



**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΗΠΕΥΤΙΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΟΜΕΙΣ ΑΙΧΜΗΣ ΚΑΙ ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ
& ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΟΠΩΡΟΚΗΠΕΥΤΙΚΩΝ & ΑΝΘΟΚΟΜΙΚΩΝ ΦΥΤΩΝ»**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

«Διερεύνηση της αντιστάθμισης της συσσώρευσης χλωριούχου νατρίου (NaCl) στο θρεπτικό διάλυμα σε κλειστά υδροπονικά συστήματα μέσω κατάλληλης αναπροσαρμογής της παροχής θρεπτικών στοιχείων»



Αικατερίνη Ι. Σπανουδάκη

Επιβλέπων Καθηγητής
Δημήτριος Σάββας, Καθηγητής Γ.Π.Α.

ΑΘΗΝΑ 2024

**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΗΠΕΥΤΙΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

«Διερεύνηση της αντιστάθμισης της συσσώρευσης χλωριούχου νατρίου (NaCl) στο θρεπτικό διάλυμα σε κλειστά υδροπονικά συστήματα μέσω κατάλληλης αναπροσαρμογής της παροχής θρεπτικών στοιχείων»

«Investigation of the compensation of sodium chloride (NaCl) accumulation in the nutrient solution in closed-loop soilless culture systems through appropriate adjustment of nutrient supply»

Αικατερίνη Ι. Σπανουδάκη

Εξεταστική Επιτροπή:

Σάββας Δημήτριος, Καθηγητής Γ.Π.Α. (Επιβλέπων)

Καραπάνος Ιωάννης, Αναπληρωτής Καθηγητής Γ.Π.Α.

Ντάτση Γεωργία, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Γ.Π.Α.

Διερεύνηση της αντιστάθμισης της συσσώρευσης χλωριούχου νατρίου (NaCl) στο θρεπτικό διάλυμα σε κλειστά υδροπονικά συστήματα μέσω κατάλληλης αναπροσαρμογής της παροχής θρεπτικών στοιχείων

*Π.Μ.Σ. Τομείς Αιχμής & Καινοτόμες Εφαρμογές στην Παραγωγή & Συντήρηση
Οπωροκηπευτικών & Ανθοκομικών Ειδών
Τμήμα Φυτικής Παραγωγής
Εργαστήριο Κηπευτικών Καλλιεργειών*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα κλειστά υδροπονικά συστήματα, η καταπόνηση αλατότητας που προκαλείται από την συσσώρευση νατρίου (Na) αποτελεί το σημαντικότερο εμπόδιο για την ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος όταν χρησιμοποιούνται πηγές νερού με μια σχετικά υψηλή συγκέντρωση Na. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα προτείνεται μία νέα στρατηγική, ώστε να ελεγχθεί αποτελεσματικά η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) στο περιβάλλον της ρίζας. Επί του παρόντος, οι συνιστώμενες συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων στο περιβάλλον της ρίζας για την τομάτα υπερβαίνουν αυτές για την μεγιστοποίηση της απόδοσης με στόχο μία μέτρια αλατούχο καταπόνηση που να βελτιώνει την ποιότητα των καρπών. Η νέα στρατηγική που προτείνεται σταδιακά μειώνει τις συγκεντρώσεις – στόχους των θρεπτικών στοιχείων, εκτός του φωσφόρου (P), στο περιβάλλον της ρίζας σε αναλογία με την συσσώρευση νατρίου (Na⁺), αλλά μέχρι ένα ελάχιστο επίπεδο ασφαλείας, διατηρώντας, παράλληλα, σταθερές τις μεταξύ τους αναλογίες. Αυτή η στρατηγική στοχεύει στην επέκταση του χρόνου διατήρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), στο περιβάλλον της ρίζας, στο επιθυμητό επίπεδο, μέχρι να ολοκληρωθεί η καλλιέργεια. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για να υποστηριχθεί αυτή η καινούργια στρατηγική εφαρμόστηκε μέσα από το Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων NUTRISENSE σε καλλιέργεια τομάτας με υπόστρωμα πετροβάμβακα σε κλειστό υδροπονικό σύστημα. Αυτή η στρατηγική συγκρίθηκε με την τυπική στρατηγική διατήρησης σταθερών επιπέδων θρεπτικών στοιχείων στο περιβάλλον της ρίζας, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) λόγω συσσώρευσης νατρίου (Na). Τα αποτελέσματα δείχνουν την αποτελεσματικότητα της στρατηγικής στον έλεγχο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) στο περιβάλλον των ριζών, ελαχιστοποιώντας με αυτόν τον τρόπο τις εκπομπές των νιτρικών και των φωσφορικών αλάτων που προκύπτουν από την απόρριψη των λιπασμάτων, αποφεύγοντας τις απώλειες παραγωγής εξαιτίας της αλατότητας. Μπορεί η νέα στρατηγική να μην μείωσε την κατανάλωση του νερού, αλλά αύξησε την αποδοτικότητα χρήσης του, αλλά και του αζώτου. Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι και με την νέα στρατηγική δεν είναι εφικτό να εξαλειφθεί πλήρως η ανάγκη απόρριψης διαλύματος απορροής όταν χρησιμοποιείται νερό με συγκέντρωση Na 4 mM για να παρασκευαστούν τα θρεπτικά διαλύματα.

Επιστημονική περιοχή: Καλλιέργειες εκτός εδάφους

Λέξεις – κλειδιά: τομάτα, καλλιέργεια εκτός εδάφους, κλειστό υδροπονικό σύστημα, συσσώρευση νατρίου, Nutrisense, ανακύκλωση νερού

Investigation of the compensation of sodium chloride (NaCl) accumulation in the nutrient solution in closed-loop soilless culture systems through appropriate adjustment of nutrient supply

MSc Top Sectors & Innovative Applications in Production & Maintenance of Fruit, Vegetable & Floricultural Species

Faculty of Crop Science

Laboratory of Vegetable Production

ABSTRACT

In closed-loop soilless systems, the salinity stress caused by sodium (Na) accumulation is the major bottleneck for recycling of the nutrient solution when water sources with a relatively high Na concentration are used. To address this problem, a new strategy is proposed to effectively control the increase in Electrical Conductivity (EC) in the root environment. Currently, the recommended nutrient concentrations in the root environment for tomato exceed those for maximizing yield with the aim of a moderate salinity eustress that improves fruit quality. The new strategy that is proposed gradually reduces the target concentrations of macronutrients except for phosphorus (P) in the root environment in proportion to the accumulation of sodium (Na^+), but up to a minimum safety level, while keeping the mutual ratios between them constant. This strategy aims at extending the time of maintaining the Electrical Conductivity (EC) in the root environment to the desired level even up the crop termination. The algorithm developed to support this new strategy was applied via the Decision Support System NUTRISSENSE in tomato grown on mineral wool in a closed-loop soilless cropping system. This strategy was compared with the standard strategy of maintaining constant nutrient levels in the root environment, thus allowing for an increase of Electrical Conductivity (EC) due to sodium (Na) accumulation. The results show the effectiveness of the strategy in controlling Electrical Conductivity (EC) in the root environment, thus minimizing nitrate and phosphate emissions arising from discharge of fertigation effluents, while avoiding yield losses due to salinity stress. The new strategy did not reduced water consumption, but increased the efficiency of water use and nitrogen use. However, the new strategy could not completely eliminate the need to discharge drainage solution when raw water with a Na concentration of 4 mM was used to prepare nutrient solutions.

Scientific area: Soilless culture systems

Keywords: tomato, soilless culture, closed-loop soilless system, sodium accumulation, Nutrisense, water recycling

*Αφιερώνεται στον εκλιπόντα αδελφό μου, Εμμανουήλ,
το παντοτινό στήριγμά μου!!!*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή θα ήθελα, αρχικά, να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δημήτριο Σάββα, που, εκτός από την καθοδήγηση και την βοήθειά του, μου έδωσε την ευκαιρία να διεκπεραιώσω την μεταπτυχιακή μου μελέτη στο Εργαστήριο Κηπευτικών Καλλιεργειών και να έρθω σε επαφή με έναν τόσο όμορφο και ενδιαφέροντα κλάδο, όπως είναι η υδροπονία, καθώς, επίσης, να γνωρίσω και να συνεργαστώ με τόσο αξιόλογους ανθρώπους.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα, Ευάγγελο Γιαννοθανάση, για την υπέροχη συνεργασία μας, αλλά και για την ανεξάντλητη υπομονή και την βοήθειά του καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους προπτυχιακούς φοιτητές και συνεργάτες μου στο πείραμα, τον Σπύρο Κίνα και τον Βασίλη Χρίστου, για την άψογη συνεργασία που είχαμε.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Γεωργία Ντάτση, για την εμπιστοσύνη και την βοήθειά της, αλλά και τον Αναπληρωτή Καθηγητή, Ιωάννη Καραπάνο, για τον έλεγχο της μεταπτυχιακής μου διατριβής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τους γονείς μου, καθώς χωρίς την βοήθειά τους και την στήριξή τους δεν θα τα είχα καταφέρει!

