεί σε συνολικά καλύτερη ανάπτυξη των φυτών, ενώ η υπέρβαση του ορίου, είτε σε χαμηλότερες τιμές του 5,0, είτε σε υψηλότερες του 7,0, προκαλεί μείωση του ύψους και ανάπτυξης των ριζών, καθώς και έλλειψη απορρόφησης βασικών θρεπτικών στοιχείων αλλά και ιχνοστοιχείων όπως Fe, Mn, Zn. Λόγω της ανάγκης εξασφάλισης του προαναφερόμενου εύρους τιμών pH, κρίνεται απαραίτητη η συνεχής παρακολούθηση και ρύθμιση του καθ' όλη τη διάρκεια μια καλλιεργητικής περιόδου.

Η τομάτα αποτελεί μια καλλιέργεια σχετικά ευαίσθητη σε περιβαλλοντικές καταπονήσεις, όπως αλατότητα, ακραίες θερμοκρασίες και ψύχος. Συγκεκριμένα η ανθεκτικότητά της στην αλατότητα χαρακτηρίζεται ως μέτρια. Οι επιδράσεις των μεγάλων ποσοτήτων αλάτων στη τομάτα μπορούν να εκδηλωθούν με δυο τρόπους: με το ωσμωτικό στρες, το οποίο μειώνει την πρόσληψη νερού και θρεπτικών στοιχείων και προκαλεί ανισορροπίες στον μεταβολισμό και την ανάπτυξη, και με την υπερβολική συγκέντρωση ιόντων Na^+ και Cl^- στο ριζικό σύστημα, η οποία οδηγεί σε δυσανάλογη τροφοδοσία θρεπτικού διαλύματος. Συνολικά, η υψηλή συγκέντρωση αλάτων μειώνει την φυσιολογική ανάπτυξη της τομάτας και μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση της παραγωγής της (Guo et al., 2022).

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα αποτελεί δείκτη παρακολούθησης των επιπέδων αλατότητας και γι' αυτό η διατήρηση κατάλληλων τιμών κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική καθ' όλη τη διάρκεια μιας καλλιεργητικής περιόδου. Η EC του διαλύματος άρδευσης της τομάτας συνήθως κυμαίνεται από 1,6-5,0 dS m^{-1} (Dorais et al., 2001). Η αύξηση της EC σε τιμές πάνω από 5,0-6,0 dS m^{-1} μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποβάθμιση της παραγωγής και της απόδοσης της καλλιέργειας και παράλληλα να προκαλέσει μείωση του μεγέθους των καρπών, ενώ μέτρια επίπεδα αλατότητας, με διατήρηση EC σε επίπεδα 3,5-5,0 dS m^{-1} μπορούν να βελτιώσουν τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του καρπού και να αυξήσουν την περιεκτικότητά του σε σάκχαρα (Dorais et al., 2001). Οι επιδράσεις της αλατότητας στη τομάτα εξαρτώνται από ποικίλους παράγοντες, με κύριους την ποικιλία, τις κλιματικές ή περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν και το καλλιεργητικό σύστημα που ακολουθήθηκε στη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

Η καλλιέργεια της τομάτας γενικά έχει αυξημένες απαιτήσεις σε νερό, οι οποίες ωστόσο διαφοροποιούνται ανάλογα με το σύστημα και τις μεθόδους που θα επιλέξει

να ακολουθήσει ο κάθε παραγωγός. Σύμφωνα με την μελέτη των Nederhoff & Stangellini (2010), η παραγωγή τομάτας μπορεί να απαιτεί από 4-300 L/kg, εξηγώντας ότι η μέγιστη κατανάλωση σε νερό μπορεί να ανήκει σε καλλιέργεια στον ανοιχτό αγρό και σε χαμηλές συνθήκες αποδοτικότητας, ενώ η ελάχιστη σε κλειστό υδροπονικό σύστημα υψηλής τεχνολογίας. Συνήθως, σε μια τυπική καλλιέργεια τομάτας στον ανοιχτό αγρό παρατηρείται κατανάλωση νερού ίση με 60-300 L/kg (60 όταν εφαρμόζεται στάγδην άρδευση), ενώ στην πλειοψηφία των περιπτώσεων στις οποίες εφαρμόζεται υδροπονικό ανοιχτό σύστημα, οι ανάγκες σε νερό ανέρχονται τα 20-40 L/kg, ανάλογα με τον τύπο του θερμοκηπίου (Nederhoff & Stangellini, 2010). Οι τιμές αυτές εξασφαλίζουν τουλάχιστον τριπλάσια εξοικονόμηση σε σχέση με το έδαφος. Σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα καλλιέργειας τομάτας οι ανάγκες περιορίζονται σε 4-15 L/kg.

Η τομάτα, εξαιτίας των εύθραυστων βλαστών της και του πιθανού κινδύνου θραύσης τους όταν οι καρποί αποκτήσουν το τελικό τους μέγεθος και βάρος, απαιτεί υποστήλωση. Η υποστήλωση είναι μια από τις βασικότερες καλλιεργητικές πρακτικές που εφαρμόζονται σε λαχανοκομικά είδη και ορίζεται ως μια τεχνική στήριξης των φυτών, που βελτιώνει τον αερισμό και ελαττώνει την υγρασία του χώρου με αποτέλεσμα τον περιορισμό εμφάνισης ασθενειών (Wubetie and Wubetu, 2025). Επιπλέον, η τεχνική της υποστήλωσης σε ένα θερμοκήπιο συμβάλλει στην καλύτερη αξιοποίηση του χώρου και διευκολύνει τις καλλιεργητικές εργασίες.

1.5.2. Υδροπονική καλλιέργεια τοματινιού

Τα τοματίνια, λόγω της υψηλής διατροφικής τους αξίας και των αντιοξειδωτικών ιδιοτήτων τους, συνιστούν ιδιαίτερα σημαντική καλλιέργεια σε παγκόσμιο επίπεδο. Η εμπορική και οικονομική τους αξία έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια εξαιτίας της κατάταξής του ως ‘προστατευτικό τρόφιμο’. Ο συγκεκριμένος χαρακτηρισμός αφορά την υψηλή του περιεκτικότητά τους σε θρεπτικά στοιχεία, όπως βιταμίνες, καροτενοειδή, ωμέγα λιπαρά οξέα, κάλιο και ασβέστιο, αλλά και των γενικότερων οφελών που προσφέρουν στην ανθρώπινη υγεία (Narayan et al., 2022, Guedes et al., 2023). Επομένως, η γευστική τους ιδιότητα, η ευρεία ποικιλία τους σε χρώμα και η υψηλή θρεπτική τους αξία, τους εξασφαλίζει μια υπολογίσιμη θέση στη σύγχρονη κοινωνία.

Το τοματίνι, σε αντίθεση με την κοινή τομάτα, παρουσιάζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα ως προς την αλατότητα. Σύμφωνα με τη μελέτη των Li et al. (2024), η

προσαρμοστικότητα του τοματινιού σε συνθήκες αυξημένης αλατότητας είναι ιδιαίτερα σημαντική και επιτυγχάνεται λόγω γενετικών τους χαρακτηριστικών. Αντίστοιχες έρευνες επιβεβαίωσαν την συγκεκριμένη εκτίμηση, εφαρμόζοντας αλατούχο νερό σε καλλιέργειες τοματινιών καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (Martin et al., 2024). Το αποτέλεσμα έδειξε ότι τα τοματίνια είναι ικανά να αντέξουν βραχυπρόθεσμη αλατούχα καταπόνηση, χωρίς να επηρεαστούν σημαντικά τα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά ή η ανάπτυξή τους. Επομένως, η αντοχή τους στην αλατότητα σε σχέση με άλλα λαχανοκομικά είδη τα καθιστά κατάλληλα και πιο εύκολα διαχειρίσιμα για ένταξη σε σύστημα επάλληλων καλλιεργειών.

Ωστόσο, παρά την αντοχή των τοματινιών στην αλατότητα, τα υψηλά επίπεδα ηλεκτρικής αγωγιμότητας (πάνω από $6,0 \text{ dS m}^{-1}$) οδηγούν σε μείωση της απόδοσης παραγωγής και ανάπτυξης (Di Mola et al., 2024). Σε μέτρια επίπεδα EC ($3,0\text{-}5,0 \text{ dS m}^{-1}$) παρατηρείται ενίσχυση των ποιοτικών χαρακτηριστικών της καλλιέργειας.

Σύμφωνα με τους Guedes et al. (2023) και Velazquez et al. (2013), το κατάλληλο pH για υδροπονική καλλιέργεια τοματινιών πρέπει να κυμαίνεται στο $5,5\text{-}6,5$, ενώ σε καλλιέργεια εδάφους η μέγιστη τιμή που προτείνεται ως ιδανική είναι το $6,0$. Το εύρος αυτό ευνοεί την βελτίωση της απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων και συμβάλλει στην καλύτερη ανάπτυξη των φυτών. Στη περίπτωση που οι τιμές του pH μειωθούν κάτω του $5,0$, το διάλυμα θεωρείται ως υπερβολικά όξινο για τη καλλιέργεια, και πιθανόν να προκαλέσει τοξικότητα και μείωση της πρόσληψης θρεπτικών στοιχείων και άρα της ποιότητας των παραγόμενων καρπών. Αντιθέτως, το υψηλό pH (πάνω από 7) τείνει να επιφέρει μείωση της διαθεσιμότητας των στοιχείων όπως Fe, Zn και Mn και τελικά δυσκολία στην ανάπτυξη του ριζικού συστήματος.

Η υποστύλωση συνιστά σημαντική καλλιεργητική τεχνική για την καλλιέργεια των τοματινιών, καθώς συνδέεται άμεσα με την καλύτερη ανάπτυξη, την απόδοση και την εξασφάλιση βέλτιστων συνθηκών στο θερμοκήπιο. Προκειμένου να αποφευχθεί η επαφή με το έδαφος, όταν η καλλιέργεια αναπτυχθεί σε ικανοποιητικό επίπεδο, και η αποφυγή της καταπόνησης των βλαστών, η στήριξη των φυτών κρίνεται απαραίτητη. Εκτός, των θετικών επιδράσεων στην απόδοση, η υποστύλωση συμβάλλει στη εξασφάλιση υγιών και ανθεκτικών φυτών, γεγονός που συνεπάγεται την βέλτιστη ποιότητα παραγωγής (Rashid et al., 2022).

1.6. Ιοντοεκλεκτικοί αισθητήρες

Οι αισθητήρες για τη ρύθμιση νιτρικών ιόντων είναι συσκευές μέτρησης των συγκεντρώσεων των NO_3^- σε πραγματικό χρόνο με απώτερο σκοπό την παρακολούθηση και την διαχείριση των τιμών τους. Μπορεί να είναι ηλεκτροχημικοί, όπως τα ιοντοεκλεκτικά ηλεκτρόδια (ISE), οπτικοί ή βιοαισθητήρες (Wardak, 2023). Οι πιο διαδεδομένοι εξαιτίας των πλεονεκτημάτων τους είναι οι ηλεκτροχημικοί, ενώ ακολουθούν οι οπτικοί, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία αλλά έχουν μεγαλύτερο κόστος αγοράς και απαιτούν καθαρά δείγματα για να μπορέσουν να λειτουργήσουν ορθά (όχι θολά διαλύματα) και τέλος οι βιοαισθητήρες, οι οποίοι έχουν περιορισμένη εφαρμογή κυρίως σε ερευνητικά πεδία (Pellerin et al. 2013). Αντίθετα, οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες είναι πιο οικονομικοί, είναι ιδανικοί για υδροπονικές και γενικά γεωργικές εφαρμογές, καθώς δεν επηρεάζονται από τη θολότητα του δείγματος όπως οι οπτικοί, είναι εύκολοι στη χρήση και η ακρίβεια των μετρήσεων τους είναι επαρκής για την παρακολούθηση των συγκεντρώσεων NO_3^- . (Eldeeb et al., 2023).

Σύμφωνα με την έρευνα των Jung et al. (2015), η εφαρμογή ιοντοεκλεκτικών αισθητήρων σε υδροπονική καλλιέργεια μαρουλιού σε κλειστό σύστημα συντέλεσε στην σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων NO_3^- , K^+ και Ca^{2+} και βελτίωσε την ανάπτυξη των φυτών σε ικανοποιητικό επίπεδο. Παρόμοια προσέγγιση είχαν οι Bailey, et al. (1988), οι οποίοι στο πείραμά τους με υδροπονική καλλιέργεια τομάτας χρησιμοποίησαν αισθητήρες για την συνεχή παρακολούθηση NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- του θρεπτικού διαλύματος και παρατήρησαν σημαντική βελτίωση ως προς την ακρίβεια γνώσης των θρεπτικών στοιχείων και άρα της λίπανσης της καλλιέργειας, και παράλληλα κατέγραψαν μείωση σφαλμάτων που προέκυπταν από τον έλεγχο μόνο της EC και του pH. Συνεπώς, οι ιοντοεκλεκτικοί αισθητήρες συνιστούν ένα ευέλικτο και οικονομικό αποδοτικό εργαλείο για την ακριβή μέτρηση και ανάλυση των ιόντων, συμβάλλοντας έτσι στην καλύτερη διαχείριση των θρεπτικών διαλυμάτων από τους παραγωγούς.

1.7. Αποδοτικότητα χρήσης νερού

Σύμφωνα με τους Hatfield και Dold (2019), ως αποτελεσματικότητα χρήσης νερού (Water Use Efficiency, WUE) ορίζεται η ποσότητα άνθρακα που αφομοιώνεται ως βιομάζα ή καρπό ανά μονάδα νερού που χρησιμοποιείται από την καλλιέργεια. Συνεπώς, η WUE αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρο για την ανάπτυξη των φυτών και

επιβάλλεται να λαμβάνεται υπόψιν κατά τη διάρκεια μιας καλλιεργητικής διαδικασίας. Όταν η WUE είναι χαμηλή αυτό συνεπάγεται την ανάγκη του φυτού να καταναλώσει πολύ μεγαλύτερες ποσότητες νερού για να μπορέσει να παράγει το ίδιο αποτέλεσμα. Ως αποτέλεσμα, επηρεάζεται αρνητικά η φυσιολογία της καλλιέργειας και επιβαρύνεται οικονομικά ο παραγωγός (λόγω τροφοδοσίας μεγαλύτερου όγκου νερού από ότι χρειάζεται κανονικά η καλλιέργεια). Πιο συγκεκριμένα, η χαμηλή αποδοτικότητα χρήσης νερού τείνει να προκαλεί κλείσιμο των στομάτων των φυτών και απώλειες νερού μέσω της εξάτμισης. Κατά συνέπεια μειώνεται δραστικά η πρόσληψη διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και έτσι περιορίζεται η διαδικασία της φωτοσύνθεσης (Ullah et al., 2019). Το χαμηλό επίπεδο της WUE, επίσης, συσχετίζεται με την ελλιπή θρεπτική και ενεργειακή αποδοτικότητα, λόγω της μειωμένης αξιοποίησης του αζώτου και της ηλιακής ακτινοβολίας (Hatfield και Dold, 2019). Με στόχο την εξισορρόπηση της πρόσληψης CO_2 , της διαχείρισης των υδατικών πόρων και των θρεπτικών συστατικών αλλά και της εξασφάλισης της βέλτιστης απόδοσης και παραγωγής, κρίνεται απαραίτητη η κατάλληλη ρύθμιση της αποδοτικότητας χρήσης νερού.

Η χαμηλή αποδοτικότητα χρήσης νερού μπορεί να οφείλεται σε πλήθος παραγόντων που αφορούν τη διαχείριση της καλλιέργειας, περιβαλλοντικές παραμέτρους, φυσιολογικούς μηχανισμούς των φυτών, καθώς και τα ίδια τα καλλιεργητικά συστήματα. Πιο αναλυτικά, οι λανθασμένες μέθοδοι άρδευσης, όπως η αλόγιστη τροφοδοσία νερού ή η ανεπαρκής άρδευση, αλλά και οι μη ενδεδειγμένες καλλιεργητικές πρακτικές, όπως η εσφαλμένη πυκνότητα φύτευσης, οδηγούν σε μείωση της WUE (Ullah et al., 2019). Σύμφωνα με τους Katsoulas et al. (2015), η χαμηλή αποδοτικότητα χρήσης νερού μπορεί να συνδέεται με τις υψηλές ανάγκες εξαερισμού, οι οποίες καταλήγουν σε απώλεια των υδρατμών στο περιβάλλον. Η έλλειψη εξειδικευμένων συστημάτων ψύξης και αφύγρανσης συνεπάγονται την υπερβολική διαπνοή, αυξάνουν την εξάτμιση και έτσι προκαλούν την απώλεια νερού. Επομένως, η ανεπαρκής διαχείριση του μικροκλίματος των θερμοκηπίων μειώνει την αποδοτικότητα της χρήσης νερού. Επιπλέον, η χαμηλή WUE συσχετίζεται σύμφωνα με τους Hatfield και Dold (2019) με την θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, το θερμικό στρες, που μπορεί να προκληθεί από απότομες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας ή συνδυασμό υψηλών θερμοκρασιών με την ξηρασία μιας περιοχής, αυξάνει την ανισορροπία της διαπνοής σε σχέση με τη φωτοσύνθεση και μειώνει την WUE.