Σπανουδάκη Αικατερίνη
Αθήνα 2024

Με την άδειά μου, η παρούσα εργασία ελέγχθηκε από την Εξεταστική Επιτροπή μέσα από λογισμικό ανίχνευσης λογοκλοπής που διαθέτει το Γ.Π.Α. και διασταυρώθηκε η εγκυρότητα και η πρωτοτυπία της.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	6
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	7
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	10
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	12
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	12
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ.....	13
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.1 Καλλιέργεια εκτός εδάφους: Ορισμός.....	14
1.2 Ιστορικά στοιχεία καλλιέργειας εκτός εδάφους.....	14
1.3 Υδροπονία: Ορισμός.....	15
1.4 Σημαντικές έννοιες για την υδροπονική καλλιέργεια.....	17
1.4.1 Θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας.....	17
1.4.2 Εγκατάσταση για την παροχή νερού.....	18
1.4.3 Δοχεία για πυκνά διαλύματα.....	19
1.4.4 Χαρακτηριστικά θρεπτικών διαλυμάτων.....	21
1.4.5 Χρησιμοποιούμενα λιπάσματα.....	23
1.4.6 Αραίωση πυκνών διαλυμάτων.....	25
1.4.6.1 Χειρωνακτική αραίωση πυκνών διαλυμάτων.....	25
1.4.6.2 Αυτόματη αραίωση πυκνών διαλυμάτων.....	26
1.5 Υδροπονική καλλιέργεια με την χρήση υποστρωμάτων	28
1.6 Διάλυμα απορροής.....	29
1.7 Συστήματα υδροκαλλιέργειας	30
1.8 Ανοιχτά και κλειστά συστήματα	31
1.8.1 Ανοιχτά υδροπονικά συστήματα	31

1.8.2 Κλειστά υδροπονικά συστήματα	32
1.9 Απολύμανση διαλύματος απορροής στα κλειστά υδροπονικά συστήματα....	33
1.10 Πλεονεκτήματα καλλιεργειών εκτός εδάφους.....	34
1.11 Μειονεκτήματα καλλιεργειών εκτός εδάφους.....	36
1.12 Αλατότητα	37
1.13 Έλεγχος σύνθεσης θρεπτικού διαλύματος.....	39
1.13.1 Σύνθεση θρεπτικού διαλύματος	39
1.13.2 Δημιουργία θρεπτικού διαλύματος στα κλειστά υδροπονικά συστήματα	39
1.13.3 Αναπροσαρμογή διαλύματος τροφοδοσίας.....	41
1.14 Σύστημα διαχείρισης της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος - NUTRISENSE.....	42
1.15 Η τομάτα (<i>Solanum lycopersicum</i> L.).....	43
1.15.1 Βοτανικά χαρακτηριστικά.....	43
1.15.2 Καρπόδεση τομάτας.....	44
1.15.3 Επικονίαση – Γονιμοποίηση.....	44
1.15.4 Στατιστικά στοιχεία σχετικά με την παραγωγή τομάτας.....	45
1.15.5 Θρέψη και λίπανση της τομάτας σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια	47
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	49
2.1 Ο χώρος του πειράματος.....	49
2.2 Η εγκατάσταση του πειράματος	50
2.3 Το φυτικό Υλικό	54
2.4 Καλλιεργητικές φροντίδες.....	55
2.4.1 Κλάδεμα – Αραίωση ανθέων.....	55
2.4.2 Υποστύλωση.....	56
2.4.3 Αφαίρεση παλαιών φύλλων	57

2.4.4 Συγκομιδή καρπών.....	58
2.4.5 Έλεγχος διαλυμάτων απορροής.....	58
2.4.6 Εντομολογικοί εχθροί και ασθένειες τομάτας	59
2.5 Εργαστηριακές αναλύσεις θρεπτικών στοιχείων	61
2.5.1 Προσδιορισμός νιτρικών με την μέθοδο της φασματομετρίας χρησιμοποιώντας χλωριούχο βανάδιο	61
2.5.2 Προσδιορισμός φωσφόρου με την μέθοδο Murphy – Riley.....	62
2.5.3 Προσδιορισμός ασβεστίου και μαγνησίου με τη χρήση της ατομικής απορρόφησης.....	63
2.5.4 Προσδιορισμός καλίου και νατρίου με τη χρήση του φλογοφωτομέτρου	63
2.5.5 Προσδιορισμός ηλεκτρικής αγωγιμότητας και pH.....	64
2.5.6 Προσδιορισμόςθειικών.....	65
2.5.7 Προσδιορισμός χλωρίου.....	65
2.5.8 Ξηρή βιομάζα (%) στα φύλλα.....	65
2.5.9 Μέτρηση ολικών διαλυτών στερεών (°Brix) με τη χρήση του διαθλασιμέτρου	68
2.5.10 Μέτρηση Τιτλοδοτούμενης Οξύτητας (κιτρικό οξύ %)......	68
2.5.11 Μέτρηση δείκτη γεύσης.....	69
2.5.12 Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων.....	69
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	70
3.1 Πορεία ηλεκτρικής αγωγιμότητας, pH, συγκέντρωσης μακροθρεπτικών στοιχείων, νατρίου και χλωρίου στο διάλυμα απορροής.....	70
3.2 Πορεία συγκέντρωσης μακροθρεπτικών στοιχείων και νατρίου στα φύλλα	75
3.3 Πορεία Συνολικής και Εμπορεύσιμης Παραγωγής.....	76
4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	79
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	85
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	86

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Απεικόνιση των Κρεμαστών κήπων της Βαβυλωνίας	14
Εικόνα 1.2 Υδροπονική καλλιέργεια τομάτας, στην Ολλανδία, σε υπόστρωμα πετροβάμβακα.....	16
Εικόνα 1.3 Υδροπονική καλλιέργεια μαρουλιού σε σύστημα επίπλευσης (Floating System) όπου το ριζικό σύστημα βρίσκεται απευθείας μέσα στο θρεπτικό διάλυμα.....	16
Εικόνα 1.4 Δημιουργία θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας.....	17
Εικόνα 1.5 Φορητό όργανο για την μέτρηση του pH, ονομασία φορητού οργάνου: HI8424	18
Εικόνα 1.6 Φορητό όργανο για την μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), ονομασία φορητού οργάνου: HI98311 DiST 5, Hanna.....	18
Εικόνα 1.7 Πολλαπλά δοχεία πυκνών διαλυμάτων.....	21
Εικόνα 1.8 Δεξαμενή χειρωνακτικής αραιώσης πυκνών διαλυμάτων.....	26
Εικόνα 1.9 Δεξαμενή αυτόματης αραιώσης πυκνών διαλυμάτων.....	27
Εικόνα 1.10 Σύγχρονη κεφαλή υδρολίπανσης, σε ηλεκτρονικό σύστημα, για τη σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος.. ..	28
Εικόνα 1.11 Απεικόνιση ριζών μέσα στην ορθογώνια πλάκα του πετροβάμβακα.....	29
Εικόνα 1.12 Καλλιέργεια σε σύστημα αεροπονίας	31
Εικόνα 1.13 Πλάγια απεικόνιση άνθους <i>Solanum lycopersicum</i> L. ‘Ekstasi F1’ στο θάλαμο του θερμοκηπίου του Γ.Π.Α.	44
Εικόνα 1.14 Απεικόνιση βομβίνου πάνω σε άνθος στο θερμοκήπιο του Γ.Π.Α.	45
Εικόνα 1.15 Εικόνα θαλάμου θερμοκηπίου αφού έγινε η εγκατάσταση των φυτών ...	50
Εικόνα 1.16 Σπέρματα του υβριδίου <i>Solanum lycopersicum</i> L. ‘Ekstasi’ F1, μέσα στο τριβλίο και πριν την τοποθέτησή τους στους μικρούς κύβους πετροβάμβακα.....	50
Εικόνα 1.17 Εμφάνιση κοτυληδόνων (αριστερά) και τοποθέτηση του κάθε μικρού κύβου σε δίσκους για μεγαλύτερη ανάπτυξη του ριζιδίου (δεξιά).....	51
Εικόνα 1.18 Κύβοι πετροβάμβακα με διαστάσεις 7,5x6x7,5 cm, που είχαν υποστεί διαβροχή με θρεπτικό διάλυμα.....	51
Εικόνα 1.19 Εμφάνιση των πρώτων πραγματικών φύλλων.....	52
Εικόνα 1.20 Εγκατάσταση φυτών στις μεγαλύτερες ορθογώνιες πλάκες πετροβάμβακα και τοποθέτησή τους στον θάλαμο του θερμοκηπίου.....	52

Εικόνα 1.21 Απεικόνιση μικροσωλήνων με τις κόκκινες λόγχες που έχουν τοποθετηθεί διαγώνια στον κύβο από πετροβάβακα.....	54
Εικόνα 1.22 Απεικόνιση καρπού υβριδίου ‘Ekstasi F1’ επάνω στο φυτό στον θάλαμο του θερμοκηπίου τού Γ.Π.Α.....	55
Εικόνα 1.23 Απεικόνιση πλάγιου βλαστού που εκφύεται από τη μασχάλη των φύλλων.....	56
Εικόνα 1.24 Απεικόνιση καρουλιών διαφορετικού χρώματος που στερεώνονταν στα οριζόντια σύρματα για να ξεχωρίζουν τα φυτά τής κάθε σειράς.....	57
Εικόνα 1.25 Απεικόνιση του κατακόρυφου σπάγκου με ειδικό πλαστικό ‘πιαστράκι’ για τη στήριξη των φυτών.....	57
Εικόνα 1.26 Ωριμοί καρποί τομάτας αμέσως μετά την συγκομιδή.....	58
Εικόνα 1.27 Απεικόνιση θαλάμου του θερμοκηπίου με τις χρωματικές παγίδες από αριστερά προς τα δεξιά και την φερομονική παγίδα στην άκρη δεξιά.....	60
Εικόνα 1.28 Απεικόνιση ενηλίκων ατόμων τούτας που πιάστηκαν στην φερομονική παγίδα	60
Εικόνα 1.29 Χαρακτηριστικές στοές που δημιουργεί η προνύμφη της τούτας στα φύλλα της τομάτας.....	60
Εικόνα 1.30 Βιολογική αντιμετώπιση της τούτας και του αλευρώδη με αρπακτικό έντομο <i>Nesidiocoris tenuis</i>	61
Εικόνα 1.31 Φασματοφωτόμετρο, Anthos zenith 200rt, που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των νιτρικών.....	62
Εικόνες 1.32 Εμφανής αλλαγή χρώματος μετά που βάλαμε τα διάφορα αντιδραστήρια για τον εντοπισμό του φωσφόρου.....	62
Εικόνα 1.33 Μηχάνημα ατομικής απορρόφησης, AA – 7000, που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του ασβεστίου και του μαγνησίου.....	63
Εικόνα 1.34 Μηχάνημα φλογοφωτομέτρου, Flame Photometer 410, που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του καλίου και του νατρίου.....	64
Εικόνα 1.35 Φορητό όργανο μέτρησης pH (αριστερά) και EC (δεξιά).....	64
Εικόνα 1.36 Ορισμένα δείγματα από την ξηρή βιομάζα των φύλλων.....	66
Εικόνα 1.37 Μηχάνημα LM-112, Linn High Therm που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία τέφρας.....	66
Εικόνα 1.38 Μηχάνημα Tecator Kjeltac 8200 για τον προσδιορισμό του ολικού αζώτου	67

Εικόνα 1.39 Μηχάνημα Labtec SR 210, για χώνευση (αριστερά) και απόσταξη (δεξιά) δείγματος για τον προσδιορισμό του ολικού αζώτου.....67

Εικόνα 1.40 Διαθλασίμετρο που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση των διαλυτών στερεών συστατικών (°Brix), ονομασία: Schmidt & Haensch HR32B.....68

Εικόνα 1.41 Ενδεικτικοί καρποί τομάτας που χρησιμοποιήθηκαν για να μετρηθούν τα °Brix.....68

Εικόνα 1.42 Απεικόνιση χυμού τομάτας για την μέτρηση της οξύτητας των καρπών.....69

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 Μορφές θρεπτικών στοιχείων στα θρεπτικά διαλύματα.....23

Πίνακας 1.2 Λιπάσματα που χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση των θρεπτικών διαλυμάτων.....24

Πίνακας 1.3 Χημική σύνθεση του νερού άρδευση που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή θρεπτικού διαλύματος και του διαλύματος διαβροχής για τις T₁, T₂ και T₃. Η EC δίνεται σε dS m⁻¹, οι συγκεντρώσεις των μακροστοιχείων δίνονται σε mM και των ιχνοστοιχείων μM.....53

Πίνακας 1.4 Μέσο βάρος καρπού (ΜΒΚ), αριθμός καρπών (καρποί ανά τετραγωνικό μέτρο), Ολικά διαλυτά στερεά (°Brix), Τιτλοδοτούμενη οξύτητα (κιτρικό όξύ %), Δείκτης γεύσης στις τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις. Σε κάθε σειρά οι μέσοι που ακολουθούνται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σύμφωνα με το Duncan's multiple range test ($p \leq 0.05$).....77

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. Γράφημα που δείχνει την παραγωγή σε τόνους στην Ευρωπαϊκή Ένωση46

Σχήμα 2. Γραφήματα που δείχνουν την παραγωγή σε τόνους και τις εκτάσεις σε στρέμμα για την υπαίθρια τομάτα στην Ελλάδα.....46

Σχήμα 3. Γραφήματα που δείχνουν την παραγωγή σε τόνους και τις εκτάσεις σε στρέμμα για την θερμοκηπιακή τομάτα στην Ελλάδα.....47

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 1. Εξέλιξη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), του pH, των συγκεντρώσεων των μακροθρεπτικών στοιχείων, του νατρίου (Na^+) και του χλωρίου (Cl^-) σε δείγματα διαλύματος απορροής (Δ.Α.) που συλλέγονται τακτικά από τις τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις κατά τη διάρκεια του πειράματος. Οι οριζόντιες διακεκομμένες γραμμές δείχνουν τις τυπικές τιμές-στόχους (χωρίς αναπροσαρμογή για την αντιστάθμιση της συσσώρευσης Na^+ και Cl^-) για K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , P, SO_4^{2-} και Cl^- στο Δ.Α., ενώ οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές δείχνουν τις αντίστοιχες τιμές-στόχους για την μεταχείριση T₂ που προσομοιώθηκαν από το NUTRISENSE σε κάθε αναπροσαρμογή του διαλύματος συμπλήρωσης. Οι κατακόρυφες ράβδοι υποδηλώνουν ± τυπικά σφάλματα των μέσων όρων και τα διαφορετικά γράμματα σε κάθε ημερομηνία δειγματοληψίας υποδηλώνουν τις σημαντικές διαφορές σύμφωνα με το Duncan's post hoc test ($p \leq 0,05$).....71

Γράφημα 2. Συγκέντρωση μακροθρεπτικών στοιχείων και νατρίου στο 4^ο φύλλο φυτών τομάτας σε πέντε ημερομηνίες δειγματοληψίας κατά τη διάρκεια του πειράματος. Οι συγκεντρώσεις παρουσιάζονται ως ποσοστά στην ξηρή βιομάζα (% w/w). Οι οριζόντιες διακεκομμένες γραμμές δείχνουν το βέλτιστο εύρος-στόχο για κάθε θρεπτικό στοιχείο στον φυτικό ιστό. Οι κατακόρυφες ράβδοι υποδηλώνουν ± τυπικά σφάλματα των μέσων όρων και τα διαφορετικά γράμματα σε κάθε ημερομηνία δειγματοληψίας υποδηλώνουν σημαντικές διαφορές σύμφωνα με το Duncan's post hoc test ($p \leq 0,05$).....75

Γράφημα 3. Εξέλιξη της αθροιστικής συνολικής και εμπορεύσιμης απόδοσης (Kg m^{-2}) κατά την περίοδο συγκομιδής. Οι κατακόρυφες ράβδοι υποδηλώνουν ± τυπικά σφάλματα των μέσων όρων και τα διαφορετικά γράμματα σε κάθε ημερομηνία δειγματοληψίας υποδηλώνουν σημαντικές διαφορές σύμφωνα με το Duncan's post hoc test ($p \leq 0,05$).....76

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Καλλιέργεια εκτός εδάφους: Ορισμός

Με την έννοια «καλλιέργεια εκτός εδάφους» ονομάζεται κάθε τρόπος καλλιέργειας φυτών όπου το ριζικό της σύστημα αναπτύσσεται εκτός του φυσικού εδάφους. Σε αυτές της καλλιέργειες, η παροχή του νερού και των θρεπτικών στοιχείων στα φυτά γίνεται με την χρήση της θρεπτικού διαλύματος που παρασκευάζεται τεχνητά και έπειτα χορηγείται στα φυτά. Οι ρίζες μπορούν να αναπτυχθούν είτε απευθείας στο θρεπτικό διάλυμα, είτε σε πορώδη στερεά υλικά, τα οποία ονομάζονται υποστρώματα και η διαβροχή της με θρεπτικό διάλυμα γίνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα, ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες των φυτών για άρδευση (Σάββας, 2012).

1.2 Ιστορικά στοιχεία καλλιέργειας εκτός εδάφους

Η καλλιέργεια των φυτών εκτός του φυσικού εδάφους είχε πραγματοποιηθεί από αρχαιοτάτους χρόνους. Ένα από τα πιο γνωστά παραδείγματα είναι οι Κρεμαστοί Κήποι της Βαβυλώνας (290 π.Χ.), όπου η ανάπτυξη των φυτών γινόταν πάνω σε αναβαθμίδες, οι οποίες περιείχαν μείγμα από άμμο και χώμα. Μία άλλη αναφορά για την καλλιέργεια εκτός εδάφους είναι από τον Ιρλανδό Robert Boyle, γύρω στο 1666, ο οποίος καλλιεργήσε κάποια είδη φυτών σε φυτοδοχεία, της *Raphanus aquaticus*, μέντα κ.ά., των οποίων οι ρίζες βρίσκονταν μέσα σε φυσικό νερό και δεν υπήρχε κάποιο στερεό μέσο ανάπτυξης (Raviv et al., 2019).