Εκτός της βελτίωσης των καλλιεργητικών τεχνικών και τον περιορισμό πιθανών λανθασμένων χειρισμών που μπορεί να συμβούν κατά τη διάρκεια μιας καλλιεργητικής περιόδου, οι Katsoulas et al. (2015), παρουσίασαν διαφορετική προσέγγιση επίλυσης του προβλήματος. Αναλυτικότερα, αναφέρουν ότι η χρήση ημίκλειστων υδροπονικών συστημάτων έναντι των ανοιχτών, συμβάλλει στην εξοικονόμηση του νερού που αποβάλλεται μέσω διαπνοής, μέσω της συλλογής των υδρατμών και της ανακύκλωσής τους σε ειδικό μηχανισμό (heat exchanger). Η προαναφερόμενη μελέτη δίνει έμφαση στη ρύθμιση του μικροκλίματος του θερμοκηπίου τονίζοντας την επίτευξη υψηλής αποδοτικότητας και περαιτέρω εξοικονόμησης, εφόσον εφαρμοστεί ημίκλειστο σύστημα με ψύξη και αφύγρανση για σταθεροποίηση του περιβάλλοντος και μείωση των απωλειών του εξαερισμού. Οι Ullah et al. (2019), υπό διαφορετική οπτική εστιάζουν στις πρακτικές άρδευσης ακριβείας, όπως η ελλειμματική άρδευση, μια μέθοδος άρδευσης που δεν καλύπτει πλήρως τις ανάγκες των φυτών σε νερό και εκθέτει το φυτό σε ελεγχόμενο υδατικό στρες, το οποίο μειώνει τη συνολική κατανάλωση νερού χωρίς σημαντικές απώλειες στην απόδοση και συνεπώς επιτυγχάνεται η βελτίωση της αποδοτικότητας χρήσης νερού.

1.8. Σκοπός της εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την αξιολόγηση ενός συστήματος επάλληλων καλλιεργειών σε υδροπονικό περιβάλλον, με έμφαση στη διαχείριση των διαλυμάτων απορροής. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η αξιοποίηση των απορροών που προκύπτουν από μια πρωτεύουσα καλλιέργεια (τομάτα) για την άρδευση μιας δευτερεύουσας καλλιέργειας (τοματίνι). Κεντρικός στόχος της μελέτης είναι η διερεύνηση τόσο των ποιοτικών όσο και των ποσοτικών χαρακτηριστικών των θρεπτικών διαλυμάτων, όπως αυτά διαφοροποιούνται ανάλογα με τις διαφορετικές μεταχειρίσεις. Η διαδικασία αξιολόγησης του συστήματος στηρίχθηκε στη συλλογή των απορροών της τομάτας, στην κατάλληλη επεξεργασία τους και στην επαναχρησιμοποίησή τους για την ανάπτυξη της καλλιέργειας των τοματινιών. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη ρύθμιση και διαχείριση των επιπέδων των νιτρικών ιόντων, ώστε να εξασφαλιστεί η ορθολογική θρέψη των φυτών και να διασφαλιστεί η ποιότητα της παραγωγής. Παράλληλα, εξετάστηκε η αποδοτικότητα χρήσης των νερού και λιπασμάτων, με στόχο την αποτίμηση της συνολικής κατανάλωσης νερού και λιπασμάτων. Η παρούσα μελέτη έχει ως απώτερο σκοπό να επιφέρει μια βιώσιμη εναλλακτική πρακτική στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες, επιτυγχάνοντας την

καλύτερη αξιοποίηση θρεπτικών στοιχείων και υδατικών πόρων με παράλληλη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των υδροπονικών συστημάτων.

2. Υλικά και μέθοδοι

2.1. Εγκαταστάσεις του πειράματος

Το πείραμα της παρούσας πτυχιακής διεξήχθη στο πιλοτικό θερμοκηπιακό πάρκο του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, το οποίο υπάγεται στο Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το θερμοκηπιακό πάρκο βρίσκεται στην περιοχή του Βελεστίνου, στον νομό Μαγνησίας, με συντεταγμένες $39^{\circ} 22'$, $22^{\circ} 44'$ και υψόμετρο 85 m (Εικόνα 4).

Το θερμοκηπιακό πάρκο αποτελείται από θερμοκήπια διαφορετικών τύπων, καθένα εκ των οποίων διαθέτει εξειδικευμένο τεχνικό εξοπλισμό. Για τις ανάγκες της παρούσας πειραματικής μελέτης αξιοποιήθηκαν 2 θάλαμοι, επιλεγμένοι από τους 12 που απαρτίζουν το θερμοκηπιακό συγκρότημα, για την πρωτεύουσα καλλιέργεια τομάτας (*Solanum lycopersicum* cv. Ekstasis F1 x Diffensor F1), καθώς και την δευτερεύουσα καλλιέργεια τοματινιού (*Solanum lycopersicum* cv. Mojitos F1 x Diffensor F1).



(α)



(β)

Εικόνα 4. α) Κάτοψη του θερμοκηπιακού πάρκου (πηγή: Google Earth). Με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι επιλεγμένοι θάλαμοι για την εκπόνηση της πειραματικής διαδικασίας και β) πρόσοψη του θερμοκηπίου γοτθικού τύπου.

Η καλλιέργεια της τομάτας, καθώς και του τοματινιού πραγματοποιήθηκε σε θερμοκήπιο γοτθικού τύπου, εξοπλισμένο με 6 θαλάμους και συνολική επιφάνεια 1500 m². Ο κάθε θάλαμος που χρησιμοποιήθηκε έχει συνολική επιφάνεια εδάφους 240 m², 25 m μήκος, 9.6 m πλάτος και 7.4 m ύψος, η οροφή του καλύπτεται από πλαστικό στρώμα πολυαιθυλενίου, ενώ τα πλευρικά του τοιχώματα αποτελούνται από

πολυκαρβονικά φύλλα. Οι θάλαμοι στους οποίους διεξήχθησαν οι πειραματικές διαδικασίες ήταν εξοπλισμένοι με 6 υδροπονικά κανάλια ο καθένας, μήκους 20 m.

2.2. Διαχείριση της καλλιέργειας

Οι δύο θάλαμοι που αξιοποιήθηκαν για την υλοποίηση του πειράματος διέφεραν ως προς το είδος της καλλιέργειας που διατηρούσαν. Συγκεκριμένα, στον πρώτο θάλαμο, συνολικής έκτασης 240 m² και καλλιεργούμενης επιφάνειας 183 m², καλλιεργήθηκαν αποκλειστικά φυτά τομάτας, ενώ στον δεύτερο, ίδιας έκτασης και καλλιεργούμενης επιφάνειας, αναπτύχθηκαν φυτά τοματινιού. Καθένας από τους δύο αυτούς θαλάμους ήταν εξοπλισμένος με έξι υδροπονικά κανάλια μήκους 20m, κατάλληλα για την τοποθέτηση των υποστρωμάτων.

Το υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε τόσο στην καλλιέργεια της τομάτας, όσο και στην καλλιέργεια του τοματινιού ήταν πετροβάμβακας (Grodan International, Ολλανδία), ο οποίος χαρακτηρίζεται από υψηλή ικανότητα συγκράτησης νερού και αυξημένη δυνατότητα κυκλοφορίας του αέρα (πορώδες υλικό), γεγονός που τον καθιστά κατάλληλο για υδροπονικές εφαρμογές (Raviv et al., 2019). Σε καθένα από τα έξι υδροπονικά κανάλια των δύο θαλάμων τοποθετήθηκαν 19 σάκοι πετροβάμβακα και επομένως συνολικά για κάθε θάλαμο 114 σάκοι.



Εικόνα 5. Σπορόφυτα τομάτας σε κύβους πετροβάμβακα κατά την παραλαβή, πριν τη μεταφύτευση στο υπόστρωμα πετροβάμβακα.

Τα σπορόφυτα παρελήφθησαν σε κύβους πετροβάμβακα διαστάσεων 7,5 × 7,5 cm, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5 και μεταφυτεύτηκαν σε σάκους του ίδιου υποστρώματος. Κατά το στάδιο προετοιμασίας της εγκατάστασης των φυτών πραγματοποιήθηκε διαβροχή του υποστρώματος με θρεπτικό διάλυμα, μέχρι το σημείο

κορεσμού, σύμφωνα με τα προτεινόμενα πρωτόκολλα υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας σε ανοικτά και κλειστά συστήματα (Σάββας, 2011).

Αναφορικά με την πυκνότητα φύτευσης, τα φυτά της τομάτας εναποτέθηκαν σε κάθε σάκο ανά τέσσερα, με ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Συνεπώς, στον πρώτο θάλαμο ο αριθμός των φυτών διαμορφώθηκε συνολικά στα 456. Αντίστοιχα, ο ίδιος αριθμός φυτών τοματινιού χρησιμοποιήθηκε στον δεύτερο θάλαμο, όπου τα 456 φυτά επιμερίστηκαν ανά τέσσερα σε κάθε σάκο. Συνολικά, για την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας, χρησιμοποιήθηκαν 912 φυτά.

Η εγκατάσταση της κύριας καλλιέργειας που λειτούργησε ως δότης του θρεπτικού διαλύματος, καθώς και της δευτερεύουσας καλλιέργειας που λειτούργησε ως δέκτης, πραγματοποιήθηκε στις 13/03/2024, ημερομηνία που αποτελεί την εκκίνηση της καλλιεργητικής περιόδου και ολοκληρώθηκε στις 12/07/2024. Επομένως, η συνολική διάρκεια της καλλιέργειας ανήλθε σε 121 ημέρες. Κατά τη φύτευση τα φυτά είχαν σχηματίσει ήδη τα πρώτα 4-5 φύλλα. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται ο θάλαμος που περιλαμβάνει τη πρωτεύουσα και τη δευτερεύουσα καλλιέργεια αμέσως μετά την μεταφύτευση της στους σάκους πετροβάμβακα.



(α)



(β)

Εικόνα 6. Εγκατάσταση φυτών (α) τομάτας και (β) τοματινιού σε σάκους πετροβάμβακα μετά το στάδιο μεταφύτευσης στο θερμοκήπιο

Η διαχείριση του μικροκλίματος στο θερμοκηπιακό περιβάλλον πραγματοποιήθηκε μέσω ενός συστήματος αυτοματισμού (SERCOM, Lisse, Ολλανδία), το οποίο ήταν συνδεδεμένο με δίκτυο αισθητήρων για την καταγραφή κρίσιμων παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία αέρα, η σχετική υγρασία και η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, σε χρονικά

διαστήματα των πέντε λεπτών. Ο φυσικός αερισμός επιτυγχανόταν μέσω ενός ανοίγματος στην οροφή, το οποίο ενεργοποιούνταν αυτόματα όταν η θερμοκρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος υπερέβαινε τους 24 °C, εξασφαλίζοντας την απομάκρυνση της περίσσειας θερμότητας και τη βελτίωση των συνθηκών αερισμού. Επιπλέον, για την αποφυγή θερμικής καταπόνησης σε περιόδους αυξημένων θερμοκρασιών (δηλαδή πάνω από 26°C) λειτουργούσε ένα σύστημα αερισμού, αποτελούμενο από ανεμιστήρες σε συνδυασμό με υγρή παρειά, το οποίο μείωνε την εσωτερική θερμοκρασία του θερμοκηπίου. Κατά τη χειμερινή περίοδο, η θερμική προστασία εξασφαλιζόταν με τη χρήση καυστήρα πετρελαίου, ο οποίος ενεργοποιούνταν όταν η θερμοκρασία του αέρα έπεφτε κάτω από τους 14 °C. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνταν θερμομονωτική κουρτίνα σκίασης με διαπερατότητα 0,50, η οποία περιορίζει την απώλεια θερμότητας κατά τις νυχτερινές ώρες, όταν ο λέβητας πετρελαίου δεν ήταν σε λειτουργία και παράλληλα, μειώνει την υπερβολική εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία όταν η ένταση της υπερέβαινε τα 750 W m⁻². Ο συνδυασμός αυτών των τεχνολογιών κατέστησε εφικτή τη διατήρηση σταθερών συνθηκών εντός του θερμοκηπίου, διασφαλίζοντας την ομαλή ανάπτυξη, τόσο της πρωτεύουσας, όσο και της δευτερεύουσας καλλιέργειας.

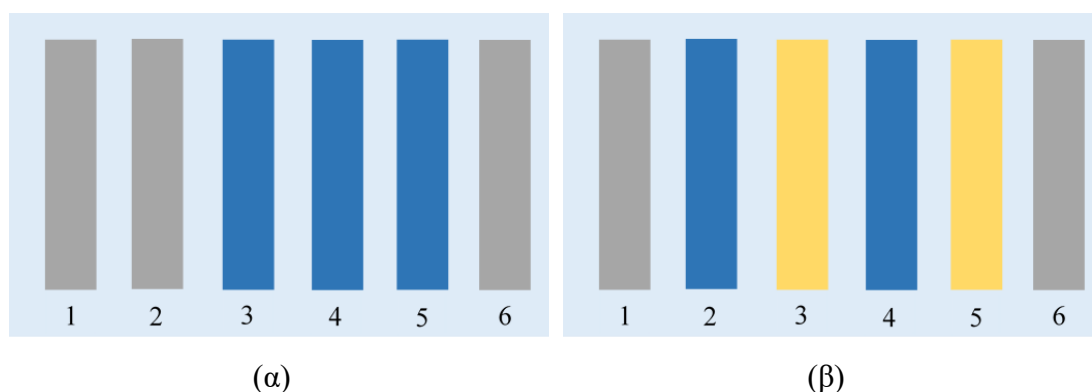
2.3. Μεταχειρίσεις

Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στην αξιολόγηση ενός συστήματος επάλληλων καλλιεργειών σε υδροπονικές συνθήκες, με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης της άρδευσης μιας δευτερεύουσας καλλιέργειας τοματινιού με το απορρέον θρεπτικό διάλυμα μιας πρωτεύουσας καλλιέργειας τομάτας (T₀). Για τον σκοπό αυτό η καλλιέργεια δέκτης (τοματίνι) χωρίστηκε σε δύο μεταχειρίσεις: α) μάρτυρας (T₁), όπου το τοματίνι αρδευόταν με ενδεδειγμένο θρεπτικό διάλυμα, και β) διαδοχική (T₂), όπου το τοματίνι αρδευόταν αποκλειστικά με το απορρέον διάλυμα της τομάτας, με χρήση αισθητήρων ρύθμισης νιτρικών ιόντων.

Για τη μεταχείριση T₂, αξιοποιήθηκαν δύο από τα έξι κανάλια του θαλάμου, ενώ για τη μεταχείριση T₁ διατέθηκαν τα υπόλοιπα. Αυτός ο διαμοιρασμός έγινε για την εξασφάλιση της πλήρους κάλυψης των αναγκών της μεταχείρισης T₂, με την αποκλειστική επαναχρησιμοποίηση των απορροών της πρωτεύουσας καλλιέργειας.

Με σκοπό να εξασφαλιστεί η τυχαιοποιημένη τοποθέτηση για την πειραματική διάταξη, οι μεταχειρίσεις εφαρμόστηκαν εναλλάξ μεταξύ των υδροπονικών καναλιών, εξαιρώντας τις εξωτερικές γραμμές (κανάλι 1 και 6 και για τους δύο θαλάμους) για την ελαχιστοποίηση πιθανών παραπλεύρων επιδράσεων. Ακολουθούν σχεδιαγράμματά

(Εικόνα 7) στα όποια παρουσιάζονται τα υδροπονικά κανάλια της πρωτεύουσας και της δευτερεύουσας καλλιέργειας, από τα οποία λαμβάνονταν οι μετρήσεις για την εκπόνηση του πειράματος.



Εικόνα 7. Απεικόνιση των πειραματικών καναλιών της (α) πρωτεύουσας και (β) δευτερεύουσας καλλιέργειας: με γκρι τα μη χρησιμοποιηθέντα, με μπλε οι μετρήσεις στην τομάτα (αριστερά) και στη μεταχείριση T_1 (δεξιά), και με κίτρινο οι μετρήσεις στη μεταχείριση T_2 .

2.4. Συστήματα υδρολίπανσης

Η παρασκευή και η διαχείριση του θρεπτικού διαλύματος βασίστηκε σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα υδρολίπανσης, το οποίο αποσκοπεί στην εξασφάλιση σταθερής ποιότητας του θρεπτικού διαλύματος που τροφοδοτούσε τις δύο καλλιέργειες. Μέσω του συγκεκριμένου συστήματος ήταν εφικτός ο έλεγχος των αισθητήρων και των δοσομετρικών αντλιών, με απώτερο σκοπό την διασφάλιση της συνεχούς προσθήκης κατάλληλων ποσοτήτων νερού, και λιπασμάτων για την ορθή ανάπτυξη των φυτών. Τα κύρια τμήματα του συστήματος απαρτίζουν το σύστημα ανάμιξης, άρδευσης και επαναχρησιμοποίησης του θρεπτικού διαλύματος που απορρέει. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 8, το σύστημα ανάμιξης των λιπασμάτων συνίσταται από έξι δεξαμενές μητρικών διαλυμάτων, τη δεξαμενή του νιτρικού οξέος, την κεφαλή της υδρολίπανσης, τον δοσομετρητή νερού, τις αντλίες έγχυσης, το σύστημα απολύμανσης, το φίλτρο, καθώς και τους αισθητήρες μέτρησης pH και EC. Η λειτουργία του συστήματος επικεντρώνεται κυρίως στην κεφαλή υδρολίπανσης (500L), στην οποία πραγματοποιούνταν η προετοιμασία των θρεπτικών διαλυμάτων και συγκεκριμένα η ανάμιξη των στοιχείων και η προσαρμογή τους στις επιθυμητές τιμές pH και EC, κατάλληλες για τη θρέψη των καλλιεργειών. Στοχεύοντας, έτσι, στην ενδεδειγμένη θρέψη των φυτών χρησιμοποιήθηκαν έξι δεξαμενές (δύο για την τομάτα, και δύο για κάθε μεταχείριση τοματινιού) μητρικών διαλυμάτων που περιλάμβαναν θρεπτικά στοιχεία σε συμπυκνωμένη μορφή, η κάθε μία έχει χωρητικότητα 100 L, και μια δεξαμενή νιτρικού οξέος (100L), η οποία ήταν υπεύθυνη για τη ρύθμιση του pH

στο τελικό διάλυμα. Η πρώτη δεξαμενή χρησιμοποιήθηκε για την αποθήκευση των λιπασμάτων που περιέχουν ασβέστιο (Ca^{2+}), αμμώνιο (NH_4^+) και χηλικό σίδηρο, ενώ η δεύτερη δεξαμενή αξιοποιήθηκε για την αποθήκευση λιπασμάτων με θειικά και φωσφορικά άλατα. Ο διαχωρισμός αυτός κρίθηκε απαραίτητος ώστε να αποφευχθεί η καθίζηση αλάτων με χαμηλή διαλυτότητα, όπως το CaSO_4 και το $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$.



Εικόνα 8. Μονάδα αυτοματοποιημένης λίπανσης για την παραγωγή θρεπτικών διαλυμάτων

Για την παραγωγή του τελικού θρεπτικού διαλύματος λαμβάνονταν ίσες ποσότητες θρεπτικών διαλυμάτων από κάθε δεξαμενή, έπειτα από την απαραίτητη προετοιμασία, ενώ για την προσωρινή αποθήκευση του πριν την άρδευση χρησιμοποιήθηκαν δεξαμενές των 500 L η καθεμιά, οι οποίες κάλυπταν τις ανάγκες των θαλάμων καλλιέργειας. Κάθε δεξαμενή η οποία περιλάμβανε το τελικό διάλυμα με τις κατάλληλες τιμές pH και EC, κάλυπτε τις ανάγκες τριών γραμμών καλλιέργειας σε κάθε θάλαμο. Με την έναρξη λειτουργίας του συστήματος άρδευσης, το τελικό θρεπτικό διάλυμα μεταφερόταν μέσω ενός σωλήνα πολυαιθυλενίου (με διάμετρο 25mm) προς τους σταλάκτες, ο καθένας από τους οποίους κατέληγε μέσω σωληνώσεων τύπου σπαγγέτι σε μια λόγχη εγκατεστημένη στο υπόστρωμα πετροβάμβακα.

2.4.1. Επαναχρησιμοποίηση του διαλύματος απορροής με χρήση αισθητήρων ρύθμισης νιτρικών ιόντων

Η ανακύκλωση της απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας με σκοπό την άρδευση της μεταχείρισης T₂ της δευτερεύουσας καλλιέργειας περιλάμβανε έναν ιοντοεκλεκτικό αισθητήρα (ISE) νιτρικών ιόντων (s::can GmbH, Βιέννη, Αυστρία) με

σκοπό την παρακολούθηση και την βελτιστοποίηση των επιπέδων των νιτρικών ιόντων σε κάθε στάδιο του συστήματος επάλληλων καλλιεργειών. Ο αισθητήρας ο οποίος ήταν τοποθετημένος στην υδροπονική κεφαλή και ενσωματωμένος στο PLC, κατέγραφε τις συγκεντρώσεις των νιτρικών κάθε φορά που προετοιμαζόταν θρεπτικό διάλυμα για όλες τις καλλιέργειες και τις μεταχειρίσεις.

Ωστόσο, στη περίπτωση της μεταχείρισης T₂, πέρα από τη απλή καταγραφή των νιτρικών ιόντων, λάμβανε χώρα και η ρύθμιση της συγκέντρωσης των NO₃⁻ στα επιθυμητά επίπεδα. Η διαδικασία ρύθμισης των νιτρικών για την μεταχείριση T₂ πραγματοποιήθηκε με βάση την ακόλουθη προσέγγιση. Αρχικά, το θρεπτικό διάλυμα απορροής από την πρωτεύουσα καλλιέργεια επέστρεφε πίσω στην υδροπονική κεφαλή. Κατόπιν, το pH ρυθμιζόταν στα επιθυμητά επίπεδα για την μεταχείριση T₂ χρησιμοποιώντας νιτρικό οξύ και στη συνέχεια αξιολογούνταν η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων στο διάλυμα. Αν η συγκέντρωση των NO₃⁻ υπερέβαινε ένα προκαθορισμένο όριο, το οποίο ήταν 1200 ppm, τότε πραγματοποιούνταν αραίωση με την προσθήκη νερού μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή συγκέντρωση (περίπου 900 ppm NO₃⁻). Αντιθέτως, στη περίπτωση που τα επίπεδα NO₃⁻ βρίσκονταν κάτω από το απαιτούμενο όριο, προστίθονταν λιπάσματα με σκοπό την εξασφάλιση των επιθυμητών τιμών. Στο τελικό στάδιο, ο όγκος του προστιθέμενου νερού (αν είχε προστεθεί), όπως και οι τιμές του pH, της EC, και των NO₃⁻ καταγράφονταν πριν από τη μεταφορά του διαλύματος στη δεξαμενή άρδευσης της μεταχείρισης T₂.

2.5. Σύστημα άρδευσης

Η άρδευση και στους δύο θαλάμους πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός συστήματος στάγδην άρδευσης, με σκοπό την γενική εξασφάλιση παροχής ομοιογενούς θρεπτικού διαλύματος σε κάθε φυτό. Όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 9, οι σταλάκτες είναι τοποθετημένοι κάθετα στο υπόστρωμα του πετροβάμβακα και κατανεμημένοι έτσι ώστε να αντιστοιχούν πέντε σταλάκτες σε κάθε σάκο. Κάθε φυτό διαθέτει έναν σταλάκτη, ενώ ο πέμπτος σταλάκτης έχει εγκατασταθεί πάνω στο σάκο. Συνολικά, για την άρδευση κάθε θαλάμου χρησιμοποιήθηκαν 570 σταλάκτες.



Εικόνα 9. Τοποθέτηση σταλακτών στο υπόστρωμα πετροβάμβακα σε κάθε φυτό και σάκο για την εξασφάλιση άρδευσης και θρέψης.

Η συχνότητα άρδευσης ήταν προσαρμοσμένη στις απαιτήσεις κάθε καλλιέργειας και στις εκάστοτε κλιματικές συνθήκες. Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, το σύστημα των δυο καλλιεργειών ενεργοποιούνταν περίπου 10–13 φορές ημερησίως, με διάρκεια κάθε κύκλου 1–3 λεπτά. Κάθε δόση περιλάμβανε τον αναγκαίο όγκο θρεπτικού διαλύματος για την κάλυψη των αναγκών των καλλιεργειών, συνοδευόμενο από ένα πρόσθετο ποσοστό 20–30%, ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική συγκέντρωση αλάτων στο υπόστρωμα.

Μετά από κάθε άρδευση, οι απορροές της πρωτεύουσας καλλιέργειας συλλέγονταν σε δεξαμενές απορροής, οι οποίες ήταν εξοπλισμένες με αισθητήρες στάθμης και αντλίες για την ανακύκλωση του διαλύματος προς την δευτερεύουσα καλλιέργεια, με στόχο την επαναχρησιμοποίηση του. Κάθε δεξαμενή συλλογής του απορρέοντος διαλύματος αντιστοιχούσε σε μια δεξαμενή άρδευσης.

Η λειτουργία του συστήματος άρδευσης ήταν πλήρως αυτοματοποιημένη μέσω ενός συστήματος PLC, το οποίο κατέγραφε σε πραγματικό χρόνο τις τιμές pH, EC και NO_3^- του θρεπτικού διαλύματος σε κεντρική βάση δεδομένων και την κατανάλωση νερού, παρέχοντας συνεχή πληροφόρηση για τη διαχείριση της θρέψης και έτσι δίνοντας την ευκαιρία να διορθωθεί όπου παρουσιάζεται πρόβλημα. Με τον τρόπο αυτό ήταν δυνατή η άμεση προσαρμογή της σύστασης του διαλύματος στις ανάγκες της καλλιέργειας, γεγονός που συνέβαλε στη βέλτιστη ανάπτυξη των φυτών και στη σταθερότητα της παραγωγής.

2.6. Μετρήσεις

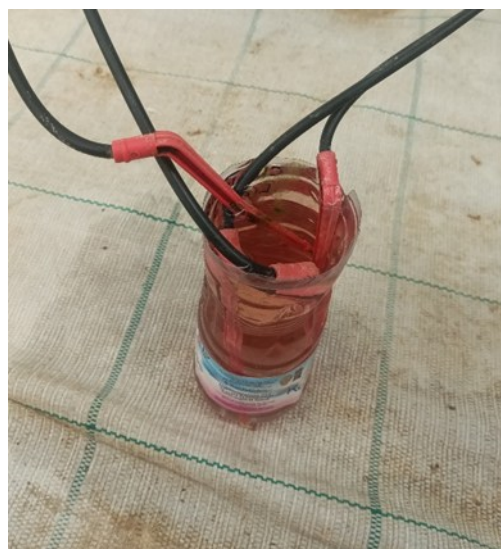
2.6.1. Δειγματοληψία

Για την εκπόνηση του πειράματος και την τελική διεξαγωγή συμπερασμάτων, λαμβάνονταν μια φορά την εβδομάδα μια σειρά μετρήσεων, με την πρώτη να σημειώνεται στις 22/3/24 και τη τελευταία στις 8/7/24. Οι μετρήσεις λάμβαναν χώρα τις πρωινές ώρες και τα θρεπτικά διαλύματα συλλέγονταν σε μπουκάλια τα οποία μεταφέρονταν σε διαφορετικό χώρο προκειμένου να καταγραφούν τα αποτελέσματα.

Από την πρωτεύουσα καλλιέργεια τομάτας (Εικόνα 10α) οι μετρήσεις άρδευσης και απορροής πραγματοποιήθηκαν στα υδροπονικά κανάλια 3, 4 και 5. Για την απορροή, ο σωλήνας συλλογής αφαιρούνταν προσωρινά και στο άκρο των καναλιών τοποθετούνταν πλαστικά μπουκάλια έως ότου συγκεντρωθεί επαρκής όγκος διαλύματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10α. Αντίστοιχα, για τις μετρήσεις άρδευσης τα μπουκάλια γεμίζονταν απευθείας από τον σωλήνα άρδευσης.



(α)



(β)

Εικόνα 10. Δειγματοληψία θρεπτικού διαλύματος απορροής από (α) το τέλος υδροπονικού καναλιού και (β) μέσω σταλακτών από τη καλλιέργεια του τοματινιού.

Από την δευτερεύουσα καλλιέργεια του τοματινιού λαμβάνονταν μετρήσεις από όλα τα υδροπονικά κανάλια εκτός των δύο εξωτερικών γραμμών (1 και 6). Συγκεκριμένα, για τις αναλύσεις της μεταχείρισης T_1 πραγματοποιούνταν δειγματοληψία από τα κανάλια 3 και 5, ενώ για την T_2 από τα κανάλια 2 και 4. Ο προσδιορισμός της απορροής στο τοματίνι διεξήχθη με τον ίδιο τρόπο όπως και στη πρωτεύουσα καλλιέργεια, ενώ

οι μετρήσεις για την άρδευση λαμβάνονταν απευθείας μέσα από τους σταλάκτες όπως φαίνεται στην Εικόνα 10β.

2.6.2. Μετρήσεις pH, ηλεκτρικής αγωγιμότητας και θερμοκρασίας του διαλύματος άρδευσης και απορροής

Τόσο από την πρωτεύουσα, όσο και από την δευτερεύουσα καλλιέργεια, συλλέγονταν δείγματα θρεπτικού διαλύματος άρδευσης και απορροής με σκοπό την μέτρηση των τιμών του pH, της EC (dS m^{-1}) και της θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$). Οι λήψεις των μετρήσεων πραγματοποιούνταν μια φορά την εβδομάδα και οι μέσες τιμές καθ' όλη τη καλλιεργητική περίοδο παρουσιάζονται στους Πίνακες 1-3. Για την διεξαγωγή των αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε ένα φορητό, αδιάβροχο όργανο μέτρησης (Combo by Hanna, USA), όπως φαίνεται στην Εικόνα 11.



Εικόνα 11. Μέτρηση pH, EC και θερμοκρασίας του διαλύματος άρδευσης και απορροής της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας καλλιέργειας με ειδικό φορητό, αδιάβροχο όργανο (Combo by Hanna, USA)

Προκειμένου να διασφαλιστεί η ακρίβεια στη λήψη των αποτελεσμάτων, κρίθηκε απαραίτητη η βαθμονόμηση του οργάνου με ρυθμιστικά διαλύματα κάθε φορά πριν χρησιμοποιηθεί.

Πίνακας 1. Μέση τιμή pH του διαλύματος άρδευσης και απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας για κάθε μήνα της καλλιεργητικής περιόδου.

Μήνας	Τομάτα (T ₀)		Τοματίνι (T ₁)		Τοματίνι (T ₂)	
	Άρδευση	Απορροή	Άρδευση	Απορροή	Άρδευση	Απορροή
Μάρτιος	5,65 ± 0,14	7,30 ± 0,18	5,90 ± 0,04	6,88 ± 0,20	5,30 ± 0,03	6,40 ± 0,26
Απρίλιος	5,59 ± 0,03	7,35 ± 0,16	5,90 ± 0,05	7,14 ± 0,16	5,40 ± 0,07	7,28 ± 0,06
Μάιος	5,68 ± 0,03	6,00 ± 0,11	5,72 ± 0,02	6,14 ± 0,12	6,01 ± 0,02	7,41 ± 0,11
Ιούνιος	5,58 ± 0,05	5,90 ± 0,07	5,71 ± 0,02	5,65 ± 0,16	6,40 ± 0,02	7,74 ± 0,18
Ιούλιος	5,64 ± 0,02	5,81 ± 0,04	5,65 ± 0,02	5,81 ± 0,17	6,24 ± 0,01	7,47 ± 0,27

Πίνακας 2. Μέση τιμή EC (dS m⁻¹) του διαλύματος άρδευσης και απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας για κάθε μήνα της καλλιεργητικής περιόδου.

Μήνας	Τομάτα (T ₀)		Τοματίνι (T ₁)		Τοματίνι (T ₂)	
	Άρδευση	Απορροή	Άρδευση	Απορροή	Άρδευση	Απορροή
Μάρτιος	2,55 ± 0,04	3,36 ± 0,22	2,60 ± 0,01	2,90 ± 0,14	2,50 ± 0,03	2,69 ± 0,07
Απρίλιος	2,53 ± 0,03	3,43 ± 0,14	2,50 ± 0,05	3,50 ± 0,13	2,80 ± 0,06	4,01 ± 0,12
Μάιος	2,60 ± 0,02	3,74 ± 0,22	2,60 ± 0,03	4,18 ± 0,34	2,47 ± 0,03	4,01 ± 0,43
Ιούνιος	2,68 ± 0,02	4,37 ± 0,12	2,59 ± 0,02	4,16 ± 0,45	2,30 ± 0,02	3,98 ± 0,18
Ιούλιος	2,73 ± 0,02	4,23 ± 0,10	2,53 ± 0,01	3,10 ± 0,07	2,21 ± 0,01	2,78 ± 0,17

Πίνακας 3. Μέση τιμή θερμοκρασίας (°C) του διαλύματος άρδευσης και απορροής της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας καλλιέργειας για κάθε μήνα της καλλιεργητικής περιόδου.

Μήνας	Τομάτα (T ₀)		Τοματίνι (T ₁)		Τοματίνι (T ₂)	
	Άρδευση	Απορροή	Άρδευση	Απορροή	Άρδευση	Απορροή
Μάρτιος	25,0 ± 0,36	26,9 ± 0,38	26,2 ± 0,19	27,2 ± 0,49	25,6 ± 0,25	26,5 ± 0,31
Απρίλιος	20,8 ± 0,19	20,5 ± 0,43	21,5 ± 0,20	21,1 ± 0,59	21,7 ± 0,26	20,6 ± 0,30
Μάιος	21,6 ± 0,09	20,8 ± 0,10	21,9 ± 0,08	21,6 ± 0,41	22,0 ± 0,15	21,6 ± 0,21
Ιούνιος	25,7 ± 0,13	24,9 ± 0,15	25,5 ± 0,18	25,2 ± 0,30	26,1 ± 0,07	25,3 ± 0,27
Ιούλιος	24,5 ± 0,15	24,1 ± 0,09	24,1 ± 0,15	24,6 ± 0,26	25,3 ± 0,35	24,5 ± 0,18

2.6.3. Μετρήσεις νιτρικών ιόντων

Η μέτρηση των νιτρικών ιόντων των διαλυμάτων άρδευσης και απορροής από τις δύο καλλιέργειες πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός φορητού αναλυτή νιτρικών ιόντων (NOx-monitrix Mobile, Aquamonitrix Ltd., Tullow, Carlow, Ιρλανδία). Ο αναλυτής (Εικόνα 12) συνδυάζει ταχεία ιοντική χρωματογραφία με χαμηλές απαιτήσεις ισχύος ανίχνευσης UV-LED, παρέχοντας μετρήσεις εργαστηριακής ακρίβειας των NO₃⁻ σε υδάτινα περιβάλλοντα. Ο αναλυτής παρουσιάζει ακρίβεια 99% σε γλυκό νερό και 95% σε λύματα και αλμυρό νερό, με ακρίβεια που φτάνει έως και 95%.