Εικόνα 1.1 Απεικόνιση των Κρεμαστών κήπων της Βαβυλωνίας

Εκείνοι οι οποίοι έφτιαξαν πρώτοι τα θρεπτικά διαλύματα ήταν οι γερμανοί φυσιολόγοι Sachs (1859,1861) και Κνορ (1859). Κατάφεραν, δηλαδή, να καλλιεργήσουν φυτά, μέσα στα θρεπτικά διαλύματα, προσδιορίζοντας ποια είναι τα απαραίτητα ανόργανα στοιχεία για τα φυτά και σε ποιες ποσότητες τα χρειάζονται, ώστε να μπορέσουν να αναπτυχθούν και να ολοκληρώσουν, επιτυχώς, τον βιολογικό της κύκλο. Οι έρευνες αυτών των φυσιολόγων δεν αποτέλεσαν μόνο την αρχή της υδροπονίας, αλλά ήταν κάτι επαναστατικό για την διατροφή των φυτών, ώστε να συνεχιστεί και από της επιστήμονες, της ο McCal (1916).

Εκτός από της δύο φυσιολόγους, η επιστήμη της θρέψης των φυτών αξιοποιήθηκε και από τον αμερικανό καθηγητή Gericke (1929), ο οποίος επιχείρησε να καλλιεργήσει εκτός εδάφους ανθοκομικά και λαχανοκομικά είδη στο πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας. Δεν εφαρμόστηκε, της, ιδιαίτερα, λόγω του υψηλού κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας που είχε, καθώς και της όχι και τόσο καλής παραγωγής συγκριτικά με την παραγωγή των λαχανοκομικών και ανθοκομικών ειδών στο έδαφος.

Μία άλλη πρακτική εφαρμογή που είχε η υδροπονία ήταν κατά την διάρκεια του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου από τον αμερικανικό στρατό. Συγκεκριμένα, η χρήση της ήταν εκτεταμένη στα νησιά του Ειρηνικού, τα οποία ήταν άγονα και ο στόχος ήταν να παραχθούν νωπά λαχανικά, για να μπορέσουν να καλυφθούν οι ανάγκες που είχε ο στρατός σε τρόφιμα. Μέχρι και τα τέλη της δεκαετίας του '60, η εφαρμογή της υδροπονίας ήταν περιορισμένη και οι χώρες εκείνες που την χρησιμοποιούσαν ήταν κυρίως η Αμερική και η Αγγλία. Της αρχές, της, της δεκαετίας του '70 αυξήθηκε εμπορικά το ενδιαφέρον, τόσο στην Ολλανδία, όσο και της Σκανδιναβικές χώρες (Σάββας, 2012).

1.3 Υδροπονία: Ορισμός

Η λέξη υδροπονία παράγεται από δύο λέξεις: την λέξη «ύδωρ», που σημαίνει νερό και την λέξη «πόνος», που σημαίνει εργασία, δηλαδή η εργασία που γίνεται με το νερό. Με την έννοια «υδροπονία» καλείται κάθε μέθοδος καλλιέργειας των φυτών, που το ριζικό της σύστημα αναπτύσσεται εκτός του φυσικού εδάφους. Συχνά, η έννοια αυτή αναφέρεται και ως καλλιέργεια εκτός εδάφους.

Της αναφέρθηκε και παραπάνω, στον ορισμό τής καλλιέργειας εκτός εδάφους, έτσι και στην υδροπονία, η θρέψη των φυτών καλύπτεται από ένα θρεπτικό διάλυμα, το οποίο είναι τεχνητό και παρέχει στα φυτά όλα τα θρεπτικά στοιχεία και το νερό που χρειάζονται. Οι ρίζες των φυτών μπορούν να αναπτυχθούν ή απευθείας στο θρεπτικό διάλυμα ή μέσα σε πορώδη υποστρώματα. Τα πορώδη αυτά υποστρώματα διαβρέχονται σε τακτά χρονικά διαστήματα και καλύπτουν πλήρως της ανάγκες των φυτών και σε θρεπτικά στοιχεία, αλλά και σε νερό. Οι υδροπονικές καλλιέργειες που χρησιμοποιούν υποστρώματα λέγονται «καλλιέργειες σε υπόστρωμα» και οι υδροπονικές καλλιέργειες των οποίων οι ρίζες αναπτύσσονται απευθείας μέσα σε θρεπτικό διάλυμα, το οποίο μπορεί να είναι είτε στάσιμο, είτε ρέον, λέγονται «καλλιέργειες σε θρεπτικό διάλυμα ή υδροκαλλιέργειες» (Σάββας, 2012).



Εικόνα 1.2 Υδροπονική καλλιέργεια τομάτας, στην Ολλανδία, σε υπόστρωμα πετροβάμβακα



Εικόνα 1.3 Υδροπονική καλλιέργεια μαρουλιού σε σύστημα επίπλευσης (Floating System) όπου το ριζικό σύστημα βρίσκεται απευθείας μέσα στο θρεπτικό διάλυμα

1.4 Σημαντικές έννοιες για την υδροπονική καλλιέργεια

1.4.1 Θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας

Στην υδροπονία, της αναφέραμε και παραπάνω, το ριζικό σύστημα των φυτών μπορεί να βρίσκεται είτε απευθείας μέσα σε ένα θρεπτικό διάλυμα, είτε μέσα σε στερεά υλικά, τα λεγόμενα υποστρώματα. Το θρεπτικό αυτό διάλυμα περιέχει όλα τα ανόργανα θρεπτικά στοιχεία που θεωρούνται απαραίτητα για να μπορέσουν να αναπτυχθούν τα φυτά και να μπορέσουν να ολοκληρώσουν επιτυχώς τον βιολογικό της κύκλο. Τα θρεπτικά αυτά στοιχεία διαλύονται στο νερό, χορηγούνται στα φυτά μέσω της άρδευσης και είναι σε μορφή ευδιάλυτων ιόντων ανόργανων αλάτων ή ενώσεων, της είναι το βόριο ή ο σίδηρος, στην περίπτωση των ιχνοστοιχείων (Σάββας, 2012).



Εικόνα 1.4 Δημιουργία θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας

Για την εξασφάλιση της ποιότητας του θρεπτικού διαλύματος χρησιμοποιούνται δύο βασικά μεγέθη, το pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία συμβολίζεται ως EC (Electrical Conductivity). Το pH, ή, αλλιώς, η οξύτητα των θρεπτικών διαλυμάτων, σχετίζεται με την περιεκτικότητα της διαλύματος σε ιόντα υδρογόνου, διαμορφώνεται από τη συγκέντρωση του ανθρακικού οξέως (H_2CO_3) σε αυτό και προκύπτει από τη διαλυτοποίηση του CO_2 και την διάσταση των ιόντων HCO_3^- και CO_3^{2-} . Το pH, της, θα πρέπει να βρίσκεται εντός κάποιων επιθυμητών ορίων

στα θρεπτικά διαλύματα, δηλαδή, μεταξύ των τιμών 5 και 6. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) σχετίζεται με την περιεκτικότητα του υποστρώματος σε ανόργανα άλατα και συμβολίζεται ως dS m^{-1} . Η ηλεκτρική αγωγιμότητα δεν δίνει πληροφορίες για το είδος των αλάτων που βρίσκονται διαλυμένα μέσα σε ένα θρεπτικό διάλυμα, αλλά για την συνολική της συγκέντρωση και επηρεάζεται από της συγκεντρώσεις των ιόντων των κύριων θρεπτικών στοιχείων που βρίσκονται μέσα στο θρεπτικό διάλυμα. Το pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) χρησιμοποιούνται για να δείξουν την καταλληλότητα του θρεπτικού διαλύματος, με εύκολο και γρήγορο τρόπο, χρησιμοποιώντας τα φορητά όργανα που υπάρχουν και απεικονίζονται της παρακάτω εικόνες (Σάββας, 2012).



Εικόνα 1.5 Φορητό όργανο για την μέτρηση του pH, ονομασία φορητού οργάνου: HI8424



Εικόνα 1.6 Φορητό όργανο για την μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), ονομασία φορητού οργάνου: HI98311 DiST 5, Hanna

1.4.2 Εγκατάσταση για την παροχή νερού

Η εγκατάσταση που παρέχει το νερό, για την δημιουργία των θρεπτικών διαλυμάτων, μπορεί να προέρχεται ή από μία γεώτρηση ή από μία σύνδεση με κάποιο τοπικό δίκτυο άρδευσης ή από ένα πηγάδι ή από μία πηγή κ.ά. Η ποιότητα, όμως, αυτού του νερού θα πρέπει να είναι καλή και να μην περιέχει πολλά άλατα. Επίσης, τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για την εγκατάσταση, όπως είναι για παράδειγμα οι σωληνώσεις, θα πρέπει να μην απελευθερώνουν στο νερό ουσίες ή ιόντα, όπως για παράδειγμα ο ψευδάργυρος (Zn), σε ποσότητες τέτοιες που υπάρχει κάποιος κίνδυνος να δημιουργηθούν τοξικότητες στα φυτά. Στην περίπτωση που το νερό δεν είναι καλής ποιότητας, τότε προτείνεται η συλλογή τού νερού τής βροχής, είτε από την οροφή τού θερμοκηπίου, είτε με την χρήση κάποιων υδρορροών κι έτσι να μαζεύεται και τελικά να μεταφέρεται σε μια δεξαμενή αποθήκευσης. Στην περίπτωση, όμως, που το νερό άρδευσης περιέχει πολλά άλατα, τότε είναι καλό να υπάρχει κάποιος εξοπλισμός, όπως είναι τα φίλτρα νερού, ώστε να ελέγχεται, μέσω κάποιων φίλτρων, το νερό και να μπορεί να παραμένει καθαρό για να χορηγηθεί στην καλλιέργεια (Μαυρογιαννόπουλος, 2006, Σάββας, 2012).