Εικόνα 12. Φορητός αναλυτής νιτρικών ιόντων (NO_x-monitrix Mobile, Aquamonitrix Ltd., Tullow, Carlow, Ιρλανδία).

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι μέσες συγκεντρώσεις των νιτρικών του διαλύματος άρδευσης και απορροής της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας καλλιέργειας για κάθε μήνα της καλλιεργητικής περιόδου.

Πίνακας 4. Μέση τιμή NO₃⁻ (ppm) του διαλύματος άρδευσης και απορροής της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας καλλιέργειας για κάθε μήνα της καλλιεργητικής περιόδου.

Μήνας	Τομάτα (T ₀)		Τοματίνι (T ₁)		Τοματίνι (T ₂)	
	Άρδευση	Απορροή	Άρδευση	Απορροή	Άρδευση	Απορροή
Μάρτιος	841,1 ± 9,5	844,5 ± 126,2	837,2 ± 4,3	681,7 ± 73,2	857,1 ± 1,8	791,1 ± 97,8
Απρίλιος	784,5 ± 7,0	793,5 ± 34,6	794,3 ± 7,0	907,4 ± 35,0	831,6 ± 6,0	885,8 ± 22,1
Μάιος	893,7 ± 9,3	1349,5 ± 597	905,0 ± 4,0	1342,0 ± 107,9	872,5 ± 9,4	1206,7 ± 88,9
Ιούνιος	920,2 ± 12,1	1537,8 ± 25,4	912,0 ± 21,4	1434,0 ± 130,2	811,7 ± 9,0	1297,3 ± 50,4
Ιούλιος	912,1 ± 8,9	1402,4 ± 25,1	910,8 ± 30,3	1054,5 ± 30,1	748,2 ± 2,6	876,53 ± 32,0

2.7. Υπολογισμοί

2.7.1. Υπολογισμός της κατανάλωσης νερού και λιπασμάτων

Ο συνολικός όγκος της άρδευσης κάθε καλλιέργειας υπολογίστηκε αθροίζοντας τις ποσότητες νερού που εφαρμόστηκαν σε κάθε κύκλο άρδευσης (L) και διαιρώντας με την συνολική καλλιεργούμενη έκταση που του αντιστοιχούσε (m²). Ο συνολικός όγκος απορροής κάθε καλλιέργειας υπολογίστηκε ως το άθροισμα του όγκου της απορροής ύστερα από κάθε κύκλο άρδευσης καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου και της διαίρεσής του με την αντίστοιχη συνολική έκταση. Ομοίως, η συνολική κατανάλωση λιπασμάτων ορίστηκε ως ο λόγος της κατανάλωσης του συνολικού όγκου

των μητρικών διαλυμάτων για την εκάστοτε καλλιέργεια και μεταχείριση προς την συνολική καλλιεργούμενη έκταση (m^2).

2.7.2. Υπολογισμός αποτελεσματικότητας χρήσης νερού και λιπασμάτων

Η αποτελεσματικότητα χρήσης νερού (WUE, kg m^{-3}) υπολογίστηκε μέσω της διαίρεσης της συνολικής παραγωγής (kg m^{-2}) κάθε καλλιέργειας και μεταχείρισης προς την συνολική ποσότητα του θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας (L m^{-2}). Ομοίως, η αποτελεσματικότητα χρήσης λιπασμάτων (FUE, kg kg^{-1}) υπολογίστηκε μέσω της διαίρεσης της συνολικής παραγωγής (kg m^{-2}) κάθε καλλιέργειας και μεταχείρισης προς την συνολική ποσότητα λιπασμάτων (kg m^{-2}) που καταναλώθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος.

2.8. Στατιστική ανάλυση

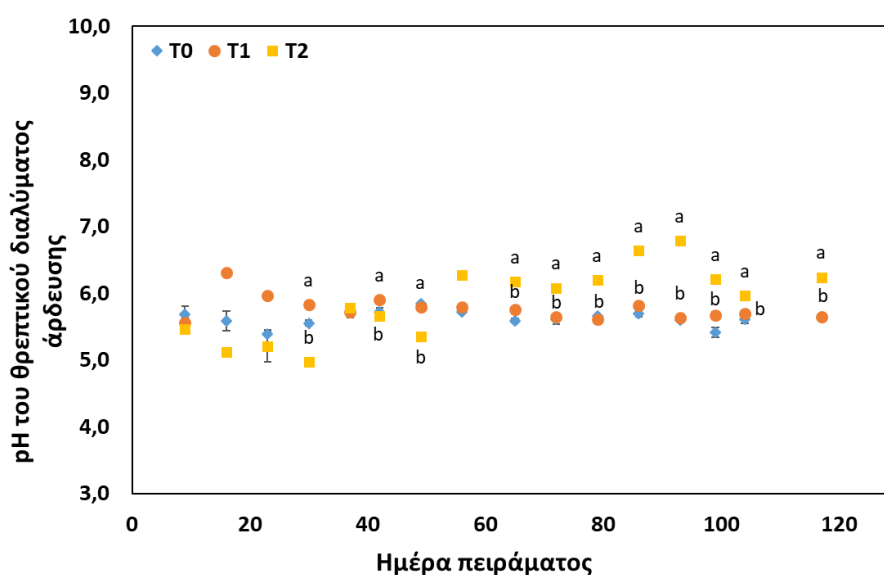
Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων του πειράματος πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο one-way ANOVA, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($p < 0,05$), μέσω του λογισμικού SPSS (Statistical Package for the Social Sciences, IMB, USA). Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε πολλαπλή σύγκριση των μέσων όρων χρησιμοποιώντας το τεστ LSD σε επίπεδο σημαντικότητας 5%. Στην περίπτωση που τα δεδομένα δεν ακολουθούσαν κανονική κατανομή, εφαρμόστηκε ένα μη παραμετρικό τεστ Kruskal–Wallis ($p \leq 0,05$). Αναφέρονται επίσης οι μέσες τιμές και τα τυπικά σφάλματα ($\pm \text{SE}$) των μετρημένων παραμέτρων.

3. Αποτελέσματα

3.1. pH του θρεπτικού διαλύματος άρδευσης και απορροής

3.1.1. pH του θρεπτικού διαλύματος άρδευσης

Οι τιμές του pH αποτελούν βασικούς δείκτες για την εξασφάλιση της ποιότητας του θρεπτικού διαλύματος. Στο παρόν πείραμα η τιμή του pH του διαλύματος άρδευσης διατηρήθηκε σχετικά σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου για τις μεταχειρίσεις της τομάτας (T_0) και του τοματινιού, για τη μεταχείριση του μάρτυρα (T_1), με μέση τιμή 5,64 και 5,79, αντίστοιχα (Διάγραμμα 1).



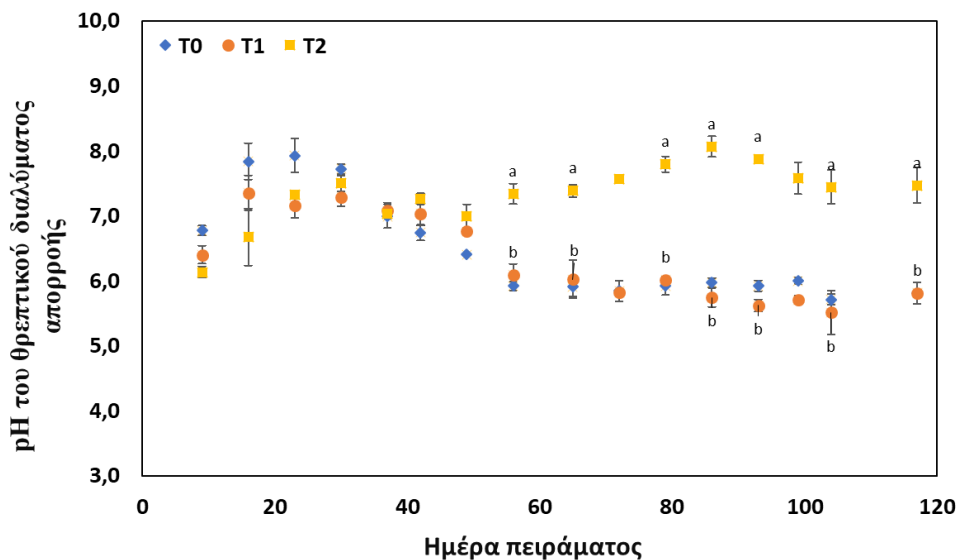
Διάγραμμα 1. Μέση μεταβολή της τιμής του pH του διαλύματος άρδευσης της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T_0) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T_1) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T_2) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Με τα *a* και *b* σημειώνονται οι στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων T_1 και T_2 .

Ως αποτέλεσμα των προκαθορισμένων τιμών ρύθμισης του pH του θρεπτικού διαλύματος άρδευσης, η T_0 και T_1 κυμάνθηκαν σε παρόμοιες τιμές pH στη διάρκεια του πειράματος. Πιο συγκεκριμένα, το pH της άρδευσης της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T_0) διατηρήθηκε σχετικά σταθερό με τη χαμηλότερη τιμή να φτάνει το 5,4. Ομοίως, η μεταχείριση T_1 παρουσίασε μικρές διακυμάνσεις στο pH του διαλύματος άρδευσης με τη μικρότερη να ξεκινάει από το 5,6 και την μέγιστη να φτάνει τα 6,3. Αντιθέτως, στη διαδοχική μεταχείριση του τοματινιού T_2 παρουσιάστηκαν μεγαλύτερες διακυμάνσεις και στατιστικές διαφορές ($p < 0,05$) συγκριτικά με την T_1 μεταχείριση, με τη μέση τιμή του pH να σημειώνεται στο 5,85. Η μεγαλύτερη τιμή pH που καταγράφηκε ανήκει στην μεταχείριση T_2 , η οποία

έφτασε το 6,78 την ημέρα 93 του πειράματος, ενώ η χαμηλότερη εντοπίστηκε και πάλι στην ίδια μεταχείριση με τιμή 4,97 την ημέρα 30.

3.1.2. pH του θρεπτικού διαλύματος απορροής

Η T_0 από την αρχή του πειράματος μέχρι και τη μέρα 23 ακολούθησε μια ανοδική πορεία με την υψηλότερη τιμή pH να φτάνει την 7,93 που καταγράφηκε την ημέρα 23 του πειράματος, ενώ από την ημέρα 30 μέχρι και το τέλος της πειραματικής περιόδου οι τιμές της μειώνονταν (με μικρές διακυμάνσεις), με την ελάχιστη να πέφτει στη τιμή 5,71. Η μέση τιμή της T_0 καταγράφηκε 6,56.



Διάγραμμα 2. Μέση μεταβολή της τιμής του pH του διαλύματος απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T_0) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T_1) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T_2) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Με τα *a* και *b* σημειώνονται οι στατιστικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων T_1 και T_2 .

Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων του pH του θρεπτικού διαλύματος απορροής σημείωσε σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των μεταχειρίσεων T_1 και T_2 καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2. Η μεταχείριση T_1 παρουσίασε καθοδική πορεία στις τιμές του pH της, χαράζοντας ωστόσο αρκετές διακυμάνσεις. Η χαμηλότερη τιμή της, η οποία ήταν η μικρότερη τιμή μεταξύ των μεταχειρίσεων, ήταν 5,51 την ημέρα 104, ενώ η μέγιστη τιμή σημειώθηκε στο 7,35 την ημέρα 16 του πειράματος και η μέση τιμή της καταγράφηκε ως 6,44. Οι τιμές της μεταχείρισης T_2 από την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας μέχρι την ημέρα 30 αυξάνονταν σταδιακά, ενώ στη συνέχεια παρατηρήθηκε αυξομείωση των τιμών με τη μεγαλύτερη να φτάνει στο 8,07, η οποία αποτέλεσε και τη μέγιστη τιμή

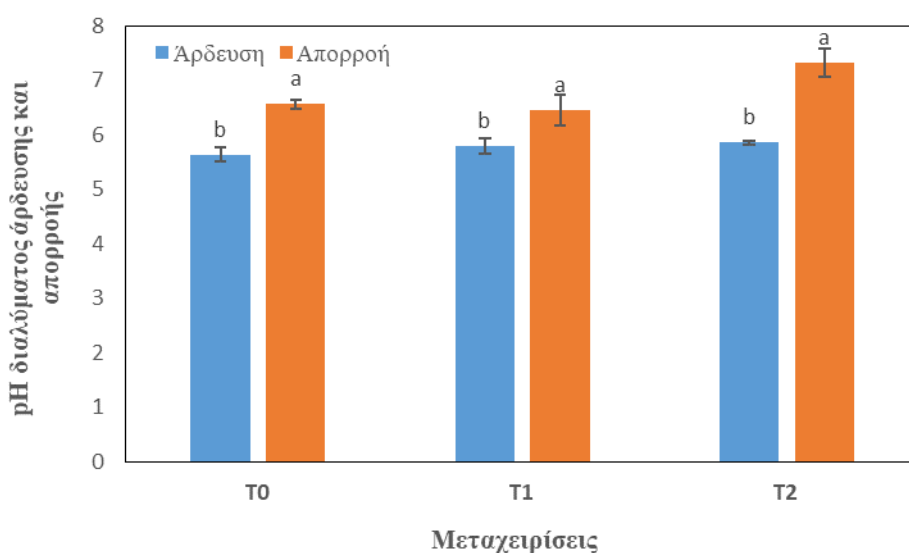
όλων των μεταχειρίσεων. Η ελάχιστη τιμή της συγκεκριμένης μεταχείριση σημειώθηκε την πρώτη μέρα του πειράματος με αριθμό 6,14, ενώ η μέση με αριθμό 7,32.

Η μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των τιμών του pH απορροής παρατηρήθηκε την ημέρα 93 στις μεταχειρίσεις T_1 και T_2 , με την T_2 να έχει 40% μεγαλύτερη τιμή ($p < 0,05$).

Όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 2, ανάμεσα στις μεταχειρίσεις T_1 και T_2 διακρίνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές από τη μέση του πειράματος μέχρι το τέλος. Παρατηρώντας την μέρα έναρξης των μετρήσεων της μεταχείρισης T_1 και την τελευταία μέρα του πειράματος φαίνεται ότι η τιμή του pH μειώθηκε κατά 9,2%, ενώ για την μεταχείριση T_2 υπολογίζεται ότι η τιμή του pH της πρώτης μέτρησης αυξήθηκε σε σχέση με την τελική κατά 21,7%.

3.1.3. Μεταβολή της τιμής pH κατά τη καλλιεργητική περίοδο

Στο Διάγραμμα 3 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές του pH τόσο για το διάλυμα άρδευσης, όσο και για το διάλυμα απορροής σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Η μέση τιμή του pH του διαλύματος απορροής των T_0 , T_1 και T_2 καταγράφηκε σταθερά υψηλότερη συγκριτικά με τη μέση τιμή του διαλύματος άρδευσης.



Διάγραμμα 3. Μέση μεταβολή της τιμής του pH του διαλύματος άρδευσης και απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T_0) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T_1) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T_2) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

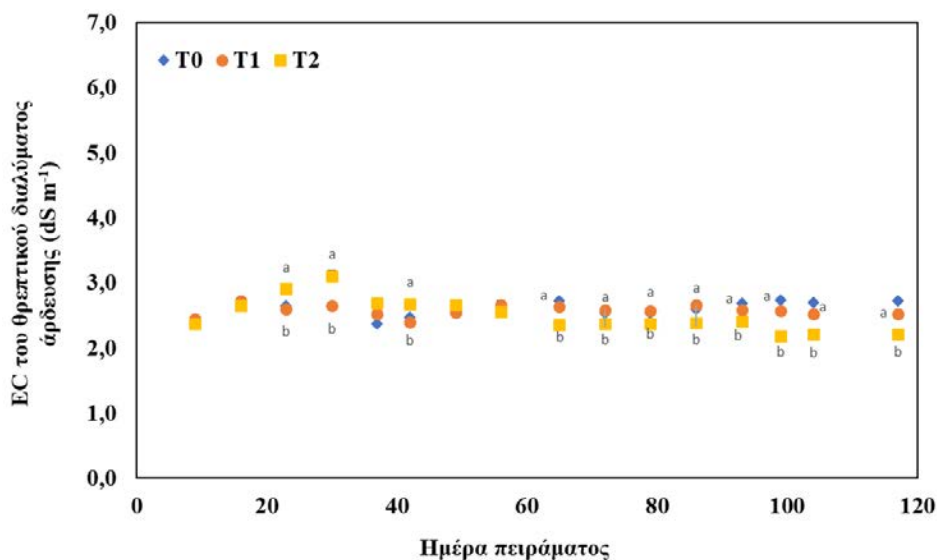
Συγκεκριμένα για την T_0 , η μέση τιμή pH της απορροής υπολογίστηκε ότι είναι μεγαλύτερη από εκείνη της άρδευσης κατά 16,5%, για τη μεταχείριση T_1 φάνηκε ότι η απορροή υπερείχε κατά 11,2%, ενώ για την T_2 κατά 25,1%, η οποία σημείωσε και

την μεγαλύτερη απόκλιση. Τα αποτελέσματα αυτά διαφέρουν στατιστικά σημαντικά μεταξύ τους ($p < 0,05$).

3.2. EC του θρεπτικού διαλύματος άρδευσης και απορροής

3.2.1. EC του θρεπτικού διαλύματος άρδευσης

Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων της EC του θρεπτικού διαλύματος άρδευσης σημείωσε ορισμένες διαφοροποιήσεις μεταξύ των μεταχειρίσεων (T_1 , T_2) κατά την εξέλιξη του πειράματος, με αρκετές χρονικές στιγμές να εμφανίζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4. Οι μέσες τιμές των T_0 , T_1 και T_2 ήταν 2,59, 2,58 και 2,55 dS m⁻¹, αντίστοιχα. Καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των T_0 , T_1 και T_2 παρέμειναν μεταξύ 2,0 και 3,0 dS m⁻¹, με μοναδική εξαίρεση να αποτελεί η μεταχείριση T_2 , η οποία την ημέρα 30 του πειράματος σημείωσε τη τιμή 3,11 dS m⁻¹. Το εύρος αυτό καταδεικνύει ότι το θρεπτικό διάλυμα διατηρήθηκε εντός των αποδεκτών ορίων κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.



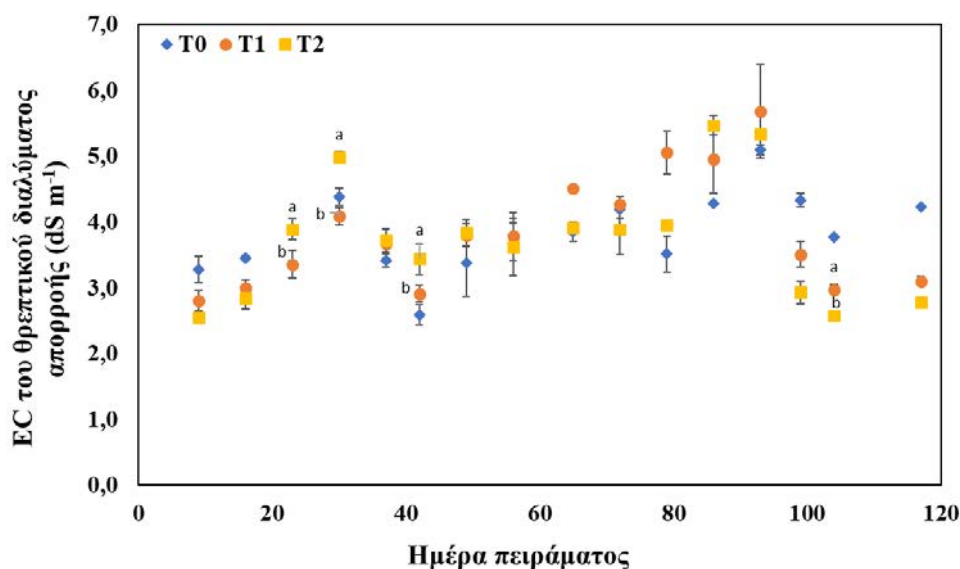
Διάγραμμα 4. Μέση μεταβολή της τιμής της EC (dS m⁻¹) του διαλύματος άρδευσης της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T_0) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T_1) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T_2) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Με τα *a* και *b* σημειώνονται οι στατιστικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων T_1 και T_2 .

Η πορεία της EC της T_0 ήταν σχετικά σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, κυμαινόμενη στις τιμές 2,37 dS m⁻¹ (ημέρα 37) και 2,74 dS m⁻¹ (ημέρα 99). Στη μεταχείριση T_1 της δευτερεύουσας καλλιέργειας, οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ακολούθησαν επίσης μια σταθερή πορεία, με την πλειοψηφία των

τιμών της να κυμαίνονται κοντά στις τιμές της T_0 . Η υψηλότερη τιμή της καταγράφηκε την ημέρα 16 του πειράματος ως $2,72 \text{ dS m}^{-1}$, ενώ η χαμηλότερη την ημέρα 42 ως $2,39 \text{ dS m}^{-1}$. Η μεταχείριση T_2 , παρουσίασε διακυμάνσεις, με τις τιμές της να κυμαίνονται από $2,19 \text{ dS m}^{-1}$ (ημέρα 99), η οποία αποτέλεσε τη χαμηλότερη τιμή όλων των μεταχειρίσεων, έως $3,11 \text{ dS m}^{-1}$ (ημέρα 30). Οι τιμές της T_2 , ωστόσο, οι οποίες αναμένονταν να αυξηθούν λόγω της ανακύκλωσης του θρεπτικού διαλύματος απορροής της T_0 , διατηρήθηκαν στα επιθυμητά όρια και μάλιστα μειώθηκαν, γεγονός που οφείλεται στην κατάλληλη ρύθμισή των NO_3^- από τον ιοντοεκλεκτικό αισθητήρα. Από την ημέρα 56 του πειράματος μέχρι και το τέλος της πειραματικής διαδικασίας, οι τιμές των μεταχειρίσεων διέφεραν στατιστικά σημαντικά μεταξύ τους, με τη μέγιστη ποσοστιαία διαφορά να είναι 17,8% και να εντοπίζεται την ημέρα 30.

3.2.2. EC του θρεπτικού διαλύματος απορροής

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος απορροής παρουσίασε αρκετές διακυμάνσεις, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 5, ενώ εντοπίστηκαν ορισμένες στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων T_1 και T_2 . Οι μέσες τιμές των T_0 , T_1 και T_2 ήταν $3,78$, $3,95$ και $3,88 \text{ dS m}^{-1}$, αντίστοιχα. Η EC της απορροής της T_0 κατέγραψε αρκετές αυξομειώσεις στις τιμές της με την μέγιστη να φτάνει το $5,09 \text{ dS m}^{-1}$ την ημέρα 93 του πειράματος και την ελάχιστη να παρουσιάζεται την ημέρα 42 με τιμή $2,58 \text{ dS m}^{-1}$.



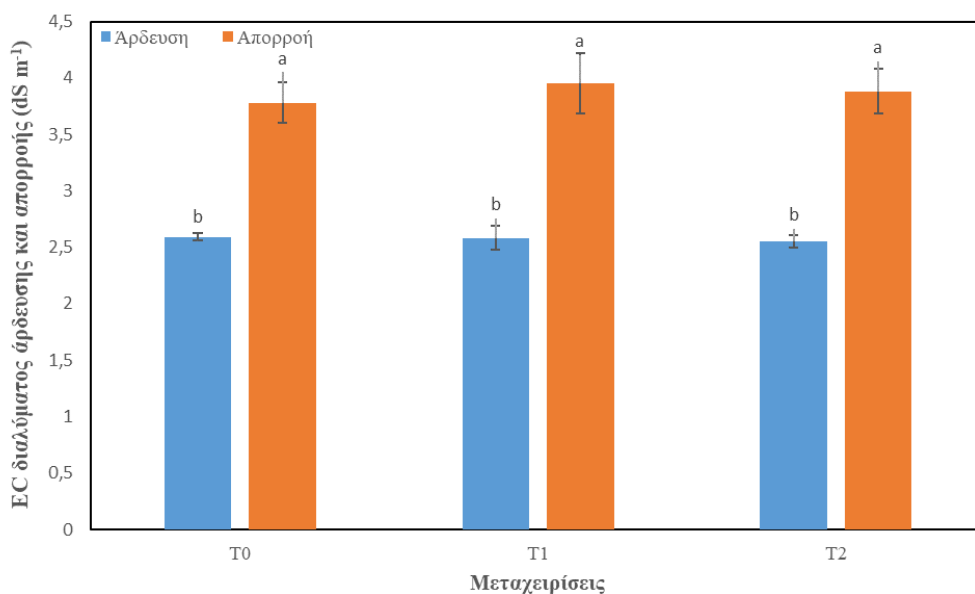
Διάγραμμα 5. Μέση μεταβολή της τιμής της EC (dS m^{-1}) του διαλύματος απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T_0) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T_1) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T_2) της

δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Με τα *a* και *b* σημειώνονται οι στατιστικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων T_1 και T_2 .

Η μέγιστη τιμή που καταγράφηκε για τη μεταχείριση T_1 ήταν $5,68 \text{ dS m}^{-1}$ την ημέρα 93, ενώ η ελάχιστη σημειώθηκε την πρώτη μέρα του πειράματος με τιμή $2,80 \text{ dS m}^{-1}$. Η T_2 εμφάνισε την πιο έντονη διακύμανση με το εύρος των τιμών της να κυμαίνεται από $2,55$ έως $5,47 \text{ dS m}^{-1}$. Κατά τη διάρκεια του πειράματος παρατηρήθηκαν λίγες ημέρες κατά τις οποίες οι μεταχειρίσεις εμφάνισαν στατιστικά σημαντικές διαφορές. Συγκρίνοντας τις δύο μεταχειρίσεις παρατηρούμε ότι τις αρχικές μέρες το πειράματος (από την 23 μέχρι την 49) η T_2 έχει υψηλότερες τιμές, ενώ από την μέρα 56 μέχρι την τελευταία (με μία εξαίρεση την ημέρα 86) η T_1 αυξάνει αρκετά τις τιμές της σε σχέση με την T_2 . Η μέγιστη ποσοστιαία στατιστικά σημαντική διαφορά εντοπίστηκε την ημέρα 30 με ποσοστό 18,87%.

3.2.3. Μεταβολή της τιμής της EC κατά τη καλλιεργητική περίοδο

Στο Διάγραμμα 6 παρουσιάζονται οι τιμές της EC τόσο για το διάλυμα άρδευσης, όσο και για το διάλυμα απορροής σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Η μέση τιμή της EC του διαλύματος απορροής των T_0 , T_1 και T_2 καταγράφηκε σταθερά υψηλότερη συγκριτικά με τη μέση τιμή του διαλύματος άρδευσης.



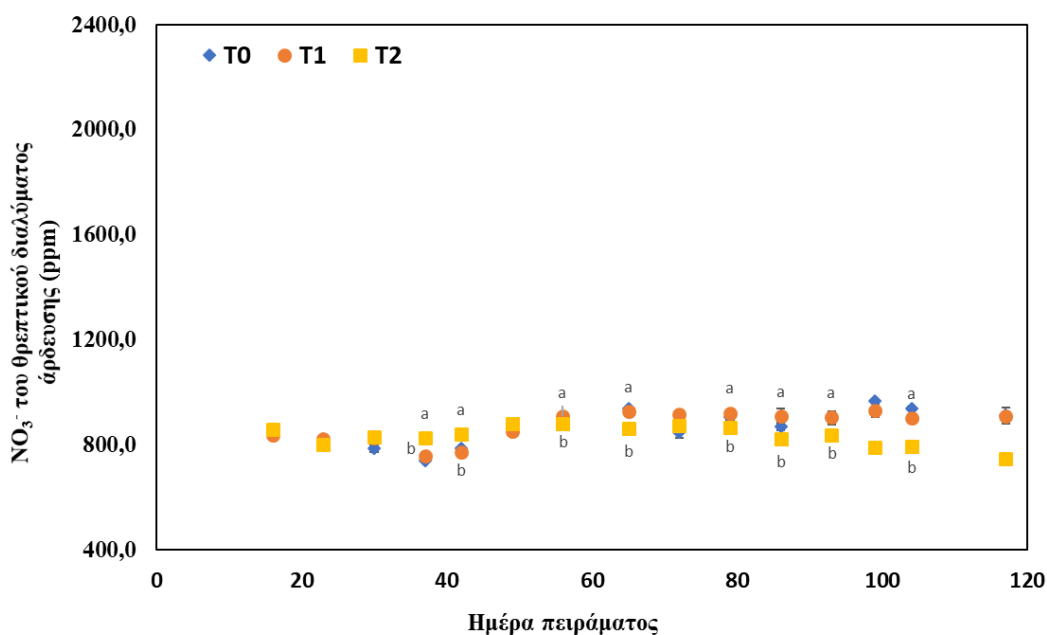
Διάγραμμα 6. Μέση μεταβολή της τιμής του EC (dS m^{-1}) του διαλύματος άρδευσης και απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T_0) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T_1) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T_2) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής

Συγκεκριμένα για την T_0 , η μέση τιμή EC της απορροής υπολογίστηκε ότι είναι μεγαλύτερη από εκείνη της άρδευσης κατά 46%, ενώ για τη μεταχείριση T_1 και T_2 κατά 53,1%, και 52,2%, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά διαφέρουν στατιστικά σημαντικά μεταξύ τους ($p < 0.05$). Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 6, η μέση τιμή της EC της άρδευσης της T_2 είναι μειωμένη κατά 32,5% σε σχέση με την απορροή της T_0 . Το αναμενόμενο θα ήταν η EC της άρδευσης της T_2 να είναι ίση με εκείνη της απορροής της T_0 , καθώς αρδεύεται με το θρεπτικό διάλυμά της. Ωστόσο, λόγω της κατάλληλης επεξεργασίας στον ιοντοεκλεκτικό αισθητήρα η EC προσαρμόζεται στις επιθυμητές τιμές.

3.3. NO_3^- του θρεπτικού διαλύματος της άρδευσης και απορροής

3.3.1. NO_3^- του θρεπτικού διαλύματος της άρδευσης

Η ανάλυση των συγκεντρώσεων των νιτρικών ιόντων στο θρεπτικό διάλυμα άρδευσης συντελεί κρίσιμο δείκτη για την εξασφάλιση ορθής θρέψης των καλλιεργειών. Παρατηρώντας το Διάγραμμα 7, συμπεραίνεται ότι και οι δυο μεταχειρίσεις διακρίθηκαν από μικρές διακυμάνσεις καθ' όλη τη καλλιεργητική περίοδο, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν υπήρξαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.



Διάγραμμα 7. Μέση μεταβολή της τιμής των NO_3^- (ppm) του διαλύματος άρδευσης της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T_0) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T_1) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T_2) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Με τα a και b σημειώνονται οι στατιστικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων T_1 και T_2 .

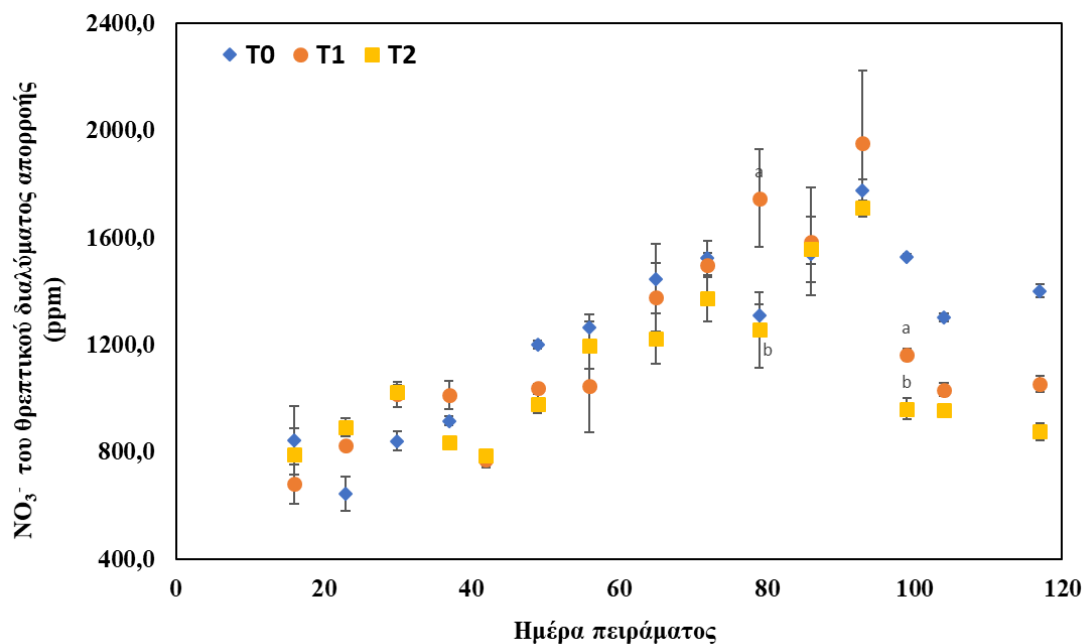
Οι συγκεντρώσεις NO_3^- της T_0 ξεκίνησαν στα 841,13 ppm και κατά τη διάρκεια των μετρήσεων παρουσίασαν μεταβολές στις τιμές τους, καταλήγοντας στα 912,07 ppm την τελευταία ημέρα. Η μέγιστη τιμή της καταγράφηκε την ημέρα 99 του πειράματος με τιμή 968,23 ppm, ενώ η ελάχιστη την ημέρα 37 με τιμή 739,50 ppm. Η μέση τιμή της T_0 ήταν 860,79 ppm.

Οι τιμές της T_1 κυμάνθηκαν από 757,07 ppm (ημέρα 37) έως και 932,59 ppm (ημέρα 99). Οι διακυμάνσεις παρατηρήθηκαν εντονότερες στη μέση του πειράματος. Ως μέση τιμή της T_1 καταγράφηκε 868,23 ppm.

Η μεταχείριση T_2 είχε φθίνουσα πορεία σε αντίθεση με τις τιμές που αναμένονταν. Εξαιτίας της ανακύκλωσης των απορροών της πρωτεύουσας καλλιέργειας και της επαναχρησιμοποίησής τους για την άρδευση της μεταχείρισης T_2 , οι τιμές των τιμών NO_3^- της T_2 θα έπρεπε να παρουσιάζουν αύξηση, αλλά λόγω της ρύθμισης και του συνεχούς ελέγχου με τον ιοντοεκλεκτικό αισθητήρα τα επίπεδα τους διατηρήθηκαν σταθερά και μάλιστα μειώθηκαν. Η μεγαλύτερη τιμή που σημείωσε η T_2 ήταν 882,25 ppm την ημέρα 56, ενώ η μικρότερη καταγράφηκε την τελευταία μέρα του πειράματος ως 748,20 ppm. Τις πρώτες μέρες του πειράματος (μέχρι την 30), όπως επίσης τις ημέρες 49, 72, 99 και 117 δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των τιμών των δειγμάτων ($p > 0.05$).