1.4.3 Δοχεία για πυκνά διαλύματα

Στις υδροπονικές καλλιέργειες, για την δημιουργία τού θρεπτικού διαλύματος χρησιμοποιούνται λιπάσματα που βρίσκονται σε δοχεία με χωρητικότητα από 50 έως 1000 λίτρα (L) ή κάποιες φορές χρησιμοποιούνται και δοχεία μεγαλύτερης χωρητικότητας. Στα δοχεία προστίθεται το φυσικό νερό, το οποίο θα είναι σε ανάλογη ποσότητα με την χωρητικότητα που θα έχει το δοχείο. Τα λιπάσματα, που θα χρησιμοποιηθούν, θα πρέπει να έχουν υψηλή υδατοδιαλυτότητα, ώστε να μπορέσουν να διαλυθούν και, στο τέλος, να προκύψει ένα διάλυμα λιπασμάτων που θα βρίσκεται σε υγρή μορφή. Σχετικά με τις ποσότητες των λιπασμάτων, θα πρέπει να είναι 100πλάσιες ή 200πλάσιες από αυτές που απαιτούνται, ώστε να μπορέσουν δημιουργηθούν οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων που είναι απαραίτητες για την θρέψη των φυτών. Τα διαλύματα των λιπασμάτων που θα προκύψουν ονομάζονται πυκνά διαλύματα ή, αλλιώς, μητρικά διαλύματα και τα δοχεία που περιέχουν αυτά τα πυκνά διαλύματα ονομάζονται δοχεία πυκνών διαλυμάτων ή δοχεία μητρικών διαλυμάτων αντίστοιχα. Τα πυκνά διαλύματα θα πρέπει πρώτα να αραιώνονται, είτε με τρόπο χειρωνακτικό, είτε αυτόματα, με την χρήση των κεφαλών υδρολίπανσης, σε έναν επιθυμητό βαθμό και έπειτα να μεταφέρονται στα φυτά για να μπορέσουν να

καλυφθούν οι ανάγκες τους για θρέψη (Σάββας, 2012). Αυτός ο τρόπος της παρασκευής των πυκνών διαλυμάτων και της αραιώσής τους γίνεται για την εξοικονόμηση χώρου, αφού σε έναν συγκεκριμένο χώρο μπορούν να αποθηκευτούν 100πλάσιες ή, ακόμη, και 200πλάσιες ποσότητες θρεπτικών διαλυμάτων συγκριτικά με εκείνες που θα μπορούσαν να αποθηκευτούν αν ήταν αραιωμένο, εξ αρχής, το θρεπτικό διάλυμα. Επιπλέον, αυτό γίνεται και για την εξοικονόμηση εργατικών χεριών, αφού, με αυτόν τον τρόπο, δεν χρειάζεται συνέχεια να ζυγίζονται τα λιπάσματα και μετά να μεταφέρονται στα δοχεία για την ανάδυσή τους κ.ο.κ., οπότε, με αυτόν τον τρόπο, μειώνονται και οι ανάγκες για την συχνή παρασκευή θρεπτικού διαλύματος.

Για την δημιουργία τού θρεπτικού διαλύματος θα πρέπει να χρησιμοποιούνται τουλάχιστον δύο δοχεία πυκνών διαλυμάτων, επειδή το νιτρικό ασβέστιο δεν μπορεί να τοποθετηθεί στο ίδιο δοχείο με τα φωσφορικά και με τα θειικά λιπάσματα σε μεγάλες συγκεντρώσεις. Αν τοποθετηθούν μαζί, τότε θα προκληθεί κατακρήμνιση των φωσφορικών και θεικών αλάτων τού ασβεστίου εξαιτίας τής χαμηλής διαλυτότητας αυτών των αλάτων. Ακόμη, χρησιμοποιείται και ένα τρίτο δοχείο πυκνού διαλύματος στο οποίο τοποθετείται μόνο το οξύ, το οποίο είναι συνήθως νιτρικό οξύ (HNO_3) και χρησιμοποιείται για την ρύθμιση του pH.

Στο πρώτο δοχείο, στο δοχείο Α, τοποθετείται το νιτρικό ασβέστιο μαζί με το νιτρικό αμμώνιο και τον χηλικό σίδηρο. Στο δεύτερο δοχείο, στο δοχείο Β, τοποθετείται το θειικό κάλιο, το θειικό μαγνήσιο το φωσφορικό μονοαμμώνιο, το φωσφορικό μονοκάλιο, το φωσφορικό οξύ και τα ιχνοστοιχεία, εκτός του χηλικού σιδήρου, οποίος τοποθετήθηκε στο δοχείο Α.

Τα δοχεία στα οποία βρίσκονται τα πυκνά διαλύματα συνδέονται με ένα σύστημα μείξης που αραιώνει τα Α και Β πυκνά διαλύματα μαζί με νερό και η αραιώση αυτή γίνεται συνήθως στην ίδια αναλογία. Οι πιο συνηθισμένες αναλογίες συγκέντρωσης των θρεπτικών στοιχείων για τα αραιά και τα μητρικά διαλύματα είναι μεταξύ 1:100 και 1:200 (Van Os et al., 2019). Τα πυκνά διαλύματα δεν μπορούν να συμπυκνωθούν περισσότερο λόγω των ορίων που βάζει η διαλυτότητα των λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται. Στο τέλος, λοιπόν, δημιουργείται ένα αραιό διάλυμα που χορηγείται στα φυτά με την χρήση μιας αντλίας. Στην περίπτωση που υπάρχει ξεχωριστό δοχείο για το οξύ, τότε η μείξη τού νερού με τα πυκνά διαλύματα γίνεται με την χρήση τής κεφαλής υδρολίπανσης και παρέχεται, με αυτόν τον τρόπο, η

κατάλληλη ποσότητα οξέως στο αραιό διάλυμα, ώστε να ρυθμιστεί το pH και να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή του (Σάββας, 2012).



Εικόνα 1.7 Πολλαπλά δοχεία πυκνών διαλυμάτων

1.4.4 Χαρακτηριστικά θρεπτικών διαλυμάτων

Για την ομαλή ανάπτυξη των φυτών και την σωστή ολοκλήρωση του βιολογικού τους κύκλου απαιτούνται 16 χημικά στοιχεία. Από αυτά τα στοιχεία, τα 9 είναι τα μακροστοιχεία, που βρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες, όπως ο άνθρακας, το οξυγόνο, το υδρογόνο, ο φώσφορος, το άζωτο, το μαγνήσιο, το κάλιο, το θείο και το ασβέστιο και τα 7 είναι τα ιχνοστοιχεία, που βρίσκονται σε αρκετά μικρότερες ποσότητες, όπως ο σίδηρος, το μαγγάνιο, ο ψευδάργυρος, ο χαλκός, το βόριο, το μολυβδαίνιο και το χλώριο. Όλα τα θρεπτικά στοιχεία, εκτός από τον άνθρακα, που είναι αναγκαία για τα φυτά, βρίσκονται διαλυμένα στο εδαφικό νερό και από εκεί τα φυτά τα προσλαμβάνουν με την βοήθεια των ριζών τους. Αν όλα αυτά τα απαραίτητα στοιχεία προστεθούν στο νερό, στις σωστές ποσότητες, τότε θα προκύψει ένα διάλυμα το οποίο θα ονομάζεται θρεπτικό διάλυμα και θα μπορεί να καλύπτει πλήρως τις ανάγκες τού φυτού για θρέψη. Τα θρεπτικά αυτά διαλύματα πρέπει να διαθέτουν όλα τα ανόργανα θρεπτικά στοιχεία που είναι αναγκαία για την ανάπτυξη των φυτών, χωρίς τον άνθρακα, ο οποίος προσλαμβάνεται από την ατμόσφαιρα με την μορφή τού διοξειδίου τού άνθρακα. Το υδρογόνο και το οξυγόνο περιέχονται στο νερό, αλλά το οξυγόνο προσλαμβάνεται και από την ατμόσφαιρα για την διαδικασία τής αναπνοής. Το χλώριο βρίσκεται σχεδόν πάντα στο νερό που χρησιμοποιείται για την δημιουργία τού θρεπτικού διαλύματος, αλλά και στις προσμείξεις που γίνονται με τα λιπάσματα.

Οπότε, από τα 16 χημικά στοιχεία που είναι σημαντικά για την ανάπτυξη των φυτών, μόνο τα 12 πρέπει να προστίθενται στο νερό καθώς παρασκευάζεται το θρεπτικό διάλυμα. Δηλαδή, από τα μακροστοιχεία είναι το άζωτο, ο φώσφορος, το κάλιο, το ασβέστιο, το μαγνήσιο και το θείο και από τα ιχνοστοιχεία είναι ο σίδηρος, το μαγγάνιο, ο ψευδάργυρος, ο χαλκός, το βόριο και το μολυβδαίνιο.