3.3.2. NO_3^- του θρεπτικού διαλύματος της απορροής

Στο Διάγραμμα 8 εξετάζονται οι μεταβολές στις τιμές των NO_3^- του θρεπτικού διαλύματος απορροής των δύο καλλιεργειών. Γενικά, είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι οι μεταχειρίσεις διαφοροποιούνται έντονα ως προς τις τιμές τους ειδικά προς το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου (από την ημέρα 79 μέχρι και την 117). Οι μέσες τιμές των NO_3^- στις απορροές των T_0 , T_1 και T_2 ήταν 1201,14, 1209,62 και 1123,26 ppm, αντίστοιχα. Οι διακυμάνσεις που παρουσιάζουν είναι μεγάλες. Συγκεκριμένα, στην T_0 σημειώνεται η χαμηλότερη τιμή την ημέρα 23 του πειράματος (645,35 ppm), ενώ η υψηλότερη τιμή της είναι 1778,12 ppm την ημέρα 93.

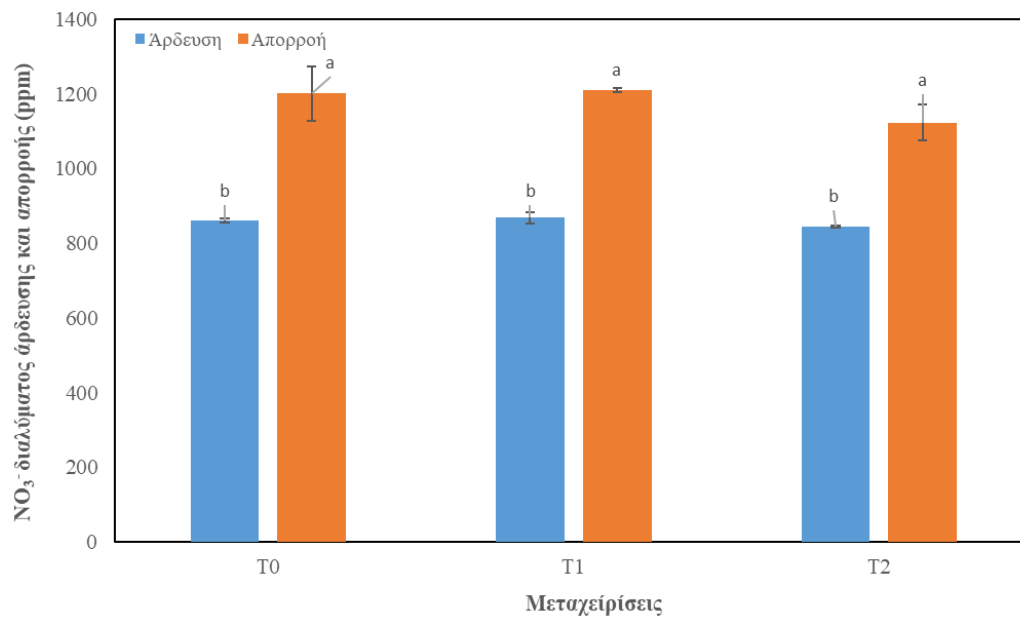


Διάγραμμα 8. Μέση μεταβολή της τιμής των NO_3^- (ppm) του διαλύματος απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T_0) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T_1) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T_2) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Με τα *a* και *b* σημειώνονται οι στατιστικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων T_1 και T_2 .

Σχετικά με την T_1 φαίνεται ότι η πορεία της είναι ανοδική (με δύο εξαιρέσεις την ημέρα 42 και 86) μέχρι την ημέρα 99 στην οποία παρατηρείται απότομη μείωση της τιμής των NO_3^- . Οι τιμές της κυμάνθηκαν από 681,73 ppm έως 1952,69 ppm. Στη μεταχείριση T_2 , οι τιμές κυμάνθηκαν από το 786,75 ppm έως 1713,23 ppm. Συγκρίνοντας την T_1 και την T_2 παρατηρούνται στατιστικά σημαντικές διαφορές μόνο τις ημέρες 79 και 99, με την μέγιστη απόκλιση να εντοπίζεται στη πρώτη με την T_1 να είναι μεγαλύτερη της T_2 κατά 39%. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην υψηλότερη κατανάλωση νερού, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 10.

3.3.3. Μεταβολή της τιμής των NO_3^- κατά τη καλλιεργητική περίοδο

Στο Διάγραμμα 9 παρουσιάζονται οι τιμές των NO_3^- τόσο στο διάλυμα άρδευσης, όσο και στο διάλυμα απορροής των δυο καλλιεργειών. Όπως ήταν αναμενόμενο η μέση τιμή των NO_3^- της άρδευσης και στις δύο καλλιέργειες ήταν σημαντικά μικρότερη από εκείνη της απορροής.

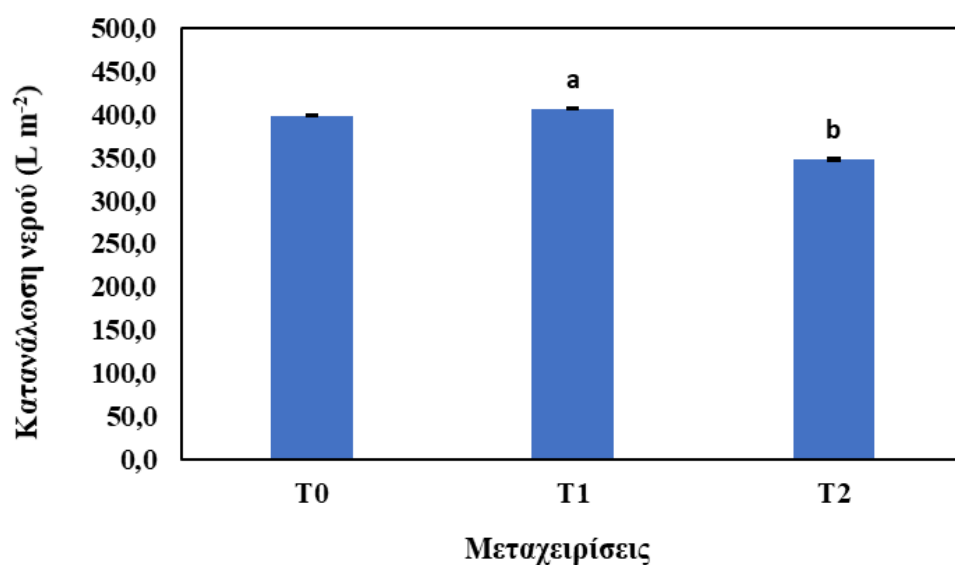


Διάγραμμα 9. Μέση μεταβολή της τιμής των NO_3^- (ppm) του διαλύματος άρδευσης και απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T_0) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T_1) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T_2) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

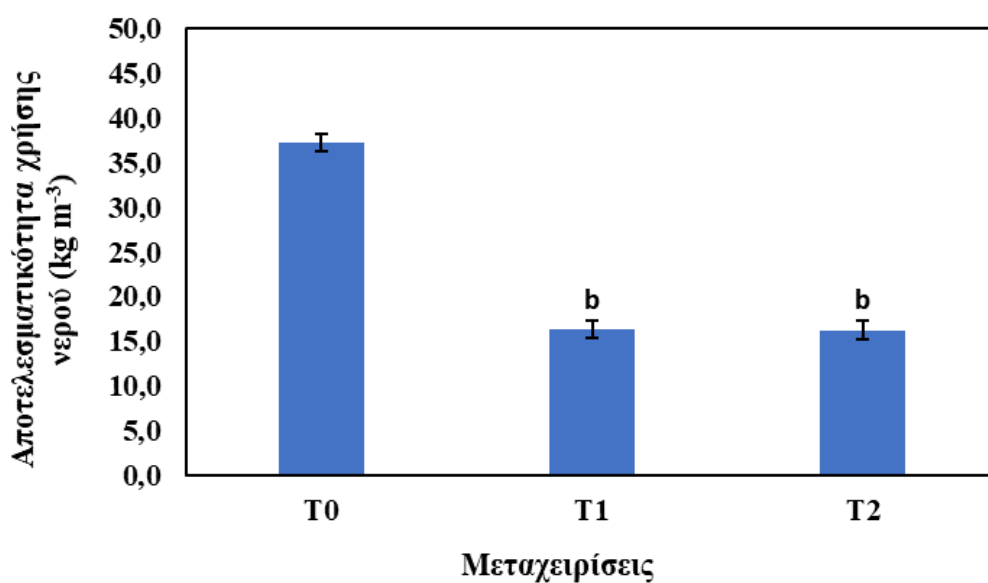
Η μέση τιμή των NO_3^- του διαλύματος απορροής των T_0 , T_1 και T_2 παρουσιάστηκε ως σταθερά υψηλότερη συγκριτικά με τη μέση τιμή του διαλύματος άρδευσης. Συγκεκριμένα για την T_0 , η μέση τιμή των NO_3^- της απορροής υπολογίστηκε ότι είναι μεγαλύτερη κατά 39,5% σε σχέση με αυτή της άρδευσης. Στη μεταχείριση T_1 , η αντίστοιχη αύξηση ήταν 39,3%, ενώ στη μεταχείριση T_2 , 33,1%. Οι διαφορές αυτές κρίθηκαν στατιστικά σημαντικές ($p < 0,05$).

3.4. Κατανάλωση και αποτελεσματικότητα χρήσης νερού

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 10 η κατανάλωση νερού της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T_0) ήταν ίση με $398,4 \text{ L m}^{-2}$. Η σύγκριση των μεταχειρίσεων T_1 και T_2 οδήγησε σε στατιστικά σημαντικές αποκλίσεις με την πρώτη να σημειώνει μια συνολική κατανάλωση ίση με $406,7 \text{ L m}^{-2}$, ενώ η T_2 $348,0 \text{ L m}^{-2}$. Η μείωση που παρατηρήθηκε στη μεταχείριση T_2 αντιστοιχεί σε ποσοστό περίπου 14% σε σχέση με την T_1 .



Διάγραμμα 10. Συνολική κατανάλωση νερού (L m⁻²) της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T₀) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T₁) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T₂) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Με τα a και b σημειώνονται οι στατιστικά σημαντικές διαφορές.



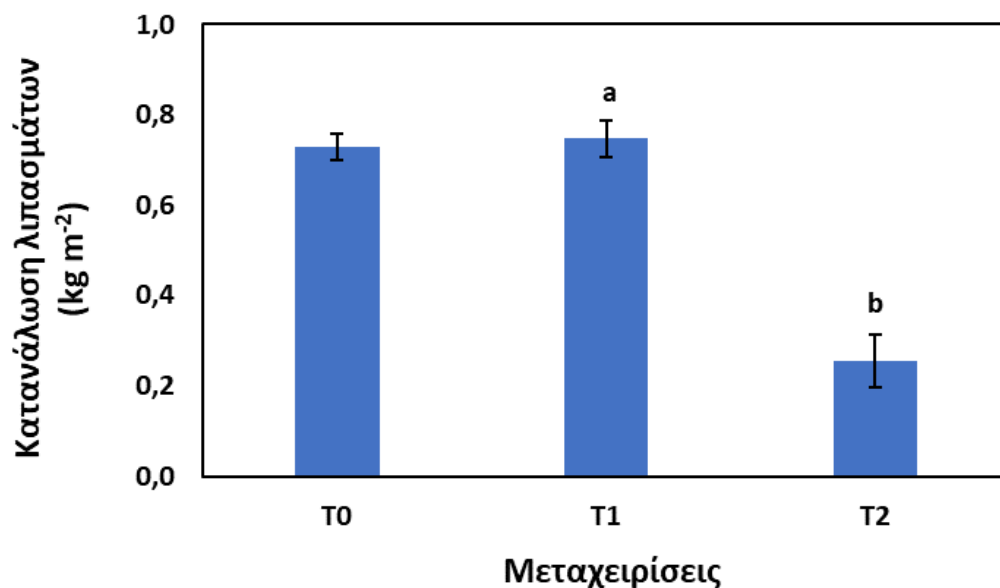
Διάγραμμα 11. Αποτελεσματικότητα χρήσης νερού (kg m⁻³) της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T₀) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T₁) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T₂) της δευτερεύουσας καλλιέργειας. Με τα a και b σημειώνονται οι στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Για την εκπόνηση της εργασίας λήφθηκε υπόψιν η αποτελεσματικότητα χρήσης νερού με σκοπό να γίνει αξιολόγηση της παραγωγής της καλλιέργειας σε σχέση με τη χρήση νερού η οποία παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 11. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα, η αποτελεσματικότητα χρήσης νερού των μεταχειρίσεων T₁ και T₂ δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές. Το αποτέλεσμα υποδηλώνει ότι και οι

δύο μεταχειρίσεις αξιοποίησαν το θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας αποδοτικά, παράγοντας παρόμοια βιομάζα ανά μονάδα παροχής θρεπτικού διαλύματος.

3.5. Κατανάλωση και αποτελεσματικότητα χρήσης λιπασμάτων

Η αξιολόγηση της κατανάλωσης και της αποτελεσματικότητας της χρήσης των λιπασμάτων παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την ορθολογική διαχείριση των θρεπτικών στοιχείων και παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 12 και 13.

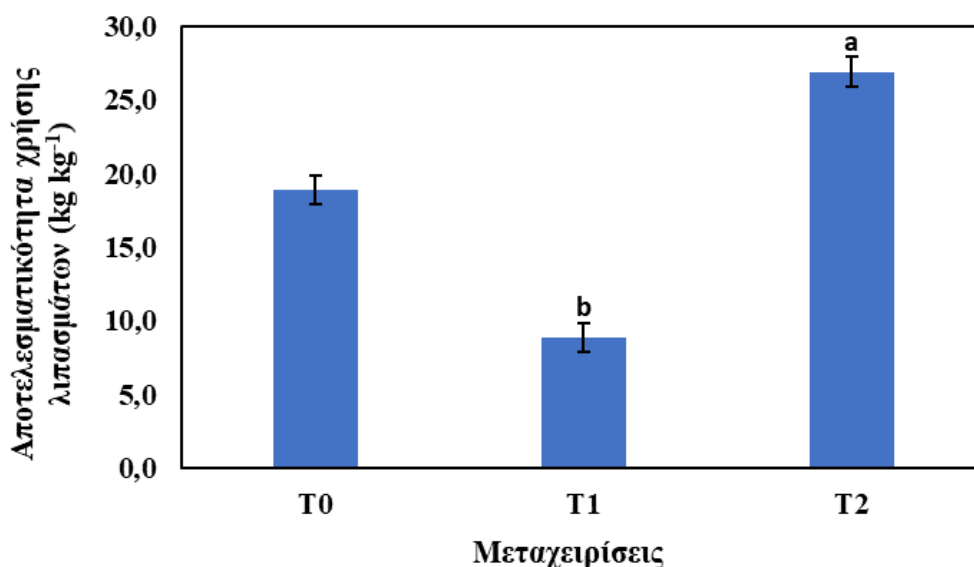


Διάγραμμα 12. Συνολική κατανάλωση λιπασμάτων (kg m⁻²) της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T₀) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T₁) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T₂) της δευτερεύουσας καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Με τα a και b σημειώνονται οι στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Η συνολική κατανάλωση λιπασμάτων στην καλλιέργεια τομάτας ήταν 0,73 kg m⁻². Η συνολική κατανάλωση λιπασμάτων της μεταχείρισης T₁ ήταν 0,75 kg m⁻², ενώ τη χαμηλότερη κατανάλωση κατείχε η T₂ με τιμή 0,25 kg m⁻². Οι τιμές των δύο μεταχειρίσεων της δευτερεύουσας καλλιέργειας διέφεραν στατιστικά σημαντικά μεταξύ τους ($p < 0,05$) κατά 65,9 %. Η διαφοροποίηση μεταξύ των T₁ και T₂ μπορεί να αποδοθεί στην ανακύκλωση νερού, καθώς κατά τη ρύθμιση των NO₃⁻ μέσω του ιοντοεκλεκτικού αισθητήρα παρατηρήθηκε η ανάγκη για προσθήκη λιπάσματος κυρίως κατά τις πρώτες μέρες του πειράματος, όταν οι τιμές τους στην απορροή της T₀ ήταν χαμηλότερες από τα επιθυμητά επίπεδα. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 8, να επίπεδα των νιτρικών στο διάλυμα απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας ξεπέρασαν το όριο των 1200ppm μετά την ημέρα 50 του πειράματος. Η προσαρμογή του διαλύματος απορροής της T₀ για την άρδευση της T₂ έγινε κατά κύριο λόγο με προσθήκη νερού και

όχι λιπάσματος, οδηγώντας έτσι σε σημαντικά χαμηλότερη κατανάλωση λιπασμάτων στη διάρκεια του πειράματος.

Η εφαρμογή του συστήματος επάλληλων καλλιεργειών συνέβαλε σημαντικά στην αύξηση της αποδοτικότητας χρήσης των λιπασμάτων μεταξύ των μεταχειρίσεων. Η μεταχείριση T₂ έφτασε τα 26,9 kg kg⁻¹, ενώ η μεταχείριση T₁ έφτασε μόλις τα 8,87 kg kg⁻¹.



Διάγραμμα 13. Αποτελεσματικότητα χρήσης λιπασμάτων (kg kg⁻¹) της πρωτεύουσας καλλιέργειας (T₀) και της μεταχείρισης του μάρτυρα (T₁) και της διαδοχικής μεταχείρισης (T₂) της δευτερεύουσας καλλιέργειας. Με τα a και b σημειώνονται οι στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Η στατιστικά σημαντική αυτή διαφορά αναδεικνύει τη σημασία υιοθέτησης τέτοιων συστημάτων, καθώς δείχνει ότι με ελάχιστη κατανάλωση λιπασμάτων (Διάγραμμα 12) μπορεί να επιτευχθεί αύξηση της αποτελεσματικότητας χρήσης τους έως και 60,6% σε σύγκριση με μια μονοκαλλιέργεια τοματινιού (Διάγραμμα 13). Σε πρακτικό επίπεδο, το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ενίσχυση της παραγωγικότητας της καλλιέργειας σε σχέση με τη λίπανση που εφαρμόζεται.

4. Συζήτηση

Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος επάλληλων καλλιεργειών μετρήθηκε η τιμή του pH του θρεπτικού διαλύματος άρδευσης και απορροής των δυο καλλιεργειών. Τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν έδειξαν ότι το pH της απορροής και των δύο καλλιεργειών αυξήθηκε αρκετά σε σχέση με αυτό της άρδευσης. Τη μεγαλύτερη απόκλιση παρουσίασε η μεταχείριση T₂, λόγω της πιθανής απορρόφησης μεγάλων ποσοτήτων νιτρικών και έλλειψης πρόσληψης αμμωνιακών κατιόντων για την διατήρηση θρεπτικής ισορροπίας (Rooyen van & Nicol, 2022). Οι μέσες τιμές του pH άρδευσης και των δυο καλλιεργειών διατηρήθηκαν στο επιθυμητό εύρος (5,5-6,5), γεγονός που υποδηλώνει την αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος που εφαρμόστηκε και την ορθή προσαρμογή και επεξεργασία του θρεπτικού διαλύματος απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας για την άρδευση της δευτερεύουσας καλλιέργειας.

Αντίστοιχα αποτελέσματα κατέγραψαν οι Garcia-Cararros et al. (2018), οι οποίοι εστίασαν τη μελέτη τους στην πλήρη επαναχρησιμοποίηση απορρέοντος διαλύματος με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος συνιστά ένα σύστημα ανάμιξης του διαλύματος απορροής με νερό χαμηλής αγωγιμότητας και ο δεύτερος αφορά την απευθείας ανακύκλωσή και επαναχρησιμοποίηση του σε άλλη καλλιέργεια. Συγκεκριμένα, και στα δύο συστήματα, το pH παρέμεινε εντός των επιθυμητών ορίων με μικρή αύξηση του στο διάλυμα απορροής, επιβεβαιώνοντας ότι η ανακύκλωση των διαλυμάτων δεν οδηγεί σε αλόγιστη οξίνιση ή αλκαλοποίηση. Σε παραπλήσια μελέτη των Elvanidi et al. (2020), το pH του θρεπτικού διαλύματος παρέμεινε σταθερό και εντός του καθορισμένου εύρους για όλες τις μεταχειρίσεις, χωρίς ιδιαίτερες μεταβολές ανάμεσα στις τιμές άρδευσης και απορροής. Σε έρευνα που πραγματοποίησαν οι Fayeizadeh et al. (2023), συγκρίνοντας την απόδοση ενός κλειστού και ενός ανοιχτού συστήματος υδροπονίας, παρατήρησαν ότι το pH στο κλειστό σύστημα αυξήθηκε αρκετά ξεπερνώντας το επιθυμητό όριο για την καλλιέργεια, πιθανόν λόγω ανισορροπίας πρόσληψης θρεπτικών στοιχείων (K, Ca, NO₃⁻, Mg). Αντίθετα, στο ανοιχτό σύστημα οι τιμές του pH κυμάνθηκαν ανάμεσα στα αποδεκτά όρια, σημειώνοντας μικρότερες διακυμάνσεις.

Η μέση τιμή των NO₃⁻ του διαλύματος απορροής της πρωτεύουσας καλλιέργειας παρουσιάστηκε ως σταθερά υψηλότερη συγκριτικά με τη μέση τιμή του διαλύματος άρδευσης της μεταχείρισης T₂ κατά 42,36%. Σε παρόμοια πειράματα που εφαρμόστηκε σύστημα επάλληλων καλλιεργειών, η συγκέντρωση των NO₃⁻ της απορροής της

πρωτεύουσας καλλιέργειας και η συγκέντρωση της άρδευσης της διαδοχικής μεταχείρισης κυμαίνονταν σε παρόμοια επίπεδα καθώς δεν προηγούνταν επεξεργασία των NO_3^- . Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη παρατηρείται μείωση της τιμής των NO_3^- στην μεταχείριση T₂ λόγω ρύθμισής τους με τον ιοντοεκλεκτικό αισθητήρα. Συγκεκριμένα, η πειραματική μελέτη των Elvanidi et al. (2020) βασίστηκε αποκλειστικά σε πρότυπες συνταγές και στην ανακύκλωση διαφορετικών ποσοτήτων απορροής (0% απορροή+ νέο θρεπτικό διάλυμα, 25% απορροή+ νέο θρεπτικό διάλυμα, 40% απορροή+ αραίωση με νερό), χωρίς την χρήση αισθητήρων για την διαχείριση των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα απορροής. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν διαφοροποιήσεις ως προς την συγκέντρωση NO_3^- των διαλυμάτων και κατά συνέπεια στην ανάπτυξη των φυτών. Η μεταχείριση που χρησιμοποίησε 25% απορροή άλλης καλλιέργειας εμφάνισε την καλύτερη ισορροπία ως προς την πρόσληψή θρεπτικών στοιχείων (NO_3 , K^+ , Ca^{+2}) και ικανοποιητική παραγωγή, ενώ η μεταχείριση με 40% απορροή και προσθήκη νερού παρουσίασε ανισορροπία και χαμηλότερη απόδοση λόγω υπερβολικής αραίωσης. Σε αντίθεση με αυτήν την προσέγγιση, η παρούσα μελέτη δεν βασίστηκε αποκλειστικά στο ποσοστό απορροής, αλλά στην εφαρμογή ιοντοεκλεκτικού αισθητήρα για τη ρύθμιση των επιπέδων NO_3^- και, κατ' επέκταση, της EC, ώστε οι συγκεντρώσεις της T₂ να διατηρούνται με ακρίβεια στα επιθυμητά επίπεδα.

Επιπλέον, η έρευνα των Naounoulis et al., (2024), οι οποίοι εφάρμοσαν σύστημα επάλληλων καλλιεργειών, χωρίς διαχείριση της θρέψης με ιοντοεκλεκτικό αισθητήρα, ανάμεσα σε καλλιέργειες αγγουριού (δότης) και πεπονιού (δέκτης) οδήγησε σε αξιοσημείωτα συμπεράσματα. Η συγκέντρωση NO_3^- στο θρεπτικό διάλυμα απορροής του αγγουριού κυμάνθηκε στα $10,9 \text{ mmol L}^{-1}$ και, έπειτα από απλή ρύθμιση του pH χωρίς περαιτέρω επεξεργασία, το διάλυμα χρησιμοποιήθηκε για την άρδευση της διαδοχικής μεταχείρισης. Στη μεταχείριση αυτή, οι συγκεντρώσεις NO_3^- παρουσίασαν αύξηση και διατηρήθηκαν σε υψηλότερα επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, ενώ παράλληλα εμφάνισαν μικρότερη απόκλιση από την επιθυμητή τιμή σε σχέση με τον μάρτυρα του πειράματος. Η EC του αρδευτικού διαλύματος των δύο μεταχειρίσεων ήταν παρόμοια, ιδιαίτερα κατά την φάση ανάπτυξης των καρπών, ενώ οι τιμές τη EC του διαλύματος απορροής εμφάνισαν διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Συγκεκριμένα η διαδοχική μεταχείριση παρουσίασε 24% υψηλότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα από τον μάρτυρα κατά την περίοδο ωρίμανσης, λόγω συσσώρευσης αλάτων. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε

αντίθεση με την παρούσα εργασία κατά την οποία η EC του μάρτυρα ήταν υψηλότερη από αυτή της μεταχείρισης T₂ κατά την περίοδο ωρίμανσης. Στη παρούσα πειραματική μελέτη λόγω της δυνατότητας περεταίρω διαχείρισης βελτιώθηκε η EC της μεταχείρισης T₂ στα επιθυμητά επίπεδα και η συγκέντρωση των νιτρικών δεν παρουσίασε αύξηση, όπως αυτή των Naounoulis et al., (2024).

Αντίστοιχα αποτελέσματα με την παρούσα διατριβή κατέγραψαν οι Savvas et al. (2021) οι οποίοι χρησιμοποίησαν ένα σύστημα λήψης αποφάσεων (Nutrisense) για τον αυτόματο υπολογισμό και τη ρύθμιση των διαλυμάτων στο πείραμά τους, στο οποίο πραγματοποιήθηκαν δύο μεταχειρίσεις σε υδροπονικές καλλιέργειες. Η πρώτη μεταχείριση αρδευόταν με πρότυπο θρεπτικό διάλυμα χωρίς κάποια επιπλέον προσαρμογή, ενώ στη δεύτερη πραγματοποιούνταν μηνιαία δειγματοληψία της απορροής της καλλιέργειας και μέσω της ανάλυσης από το σύστημα υπολογίζονταν νέα σύνθεση τροφοδοσίας και γινόταν αναπροσαρμογή της υδρολίπανσης. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας έδειξαν ότι η δεύτερη μεταχείριση διατήρησε τις συγκεντρώσεις των NO₃⁻ αλλά και των Ca, K, και P πιο κοντά στις επιθυμητές τιμές από την πρώτη μεταχείριση, ιδίως μετά το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας. Επισημαίνεται έτσι η δυνατότητα βελτίωσης ανάπτυξης των καλλιεργειών με χρήση συστήματος ρύθμισης των συγκεντρώσεων των διαλυμάτων αλλά ταυτόχρονα τονίζεται ότι πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή για να αποφεύγονται οι πολλές διορθώσεις των συγκεντρώσεων των διαλυμάτων.

Σύμφωνα με τα ευρήματα των Carmassi et al. (2005) σε κλειστό υδροπονικό σύστημα καλλιεργειών, οι οποίοι αξιολόγησαν τις συγκεντρώσεις διάφορων θρεπτικών στοιχείων (Na⁺, K⁺, Ca⁺², Mg⁺²) και τις τιμές της EC των διαλυμάτων άρδευσης δύο μεταχειρίσεων (με προσθήκη διαφορετικών τιμών NaCl η κάθε μια) διαπιστώθηκε ότι η μεταχείριση με την υψηλότερη συσσώρευση αλάτων είχε την μεγαλύτερη EC και μάλιστα σε τιμές οριακές με το μέγιστο επιθυμητό, με αποτέλεσμα να απορρίπτεται το διάλυμα και να γίνεται αναπλήρωση με νέο. Η ενσωμάτωση ιοντοεκλεκτικού αισθητήρα στην συγκεκριμένη περίπτωση θα έδινε τη δυνατότητα μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο και τον έλεγχο των νιτρικών ιόντων για την καλύτερη ρύθμιση της θρέψης. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα τη διατήρηση της EC στα βέλτιστα επίπεδα και την μη ύπαρξη ανάγκης για απόρριψη των θρεπτικών διαλυμάτων.

Η επαναχρησιμοποίηση θρεπτικού διαλύματος της πρωτεύουσας καλλιέργειας του πειράματος με σκοπό την κάλυψη των αναγκών της άρδευσης της δευτερεύουσας καλλιέργειας οδήγησε σε αύξηση της αποδοτικότητας και της εξοικονόμησης

λιπασμάτων. Στη συγκεκριμένη μελέτη διαπιστώθηκε ότι η κατανάλωση λιπασμάτων της διαδοχικής μεταχείρισης (T₂) ήταν μικρότερη από εκείνη που αρδευόταν με πρότυπο θρεπτικό διάλυμα κατά 83,2%, ενώ η αποτελεσματικότητα χρήσης λιπασμάτων της ήταν περίπου 3 φορές μεγαλύτερη. Η κατανάλωση νερού, αν και χαμηλότερη στην μεταχείριση T₂ σε σχέση με την T₁, φάνηκε να μην επηρεάζεται στον βαθμό που αναμενόταν. Η διαφορά της κατανάλωσης της μεταχείρισης T₂ κυμάνθηκε στο 4% σε σχέση με την T₁. Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα της χρήσης νερού, αξίζει να αναφερθεί ότι οι δύο μεταχειρίσεις της δευτερεύουσας καλλιέργειας σημείωσαν την ίδια τιμή.

Από την έρευνα των Garcia-Caparrros et al. (2018) σε υδροπονικό σύστημα πολυκαλλιέργειας με τρία είδη αλλά διαφορετικό σύστημα άρδευσης και επαναχρησιμοποίησης κάθε φορά, εξάγονται παρόμοια αποτελέσματα σε σχέση με την παρούσα πειραματική μελέτη. Οι μεταχειρίσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν τρεις: αρδεύσεις με 100% απορροή άλλης καλλιέργειας (κλειστό σύστημα), αρδεύσεις με 50% απορροή καλλιέργειας και 50% νερού (κλειστό σύστημα) και αποκλειστικά με πρότυπο θρεπτικό διάλυμα (ανοιχτό σύστημα). Από τα αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι η πρώτη και η δεύτερη οδήγησαν σε μείωση της κατανάλωσης νερού και λιπασμάτων κατά 17% σε σχέση με την τρίτη, ενώ η αποτελεσματικότητα χρήσης λιπασμάτων ήταν υψηλότερη στην περίπτωση άρδευσης με διάλυμα 100% απορροής. Τα παραπάνω συμπεράσματα συνάδουν με την υφιστάμενη μελέτη, καθώς η μεταχείριση T₂ παρουσίασε την καλύτερη αποτελεσματικότητα χρήσης λιπασμάτων και την μικρότερη κατανάλωση νερού και λιπασμάτων.

Παρόμοια αποτελέσματα για τα λιπάσματα παρατηρήθηκαν στην έρευνα των Karatsivou et al. (2023), κατά την οποία αξιολογήθηκε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα στο οποίο οι απορροές καλλιέργειας τομάτας επαναχρησιμοποιήθηκαν για την άρδευση δευτερευουσών καλλιεργειών (μαρούλι, σπανάκι, μαϊντανός) σε διαφορετικές ποσότητες (0% απορροή-μάρτυρας, 50% απορροή, 75% απορροή, 100% απορροή). Τα αποτελέσματα που κατέγραψαν οι ερευνητές σε σχέση με την αποτελεσματικότητα χρήσης λιπασμάτων αλλά και νερού ήταν και για τρεις μεταχειρίσεις θετικά. Συγκεκριμένα, για την καλλιέργεια του μαρουλιού που αρδευόταν με 100% διάλυμα απορροής παρατηρήθηκε αύξηση της αποτελεσματικότητας της χρήσης νερού και λιπασμάτων κατά 50% και 62%, αντίστοιχα σε σχέση με τον μάρτυρα. Στη καλλιέργεια σπανακιού, η μεταχείριση που αρδευόταν με 100% απορροή τομάτας παρουσίασε την υψηλότερη αποδοτικότητα στη

χρήση των λιπασμάτων και νερού σε σχέση με τον μάρτυρα κατά 62% και 30% αντίστοιχα. Τέλος, στη καλλιέργεια μαϊντανού παρατηρήθηκε μείωση της συνολικής παραγωγής σε σχέση με τον μάρτυρα αλλά αύξηση της αποτελεσματικότητας νερού κατά 14% και λιπασμάτων κατά 22%.

Σε μία αντίστοιχη πρόσφατη μελέτη των Karachaliou et al. (2025), κατά την οποία εφαρμόστηκε σύστημα επάλληλων καλλιεργειών με καλλιέργεια αγγουριού ως πρωτεύουσα και πεπονιού ως δευτερεύουσα, παρατηρήθηκε σημαντική εξοικονόμηση λιπασμάτων (καθώς οι απώλειες σε άζωτο και φώσφορο μειώθηκαν κατά 70% και 86% αντίστοιχα) και νερού σε σχέση με τον μάρτυρα, ενώ παράλληλα δεν διαπιστώθηκε μείωση στην παραγωγή και στην ποιότητα των καρπών.

Οι Elvanidi et al. (2020) πραγματοποίησαν πειραματική μελέτη σχετική με την ανακύκλωση θρεπτικών διαλυμάτων σε δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους, χρησιμοποιώντας το αγγούρι και την τομάτα ως πρωτεύουσες καλλιεργείες ενώ αρωματικά φυτά για τις δευτερεύουσες. Από τα αποτελέσματα του πειράματός τους συμπεραίνεται ότι η κατανάλωση νερού μειώθηκε περί του 30% σε σχέση με τον μάρτυρα στις μεταχειρίσεις που χρησιμοποιούσαν 40% (T₁) και 15% (T₂) απορροή σε συνδυασμό με νερό, ενώ οι μεταχειρίσεις στις οποίες εφαρμόζονταν 25% (T₃) και 10% (T₄) απορροή σε συνδυασμό με νέο θρεπτικό διάλυμα παρουσίασαν μείωση ως προς την κατανάλωση νερού κατά 15%. Ως προς την αποτελεσματικότητα χρήσης λιπασμάτων εντοπίστηκε 60-75% αύξηση στις μεταχειρίσεις T₁ και T₂, ενώ στις T₃ και T₄ η αύξηση της αποδοτικότητας λιπασμάτων υπολογίστηκε στο 4-15%.