Για την σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος και την τελική χορήγησή του στα φυτά θα πρέπει πρώτα να καθορισθεί η επιθυμητή του σύνθεση, είτε σύμφωνα με τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου φυτικού είδους, της δεδομένης υδροπονικής καλλιέργειας σε θρεπτικά στοιχεία, είτε σύμφωνα με ορισμένες έρευνες που έχουν γίνει. Είναι κατανοητό, λοιπόν, ότι ανάλογα με τις ανάγκες των διαφόρων φυτικών ειδών σε θρεπτικά στοιχεία διαφοροποιείται και η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος. Η διαφοροποίηση, επίσης, του θρεπτικού διαλύματος εξαρτάται και από τα διαφορετικά στάδια ανάπτυξης του φυτού, λόγω του ότι οι ανάγκες, ακόμη και των ίδιων φυτικών ειδών, σε θρεπτικά στοιχεία, αλλάζουν αναλόγως από το στάδιο ανάπτυξης στο οποίο βρίσκονται. Αυτό συμβαίνει είτε γιατί, όσο αναπτύσσονται τα φυτά, τόσο αλλάζουν και οι ανάγκες τους για θρέψη, είτε γιατί αλλάζουν οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούν μέσα στο θερμοκήπιο (Σάββας, 2012).

Για να μπορέσει να χαρακτηριστεί ένα θρεπτικό διάλυμα ως πλήρες στην σύνθεσή του και για να χορηγηθεί, στη συνέχεια, στα φυτά, θα πρέπει να έχει τις κατάλληλες τιμές, που ονομάζονται τιμές – στόχοι και θα πρέπει, αυτές οι τιμές – στόχοι, να έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Την τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με τις συνολικές συγκεντρώσεις των αλάτων μέσα στο θρεπτικό διάλυμα.
- Την τιμή του pH στο θρεπτικό διάλυμα.
- Τα επίπεδα K, Ca και Mg μέσα στο θρεπτικό διάλυμα, είτε ως αναλογία που μετριέται σε mmol/mmol και συμβολίζεται ως X:Y:Z, είτε ως συγκεντρώσεις, που μετριούνται σε mmol/L, για το κάθε ένα μακροστοιχείο (κατιόν).
- Τον καθορισμό των επιπέδων του αζώτου μέσα στο θρεπτικό διάλυμα, είτε ως αναλογία ολικού αζώτου προς καλίου (N/K), που μετριέται σε mmol/mmol, είτε ως συγκεντρώσεις αζωτούχων ιόντων, που μετριούνται σε mmol/L.
- Την συγκέντρωση των φωσφορικών ιόντων σε mmol/L

- Τις συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων, του σιδήρου (Fe), του μαγγανίου (Mn), του ψευδαργύρου (Zn), του χαλκού (Cu), του βορίου (B) και του μολυβδαινίου (Mo), που μετριοούνται σε μmol/L.

Στον παρακάτω πίνακα, στον Πίνακα 1.1, παρουσιάζονται οι μορφές των θρεπτικών στοιχείων με τις οποίες βρίσκονται στα θρεπτικά διαλύματα.

Πίνακας 1.1 Μορφές θρεπτικών στοιχείων στα θρεπτικά διαλύματα

Μακροστοιχεία	Χημική Μορφή
Άζωτο	NO_3^- , NH_4^+
Φώσφορος	H_2PO_4^-
Μαγνήσιο	Mg^{2+}
Ασβέστιο	Ca^{2+}
Κάλιο	K^+
Θείο	SO_4^{2-}
Ιχνοστοιχεία	
Σίδηρος	Fe^{2+}
Μαγγάνιο	Mn^{2+}
Ψευδάργυρος	Zn^{2+}
Χαλκός	Cu^{2+}
Βόριο	H_3BO_3
Μολυβδαίνιο	MoO_4

1.4.5 Χρησιμοποιούμενα λιπάσματα

Για να μπορέσει να γίνει, λοιπόν, η σύνθεση και να δημιουργηθούν τα θρεπτικά διαλύματα, θα πρέπει πρώτα να διαλυθούν κάποια λιπάσματα, που θα είναι εύκολα διαλυτοποιήσιμα στο νερό. Τα λιπάσματα αυτά, με την μορφή που βρίσκονται και χρησιμοποιούνται, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, στον Πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.2 Λιπάσματα που χρησιμοποιούνται για την σύνθεση των θρεπτικών διαλυμάτων

Λίπασμα	Χημικός τύπος	Θρεπτικά στοιχεία (%)	Μοριακό Βάρος
Νιτρικό αμμώνιο	NH_4NO_3	N: 35	80,0
Νιτρικό ασβέστιο	$5[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]\text{NH}_4\text{NO}_3$	N:15,5, Ca: 19	1080,5
Νιτρικό κάλιο	KNO_3	N: 13, K: 38	101,1
Νιτρικό μαγνήσιο	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	N: 11, Mg: 9	256,3
Νιτρικό οξύ	HNO_3	N: 22	63,0
Φωσφορικό μονοαμμώνιο	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	N: 12, P: 27	115,0
Φωσφορικό μονοκάλιο	KH_2PO_4	P: 23, K: 28	136,1
Φωσφορικό οξύ	H_3PO_4	P: 32	98,0
Θειικό κάλιο	K_2SO_4	K: 45, S: 18	174,3
Θειικό μαγνήσιο	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Mg: 9,7, S: 13	246,3
Χηλικός σίδηρος	διαφόρων χημικών τύπων	Fe: 6-13	–
Θειικό μαγγάνιο	$\text{nSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Mn: 32	169,0
Θειικός ψευδάργυρος	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Zn: 23	287,5
Θειικός χαλκός	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Cu: 25	249,7
Βόρακας	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	B: 11	381,2
Βορικό οξύ	H_3BO_3	B: 17,5	61,8
Οκταβορικό νάτριο	$\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	B: 20,5	412,4
Μολυβδαινικό αμμώνιο	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Mo: 54	1163,3
Μολυβδαινικό νάτριο	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Mo: 40	241,9

1.4.6 Αραίωση πυκνών διαλυμάτων

Τα πυκνά διαλύματα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, δεν μπορούν να χορηγηθούν απευθείας, μετά την δημιουργία τους, στα φυτά, οπότε χρειάζεται πρώτα να γίνει η αραίωσή τους. Η αραίωση των πυκνών διαλυμάτων, λοιπόν, πραγματοποιείται με δύο τρόπους, είτε χειρωνακτικά, είτε αυτόματα.

1.4.6.1 Χειρωνακτική αραίωση πυκνών διαλυμάτων

Η χειρωνακτική αραίωση γίνεται στην περίπτωση που η υδροπονική μονάδα είναι μικρή και δεν υπάρχει το περιθώριο ύπαρξης της εγκατάστασης της αυτόματης αραίωσης, αλλά μπορεί να υπάρχει μία μεγάλη δεξαμενή στην οποία δημιουργείται το θρεπτικό διάλυμα με χειρωνακτικό τρόπο. Το θρεπτικό διάλυμα παρασκευάζεται ρίχνοντας, μέσα στη δεξαμενή, τις αναγκαίες ποσότητες των πυκνών διαλυμάτων και, έπειτα, γεμίζουμε την δεξαμενή με νερό. Για να μπορέσει να μετρηθεί με ακρίβεια ο όγκος των πυκνών διαλυμάτων χρησιμοποιούνται ογκομετρικά δοχεία ή δοσομετρικές αντλίες. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται ογκομετρικά δοχεία, η μεταφορά των πυκνών διαλυμάτων από τα δοχεία στα οποία βρίσκονται προς την δεξαμενή γίνεται με χειρωνακτικό τρόπο, οπότε είναι κατανοητό ότι καταβάλλεται και μια αντίστοιχη προσπάθεια από το εργατικό προσωπικό τού θερμοκηπίου. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται δοσομετρικές αντλίες, η έγχυση των πυκνών διαλυμάτων μπορεί να γίνει πάλι χειροκίνητα ή αυτόματα με την χρήση ενός κατάλληλου προγραμματιστή. Το νερό που θα εισαχθεί μέσα στην δεξαμενή θα πρέπει να εισέρχεται με ορισμένη πίεση, ώστε να μπορέσουν να διαλυθούν τα πυκνά διαλύματα μέσα εκεί. Για την επιδίωξη μεγαλύτερης ακρίβειας στην αραίωση του νερού με τα πυκνά διαλύματα προτείνεται μία, κατ' όγκο, βαθμολόγηση της δεξαμενής με μία κατακόρυφη κλίμακα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1.8 Δεξαμενή χειρωνακτικής αραίωσης πυκνών διαλυμάτων