Τέλος, στο πείραμα που πραγματοποίησαν οι Fayeizadeh et al. (2023) σε κλειστό και ανοιχτό υδροπονικό σύστημα, κατέδειξαν ότι η αποδοτικότητα χρήσης νερού στο κλειστό σύστημα βελτιώθηκε σημαντικά σε ποσοστό μεγαλύτερο του 54,3% και παράλληλα μειώθηκε η κατανάλωση λιπασμάτων κατά 97%.

5. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης αναδεικνύουν ότι η εφαρμογή ενός συστήματος επάλληλων καλλιεργειών με ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση του θρεπτικού διαλύματος απορροής μπορεί να αποτελέσει αποτελεσματική και βιώσιμη στρατηγική μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και της κατανάλωσης κρίσιμων πόρων σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες. Ο συνδυασμός τομάτας και τοματινιού απέδειξε ότι η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος είναι εφικτή, χωρίς αρνητικές επιπτώσεις στην απόδοση και την λίπανση των φυτών. Η διατήρηση κρίσιμων παραμέτρων, όπως το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και οι συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων, εντός των επιθυμητών ορίων, συνέβαλε ουσιαστικά στη βελτίωση της αποδοτικότητας χρήσης νερού και λιπασμάτων. Συνολικά, τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι το σύστημα διαδοχικών καλλιεργειών μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό «εργαλείο» ειδικά σε περιοχές που αντιμετωπίζουν αυξημένη περιβαλλοντική πίεση και περιορισμένη διαθεσιμότητα υδατικών πόρων.

6. Βιβλιογραφία

6.1. Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Abd-Elmoniem E.M., Abdrabbo M.A., Farag A.A. and Medany M., 2006. Hydroponics for food production: comparison of open and closed systems on yield and consumption of water and nutrient. *Proceedings of the International Conference on Water Management in Arid Environments*.

Alemzadeh A.N. and Darei H., 2024. Comparison of open and combined closed hydroponic system on water productivity, nutrient use efficiency, yield and fruit quality of cucumber. *Irrigation Sciences and Engineering*, 46:41–52.

Aznar-Sánchez J.A., Velasco-Muñoz J.F., López-Felices B. and Román-Sánchez I.M., 2020. An analysis of global research trends on greenhouse technology: towards a sustainable agriculture. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17:664.

Bailey, B. J., Haggett B. G. D., Hunter A., Albery W.J., Svanberg L.R., 1988. Monitoring nutrient film solutions using ion-selective electrodes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40(2), 129–142.

Bar-Yosef B., 2008. Fertigation management and crops response to solution recycling in semi-closed greenhouses. In: Raviv M. and Lieth J.H. (eds.), *Soilless Culture: Theory and Practice*. Academic Press, San Diego, pp. 341–424. ISBN 978-0-444-52975-6

Bhattacharya, D., Ghosh, R., Tripathy, S., Swain, D. K., and Mitra, A., 2025. Evaluation of tomato growth, yield, phytochemical properties under varied nutrient regimes in hydroponic system with traditional soil system. *Journal of Plant Nutrition*, pp.1-19.

Biswas A., Sarkar S., Das S., Dutta S., Roy Choudhury M., Giri A., Bera B., Bag K., Mukherjee B., Banerjee K., Gupta D. and Paul D., 2025. Water scarcity: a global hindrance to sustainable development and agricultural production – a critical review of the impacts and adaptation strategies. *Cambridge Prisms: Water*, 3, e4: 1-22.

Bunyuth, Y., & Mardy, S., 2024. Hydroponic systems: an overview of benefits, challenges, and future prospects. *Indonesian Journal of Social Economics and Agricultural Policy*, 1(1), 10-18.

Carmassi G., Incrocci L., Maggini R., Malorgio F., Tognoni F. and Pardossi A., 2005. Modeling salinity build-up in recirculating nutrient solution culture. *Journal of Plant Nutrition*, 28:431–445.

Crovella T., Paiano A., Falciglia P.P., Lagioia G. and Ingrao C., 2024. Wastewater recovery for sustainable agricultural systems in the circular economy – a systematic literature review of life cycle assessments. *Science of the Total Environment*, 912:169310.

Di Mola D. I., Ottaiano L., Cozzolino E., El-Nakhel C., Fiorentino N., Pelosi M.E., Roupheal Y. and Mori M., 2024. Impact of salinity and biostimulants on cherry tomato yield and quality. *Horticulturae*, 10:1239.

Dorais M., Papadopoulos A.P. and Gosselin A., 2001. Influence of electrical conductivity management on greenhouse tomato yield and fruit quality. *Agronomie*, 21:367–383.

Ehret D.L., Alsanius B.W., Wohanka W., Menzies J. and others, 2001. Disinfection of recirculating nutrient solutions in greenhouse horticulture. *Agronomie*, 21:323–339.

Eldeeb, M. A., Dhamu, V. N., Paul, A., Muthukumar, S., & Prasad, S., 2023. Electrochemical soil nitrate sensor for in situ real-time monitoring. *Micromachines*, 14(7)

Elvanidi A., Benitez Reascos C.M., Gourzoulidou E., Kunze A., Max J.F.J. and Katsoulas N., 2020. Implementation of the circular economy concept in greenhouse hydroponics for ultimate use of water and nutrients. *Horticulturae*, 6:83.

European Commission, 2025. Nitrates: Protecting waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources. European Commission database. https://environment.ec.europa.eu/topics/water/nitrates_en (Πρόσβαση στις 5 Σεπτεμβρίου 2025).

Farvardin M., Taki M., Gorjian S., Shabani E. and Sosa-Savedra J.C., 2024. Assessing the physical and environmental aspects of greenhouse cultivation: a comprehensive review of conventional and hydroponic methods. *Sustainability*, 16:1273.

Fayezizadeh M.R., Alemzadeh Ansari N., Albaji M. and Khaleghi E., 2021. Water productivity and stomatal gas exchanges of greenhouse tomato in two hydroponic systems. *Irrigation Sciences and Engineering (IISE)*, 44(2):79–91

García-Caparrós P., Llanderal A., El-Tarawy A. and Lao M.T., 2018. Crop and irrigation management systems under greenhouse conditions. *Water*, 10:62.

Guedes M.A., Silva A.A.R., Lima G.S., Gheyi H.R., Soares L.A.A., Silva L.A., Oliveira V.K.N., Fátima R.T., Nobre R.G., Nóbrega J.S., Azevedo C.A.V., Silva S.S.

and Gomes J.P., 2023. Hydroponic cultivation of Laranja cherry tomatoes under salt stress and foliar application of hydrogen peroxide. *Agriculture*, 13:1688.

Guo M., Wang X.S., Guo H.D., Bai S.Y., Khan A., Wang X.M., Gao Y.M. and Li J.S., 2022. Tomato salt tolerance mechanisms and their potential applications for fighting salinity: a review. *Frontiers in Plant Science*, 13:949541.

Guthrie S., Giles S., Dunkerley F., Tabaqchali H., Harshfield A., Ioppolo B. and Manville C., 2018. The impact of ammonia emissions from agriculture on biodiversity: an evidence synthesis. RAND Corporation and The Royal Society, Cambridge, UK. ISBN: 978-1-912801-11-3.

Hatfield J. L. and Dold C., 2019. Water-Use efficiency: Advantages and Challenges in a Changing Climate. *Frontiers in Plant Science*, 10:103.

Incrocci L., Pardossi A., Malorgio F., Maggini R. and Campiotti C.A., 2003. Cascade cropping system for greenhouse soilless culture. *Acta Horticulturae*, 609:297–304.

Jones Jr., J. B., 2004. *Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower*. Introduction, pp. 16.

Jung, D. H., Kim, H.-J., Choi, G. L., Ahn, T.-I., Son, J.-E., & Sudduth, K. A., 2015. Automated lettuce nutrient solution management using an array of ion-selective electrodes. *Transactions of the ASABE* 58.5 (2015): 1309-1319.

Karachaliou Z., Naounoulis I., Katsoulas N. and Levizou E., 2025. Cascade hydroponics as a means to increase the sustainability of cropping systems: evaluation of functional, growth, and fruit quality traits of melons. *Sustainability*, 17:4527.

Karatsivou E., Elvanidi A., Faliagka S., Naounoulis I. and Katsoulas N., 2023. Performance evaluation of a cascade cropping system. *Horticulturae*, 9:802.

Katsoulas N., Sapounas A., De Zwart F., Dieleman J.A. and Stanghellini C., 2015. Reducing ventilation requirements in semi-closed greenhouses increases water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 156:90–99

Kechasov D., Verheul M.J., Paponov M., Panosyan A. and Paponov I.A., 2021. Organic waste-based fertilizer in hydroponics increases tomato fruit size but reduces fruit quality. *Frontiers in Plant Science*, 12:680030

Khatri L., Kunwar A. and Bist D.R., 2024. Hydroponics: advantages and challenges in soilless farming. *Big Data in Agriculture*, 2:81–88.

Korčok M., Vietorisová N., Martišová P., Štefániková J., Mravcová A. and Vietoris V., 2021. Aromatic profile of hydroponically and conventionally grown tomatoes. *Applied Sciences*, 11:8012.

Kumar C.S., Divya Vani D.P. and Srikanth Reddy M.V.S., 2024. Hydroponics – the future of farming. *AIP Conference Proceedings*, 2971:040050.

Martin S. R., Oyege, I., Shetty K. G., Jayachandran K., and Balaji Bhaskar M. S., 2024. The effect of saltwater stress on the performance of cherry tomatoes. *FIU Undergraduate Research Journal*, 2(1): 14.

Martinez D.A., Gathorne-Hardy A. and Smith M.B., 2024. Impacts of polycultural cropping on crop yields and biodiversity: A system map protocol. *Ecological Solutions and Evidence*, 5(3): 12349.

Mielcarek A., Kłobukowska K., Rodziewicz J., Janczukowicz W, and Bryszewski K. L., 2024. Water Nutrient Management in Soilless Plant Cultivation versus Sustainability. *Sustainability*, 16(1): 152.

Naounoulis I., Faliagka S., Levizou E. and Katsoulas N., 2024. Cascade hydroponics enhanced water and nutrients use efficiency in a greenhouse cucumber–melon crop combination. *Scientia Horticulturae*, 338:113822.

Narayan R., Kishor A., Narayan S. and Kumar A., 2022. Performance of cherry tomato (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*) genotypes for physico-chemical attributes under naturally ventilated protected structure. *Biological Forum – An International Journal*, 14:395–403.

Nederhoff E. and Stanghellini C., 2010. Water use efficiency of tomatoes – in greenhouses and hydroponics. *Practical Hydroponics & Greenhouses*, (115), 52-59

Papadopoulos I., Chatzitheodoridis F., Gianneli C., Lykas C. and Kalyvas G., 2008. Evaluation of hydroponic production of vegetables and ornamental pot-plants in a heated greenhouse in Western Macedonia, Greece. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 3(2):559–565.

Paris B., Vadorou F., Balafoutis A.T., Vaiopoulos K., Kyriakarakos G., Manolakos D. and Papadakis G., 2022. Energy use in greenhouses in the EU: a review recommending energy efficiency measures and renewable energy sources adoption. *Applied Sciences*, 12:5150.

Patil S., Kadam U.S., Mane M.S., Mahale D. and others, 2020. Hydroponic growth media (substrate): a review. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 21:1–15.

Pellerin, B. A., Bergamaschi, B. A., Downing, B. D., Saraceno, J. F., Garrett, J. A., & Olsen, L. D., 2013. Optical techniques for the determination of nitrate in environmental waters: Guidelines for instrument selection, operation, deployment, maintenance, quality assurance, and data reporting. Science for a changing world (USGS), pp.11.

Pomoni D.I., Koukou M.K., Vrachopoulos M.G. and Vasiliadis L., 2023. A review of hydroponics and conventional agriculture based on energy and water consumption, environmental impact, and land use. *Energies*, 16:1690.

Rajaseger G., Chan K.L., Tan K.Y., Ramasamy S., Khin M.C., Amaladoss A. and Patel K.H., 2023. Hydroponics: current trends in sustainable crop production. *Bioinformation*, 19:925–938.

Rajatha K.D., Rajendra Prasad S., Udaya Kumar M. and Nethra N.M.N., 2019. Standardization of pH of the solution under soil-less agriculture system for tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(12):1111–1118.

Rashid M.H.A., Karim M.R., Saha R., Hossain M.I. and others, 2022. Improving growth, yield and quality of cherry tomato (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*) using staking and mixed fertilization. *Journal of Agriculture Food and Environment*. ISSN (Online Version): 2708-5694, 3(3), 77-85.

Rooyen van I.L. and Nicol W., 2022. Nitrogen management in nitrification-hydroponic systems by utilizing their pH characteristics. *Environmental Technology and Innovation* 26, 102360.

Savvas D., Ntatsi G., Panagiotakis I. and Drakatos S., 2021. NUTRISENSE: a novel software to automatically control nutrient supply in closed hydroponic crops. *Acta Horticulturae*, 1317.

Savvas D., Ropokis A., Ntatsi G. and Kittas C., 2016. Current situation of greenhouse vegetable production in Greece. *Acta Horticulturae*, 1142:443–448.

Stanghellini C., 2014. Horticultural production in greenhouses: efficient use of water. *Acta Horticulturae*, 1034:13–20.

Thomas P., Knox O.G.G., Powell J.R., Sindel B. and Winter G., 2023. The hydroponic rockwool root microbiome: under control or underutilised? *Microorganisms*, 11:835.

Treftz C., Kratsch H. and Omaye S., 2015. Hydroponics: a brief guide to growing food without soil. Fact Sheet 15-08. University of Nevada Cooperative Extension, Reno, USA.

U.S. Environmental Protection Agency, 2025. Nonpoint Source: Agriculture. EPA database. <https://www.epa.gov/nps/nonpoint-source-agriculture> (Πρόσβαση στις 5 Σεπτεμβρίου 2025).

Ullah H., Santiago-Arenas R., Ferdous Z., Attia A. and Datta A., 2019. Improving water use efficiency, nitrogen use efficiency, and radiation use efficiency in field crops under drought stress: a review. *Advances in Agronomy*, 156:109–157.

Velázquez L.A., Hernández M.A. and León M., 2013. First advances on the development of a hydroponic system for cherry tomato culture. *Proceedings of the International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)*.

Verdoliva S.G., Gwyn-Jones D., Detheridge A. and Robson P., 2021. Controlled comparisons between soil and hydroponic systems reveal increased water use efficiency and higher lycopene and β -carotene contents in hydroponically grown tomatoes. *Scientia Horticulturae*, 279: 109896.

Wardak C., 2023. Potentiometry and Ion-Selective Electrodes. *Encyclopedia. ACOL by Wiley*.

Wubetie Y. and Wubetu A., 2025. Effects of staking techniques on growth and yield of tomato varieties in northwestern Ethiopia. *Scientific Reports*, 15:20011.

Yalin D., Craddock H.A., Assouline S., Ben Mordechay E., Ben-Gal A., Bernstein N., Chaudhry R.M., Chefetz B., Fatta-Kassinos D., Gawlik B.M., Hamilton K.A., Khalifa L., Kurtzman D., Levy G.J., Maffettone R., Malato S., Manaia C.M., Manoli K., Moshe O.F., Rimelman A., Rizzo L., Sedlak D.L., Shnit-Orland M., Shtull-Trauring E., Tarchitzky J., Welch-White V., Williams C., McLain J. and Cytryn E., 2023. Mitigating risks and maximizing sustainability of treated wastewater reuse for irrigation. *Water Research X*, 21:100203.

6.2. Ελληνική Βιβλιογραφία

Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ), 2021. Απογραφή Γεωργίας-Κτηνοτροφίας: Εκμεταλλεύσεις και εκτάσεις. Πίνακας B01.

Ίδρυμα Οικονομικών & Βιομηχανικών Ερευνών (IOBE), 2025. Η θερμοκηπιακή γεωργία εκτός εδάφους στην Ελλάδα: Προκλήσεις, προοπτικές και οι περιπτώσεις της Στερεάς και Βόρειας Ελλάδας. IOBE, Αθήνα. ISBN

Σάββας, Δ., 2011. Καλλιέργειες εκτός εδάφους: υδροπονία, υποστρώματα. Εκδόσεις ΑγροΤύπος, Αθήνα.

6.3. Εικόνες από το διαδίκτυο

Ydroponia.gr,

SKG

Hydroponics.

<https://www.ydroponia.gr/index.php/%CF%85%CF%80%CE%BF%CF%83%CF%84%CF%81%CF%8E%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1-%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BD-%CF%85%CE%B4%CF%81%CE%BF%CF%80%CE%BF%CE%BD%CE%AF%CE%B1/> (Πρόσβαση 1 Σεπτεμβρίου 2025).

Luciasfarm.gr.

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.luciasfarm.gr%2Fkalliergeia-tomatas%2F&psig=AOvVaw1XHsveCcWvtNMRRkXLeSII&ust=1757859637034000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBgQjhxqFwoTCNi52cv31Y8DFQAAAAAdAAAAABAE> (Πρόσβαση στις 29 Αυγούστου 2025)