1.4.6.2 Αυτόματη αραίωση πυκνών διαλυμάτων

Η αυτόματη αραίωση των πυκνών διαλυμάτων γίνεται με την χρήση μίας κεφαλής υδρολίπανσης, που είναι εγκατεστημένη ή σε ένα σύστημα αυτοσχέδιο, το οποίο αποτελείται από μία ή περισσότερες δοσομετρικές αντλίες ή σε μία εγκατάσταση, η οποία είναι προκατασκευασμένη. Η κεφαλή υδρολίπανσης αραιώνει, με αυτόματο τρόπο, τα πυκνά διαλύματα και μόλις δημιουργηθεί το αραιωμένο, τελικά, θρεπτικό διάλυμα, τότε αυτό θα μεταφερθεί στα φυτά με την χρήση ενός αρδευτικού συστήματος. Οι δοσομετρικές αντλίες, στα αυτοσχέδια συστήματα, χρησιμοποιούνται όταν οι θερμοκηπιακές μονάδες δεν είναι μεγάλης έκτασης ή όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα απόκτησης του κατάλληλου εξοπλισμού, λόγω του αυξημένου κόστους. Επειδή, όμως, αυτές οι δοσομετρικές αντλίες έχουν περιορισμένες δυνατότητες, οι περισσότερες μονάδες υδροπονικών καλλιεργειών χρησιμοποιούν κεφαλές υδρολίπανσης που είναι προκατασκευασμένες και διαθέτουν όλα τα στοιχεία που είναι απαραίτητα για την δημιουργία τού θρεπτικού διαλύματος. Στην περίπτωση που η κεφαλή υδρολίπανσης είναι προκατασκευασμένη, τότε διαχωρίζεται σε δύο

συστήματα: 1) στο υδραυλικό σύστημα όπου αραιώνονται, με συντονισμένο τρόπο, τα πυκνά διαλύματα και το οξύ και 2) στο ηλεκτρονικό σύστημα, στο οποίο η κεφαλή υδρολίπανσης λειτουργεί αυτόματα. Το ηλεκτρονικό σύστημα, το οποίο είναι και το πιο συνηθισμένο στις σύγχρονες κεφαλές υδρολίπανσης, διαθέτει δύο αισθητήρες που ο ένας είναι για τον έλεγχο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) και ο άλλος είναι για τον έλεγχο του pH στο θρεπτικό διάλυμα που προκύπτει. Οι δύο αυτοί αισθητήρες ρυθμίζουν συνεχώς τις τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και του pH καθώς παρασκευάζεται το θρεπτικό διάλυμα και αυτόματα μεταφέρουν τα δεδομένα στο σύστημα ελέγχου. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται και η ρύθμιση, με αυτόματο τρόπο, των αναλογιών αραιώσης των πυκνών διαλυμάτων με το νερό (Σάββας, 2012).



Εικόνα 1.9 Δεξαμενή αυτόματης αραιώσης πυκνών διαλυμάτων



Εικόνα 1.10 Σύγχρονη κεφαλή υδρολίπανσης, σε ηλεκτρονικό σύστημα, για τη σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος

1.5 Υδροπονική καλλιέργεια με τη χρήση υποστρωμάτων

Σε μία υδροπονική καλλιέργεια αντί του εδάφους χρησιμοποιείται το υπόστρωμα. Υπόστρωμα ονομάζεται κάθε φυσικό ή επεξεργασμένο, με βιομηχανικό τρόπο, υλικό, που είναι πορώδες και το οποίο μπορεί να συγκρατεί νερό και αέρα, ώστε να μπορούν να αναπτυχθούν με σωστό τρόπο τα φυτά. Το υπόστρωμα είναι ένα υποκατάστατο του εδάφους, οπότε θα πρέπει να εκτελεί τις λειτουργίες που έκανε και το έδαφος, δηλαδή να παρέχει στα φυτά οξυγόνο, να τα τροφοδοτεί με νερό, να επιτυγχάνει την θρέψη τους και να τους προσφέρει στήριξη (Σάββας, 2012). Τα υποστρώματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στα χημικά αδρανή και στα χημικά ενεργά. Στα χημικά αδρανή συγκαταλέγονται ο πετροβάμβακας, ο περλίτης και η ελαφρόπετρα, ενώ στα χημικά ενεργά συγκαταλέγονται η τύρφη, η κομπόστα και οι φλοιοί δένδρων (Σάββας, 2012, Gruda, 2020). Η δυνατότητα καλλιέργειας εκτός εδάφους, με την χρήση των υποστρωμάτων, μας βοηθά να βελτιώσουμε τις συνθήκες στο ριζικό περιβάλλον των φυτών, είτε φυσικές, είτε χημικές, χωρίς να επηρεάζονται αρνητικά οι αποδόσεις που θα έχουν τα φυτά (Savvas & Gruda, 2018).



Εικόνα 1.11 Απεικόνιση ριζών μέσα στην ορθογώνια πλάκα του πετροβάμβακα

1.6 Διάλυμα απορροής

Διάλυμα απορροής ονομάζεται εκείνη η ποσότητα του θρεπτικού διαλύματος που περισσεύει και απορρέει από την καλλιέργεια. Δηλαδή, η ποσότητα που δεν συγκρατείται από το υπόστρωμα, ούτε απορροφάται από τα φυτά κι έτσι βγαίνει έξω από τις σχισμές που έχουν οι σάκοι ή τα δοχεία που περιέχουν το κάθε υπόστρωμα. Κλάσμα απορροής καλείται ο λόγος τού όγκου τού απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος προς τον όγκο εκείνο τού θρεπτικού διαλύματος που χορηγείται στην εκάστοτε καλλιέργεια. Η αποδεκτή τιμή που θα πρέπει να έχει ένα κλάσμα απορροής για μία υδροπονική καλλιέργεια θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0,25 με 0,35 (Σάββας, 2012). Αφού παρέχεται στις καλλιέργειες μεγαλύτερη ποσότητα θρεπτικού διαλύματος από αυτό που χρειάζονται, ώστε να προκύπτει η απορροή, τότε οι ανάγκες των φυτών, σε θρεπτικά στοιχεία και νερό, καλύπτονται και με το παραπάνω. Επίσης, σε ικανοποιητικό βαθμό πραγματοποιείται και η έκπλυση των αλάτων, με αποτέλεσμα να μην προκύπτουν προβλήματα συγκέντρωσής τους στα υποστρώματα και κατ' επέκταση, να μην δημιουργείται κάποιο πρόβλημα αλατότητας. Τα δύο μεγέθη που είναι σημαντικά για το διάλυμα απορροής, όπως και για το διάλυμα τροφοδοσίας στα φυτά και που πρέπει να ελέγχονται σε τακτά χρονικά διαστήματα είναι το pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), αφού δίνουν πληροφορίες για το διάλυμα στο χώρο των ριζών (Savvas & Gruda, 2018).

Πριν πραγματοποιηθεί η φύτευση των φυτών, τα υποστρώματα γεμίζονται με το λεγόμενο «διάλυμα διαβροχής», το οποίο, όμως, δεν απορρέει μέχρις ότου να

διαβρεχτούν τα υποστρώματα. Μετά που θα γίνει η φύτευση και θα έχει ολοκληρωθεί η διαβροχή των υποστρωμάτων, τότε πραγματοποιούνται σχισίματα στους σάκους, ένα στον κάθε σάκο κι έτσι απορρέει το περισσευούμενο διάλυμα. Με αυτόν τον τρόπο, εισέρχεται ο αέρας στις ρίζες κι έτσι μπορεί να περνάει το οξυγόνο. Τα σχισίματα στους σάκους θα πρέπει να γίνονται στο κάτω μέρος για να μπορεί να στραγγίσει όλη η ποσότητα του διαλύματος. Το κάθε υπόστρωμα θα πρέπει να έχει τέτοιο ύψος, ώστε να μπορεί να πραγματοποιείται η απορροή, αλλά και να μπορεί να συγκρατείται η υγρασία σε ικανοποιητικό βαθμό. Στην περίπτωση, λοιπόν, που τα υποστρώματα είναι χονδρόκοκκα, τότε αυτά θα τοποθετηθούν σε πιο λεπτές στρώσεις συγκριτικά με τα λεπτόκοκκα (Heller et al, 2015).

1.7 Συστήματα υδροκαλλιέργειας

Από τα συστήματα υδροκαλλιέργειας, αυτά που είναι πιο σημαντικά και που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι η καλλιέργεια σε σύστημα επίπλευσης ή αλλιώς το λεγόμενο «Floating System», η καλλιέργεια σε λεπτό στρώμα θρεπτικού διαλύματος ή αλλιώς το λεγόμενο «NFT» και η λεγόμενη αεροπονία. Το κοινό χαρακτηριστικό αυτών των συστημάτων καλλιέργειας είναι ότι το ριζικό σύστημα των φυτών δεν βρίσκεται μέσα σε υποστρώματα, δηλαδή, μέσα σε πορώδη υλικά, αλλά βρίσκονται απευθείας μέσα στο θρεπτικό διάλυμα. Αυτά τα καλλιεργητικά συστήματα χρησιμοποιούν πολύ μεγάλο όγκο θρεπτικού διαλύματος, πολύ μεγαλύτερο από αυτόν που χρειάζονται τα φυτά, οπότε το απορρέον θρεπτικό διάλυμα θα πρέπει να ανακυκλώνεται, αφού πρώτα, όμως, συμπληρωθεί με το νερό και με τα θρεπτικά στοιχεία. Στο σύστημα επίπλευσης (Floating System) οι ρίζες των φυτών βρίσκονται μέσα σε μεγάλες δεξαμενές. Σε αυτές τις δεξαμενές τα φυτά βρίσκονται πάνω σε ελαφριές πλάκες και οι ρίζες τους βρίσκονται κάτω από αυτές και μέσα στο θρεπτικό διάλυμα, το οποίο εμπλουτίζεται με αέρα για να υπάρχει οξυγόνο στη ρίζα. Στο σύστημα NFT, οι ρίζες των φυτών βρίσκονται μέσα σε αγωγούς στους οποίους ρέει το θρεπτικό διάλυμα σε ένα λεπτό στρώμα και η αεροπονία, όπου οι ρίζες των φυτών αιωρούνται σε σωλήνες ή κιβώτια και ψεκάζονται συχνά με θρεπτικό διάλυμα (van Os et al., 2019).



Εικόνα 1.12 Καλλιέργεια σε σύστημα αεροπονίας

1.8 Ανοιχτά και κλειστά υδροπονικά συστήματα

Ο διαχωρισμός των υδροπονικών συστημάτων σε κλειστά και ανοιχτά συστήματα βασίζεται στον τρόπο με τον οποίο διαχειριζόμαστε την περίσσεια του θρεπτικού διαλύματος το οποίο απορρέει από το ριζικό περιβάλλον (Σάββας, 2012).

1.8.1 Ανοιχτά υδροπονικά συστήματα

Με την έννοια «ανοιχτά υδροπονικά συστήματα» εννοούμε τα συστήματα στα οποία η απορροή δεν συλλέγεται κι έτσι διαφεύγει στο περιβάλλον (Σάββας, 2012). Τα ανοιχτά συστήματα είναι υδροπονικά συστήματα όπου η καλλιέργεια των φυτών γίνεται σε υποστρώματα. Τα υποστρώματα διαθέτουν την ιδιότητα συγκράτησης νερού και αέρα στο πορώδες τους έχοντας την κατάλληλη αναλογία για να μπορέσουν να αναπτυχθούν τα φυτά. Οπότε, δεν παρέχεται συνεχώς το θρεπτικό διάλυμα στα φυτά, αλλά πραγματοποιούνται ποτίσματα σε τακτά χρονικά διαστήματα τα οποία διαρκούν λίγο. Το παρεχόμενο θρεπτικό διάλυμα βρίσκεται σε περισσότερη ποσότητα από αυτήν που χρειάζονται τα φυτά και από αυτήν που μπορεί να απορροφήσει το πορώδες τους μέσω των δυνάμεων συνάφειας. Αυτό συμβαίνει για να μπορεί να πραγματοποιείται η έκπλυση των αλάτων (NaCl), αλλά και ορισμένων ιόντων που απορροφούνται δύσκολα και συσσωρεύονται, εν τέλει, στο ριζικό περιβάλλον. Ένας άλλος λόγος για τον οποίο παρέχεται περισσότερη ποσότητα θρεπτικού διαλύματος είναι για να μπορέσει να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη ποσότητα που χρειάζονται ορισμένα φυτά τα οποία, για κάποιο λόγο, δεν παίρνουν την απαιτούμενη ποσότητα που χρειάζονται εξαιτίας

ορισμένων ανομοιομορφιών που υπάρχουν στους σταλάκτες. Εξαιτίας αυτής της ανομοιομορφίας, η ποσότητα του θρεπτικού διαλύματος που παρέχεται στα φυτά θα πρέπει να ξεπερνάει τουλάχιστον 20% τις ανάγκες που έχει η εκάστοτε καλλιέργεια για να μπορέσουν να καλυφθούν και οι ανάγκες των φυτών που, λόγω της ανομοιομορφίας στους σταλάκτες, δεν καλύπτονται επαρκώς οι ανάγκες τους σε άρδευση. Το θρεπτικό διάλυμα το οποίο δεν απορροφάται από τα φυτά, τότε, εξαιτίας της βαρύτητας, απορρέει και απομακρύνεται. Στην περίπτωση που το απορρέον θρεπτικό διάλυμα δεν συλλέγεται για να χρησιμοποιηθεί ξανά, τότε το υδροπονικό σύστημα καλλιέργειας καλείται ανοιχτό.

Ο λόγος ο οποίος υπάρχει ανάμεσα στον όγκο του θρεπτικού διαλύματος που απορρέει και του συνολικού χορηγούμενου όγκου ονομάζεται κλάσμα απορροής. Το ύψος του κλάσματος απορροής, που χρειάζεται για να είναι ικανοποιητική η έκπλυση των αλάτων, εξαρτάται από την περιεκτικότητα των αλάτων στο θρεπτικό διάλυμα. Όσο πιο πολλά είναι τα άλατα που υπάρχουν στο θρεπτικό διάλυμα, τόσο υψηλότερο θα πρέπει να είναι και το κλάσμα απορροής, ώστε να επιτυγχάνεται σε ικανοποιητικό βαθμό η έκπλυσή τους. Για να είναι αποδεκτό ένα κλάσμα απορροής, θα πρέπει, κατά την δημιουργία του θρεπτικού διαλύματος, το νερό που χρησιμοποιείται να είναι καλής ποιότητας και να έχει την κατάλληλη σύνθεση, οπότε αυτό θα είναι της τάξης του 0,25 – 0,35 (Σάββας, 2012).

1.8.2 Κλειστά υδροπονικά συστήματα

Με την έννοια «κλειστά υδροπονικά συστήματα» εννοούμε εκείνα τα συστήματα στα οποία η απορροή συλλέγεται και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί (Σάββας, 2012). Αυτή η περίπτωση της επαναχρησιμοποίησης, ονομάζεται «ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος». Για να μπορέσει, όμως, να γίνει ανακύκλωση, θα πρέπει να υπάρχει και το αντίστοιχο δίκτυο με αγωγούς που κλείνουν και μπορούν να συλλέγουν το απορρέον διάλυμα, ώστε να το επαναφέρουν στην κεφαλή του συστήματος και γίνει η επαναχρησιμοποίησή του. Με την ανακύκλωση, λοιπόν, του θρεπτικού διαλύματος, τα λιπάσματα που χρησιμοποιούνται δεν διαφεύγουν στο περιβάλλον, όπως συμβαίνει στα ανοιχτά συστήματα, με αποτέλεσμα να μην μολύνονται τα υπόγεια, αλλά και τα επιφανειακά νερά με τα φωσφορικά και τα νιτρικά ιόντα. Επιπλέον, αυτή η επαναχρησιμοποίηση του διαλύματος έχει ένα ακόμη

όφελος το οποίο σχετίζεται με το κόστος της λίπανσης. Από την στιγμή, λοιπόν, που ένα μέρος από το θρεπτικό διάλυμα χρησιμοποιείται ξανά, τότε γίνεται οικονομία και στα λιπάσματα που χρησιμοποιούνται για την εκάστοτε καλλιέργεια. Αυτά, όμως, τα οφέλη προκύπτουν στην περίπτωση που η ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος δεν δημιουργεί αρνητικές επιπτώσεις στις αποδόσεις της καλλιέργειας από την στιγμή που η συμπλήρωση του διαλύματος με θρεπτικά στοιχεία γίνεται στις σωστές ποσότητες. Γι' αυτό τον λόγο, τα τελευταία χρόνια υπάρχει όλο και μεγαλύτερη στήριξη, από την Ευρωπαϊκή Ένωση, για τα κλειστά υδροπονικά συστήματα, ενώ σε χώρες όπως η Ολλανδία, είναι και με τον νόμο υποχρεωτική η χρήση τους.

Παρά το γεγονός ότι τα κλειστά συστήματα και η ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος έχει αρκετά πλεονεκτήματα, δεν αναιρεί το γεγονός ότι η εφαρμογή της είναι περιορισμένη, ειδικά στις χώρες της Μεσογείου, εξαιτίας κάποιων δυσκολιών που προκύπτουν στην πράξη. Μία πρώτη δυσκολία που προκύπτει έχει να κάνει με τις ποσότητες των θρεπτικών στοιχείων που προστίθενται στο διάλυμα συμπλήρωσης, ώστε το νέο διάλυμα τροφοδοσίας που προκύπτει να μπορεί να καλύψει, σε ικανοποιητικό βαθμό, τις θρεπτικές ανάγκες των φυτών (Σάββας, 2012). Μία δεύτερη δυσκολία είναι η απολύμανση του θρεπτικού διαλύματος που απορρέει πριν χρησιμοποιηθεί ξανά. Η απολύμανση γίνεται για να καταπολεμηθούν οι παθογόνοι μικροοργανισμοί και να μην διαδοθεί κάποια ασθένεια στα φυτά μέσω της επαναχρησιμοποίησης του θρεπτικού διαλύματος απορροής.

1.9 Απολύμανση διαλύματος απορροής στα κλειστά υδροπονικά συστήματα

Η απολύμανση του διαλύματος απορροής είναι μία αναγκαία διαδικασία για να αποφευχθεί η διάδοση μυκήτων, βακτηρίων και ιών, μέσω του επαναχρησιμοποιούμενου θρεπτικού διαλύματος, σε όλη την καλλιέργεια. Οι σημαντικότερες μέθοδοι απολύμανσης είναι η παστερίωση με θέρμανση, η απολύμανση με όζον (O_3), με χλώριο (Cl_2), με ιώδιο, με υπεροξείδιο του υδρογόνου (H_2O_2), με την εφαρμογή υπεριώδους ακτινοβολίας (UV), με το αργό φιλτράρισμα μέσω της χρήσης πορωδών φίλτρων, όπως τα φίλτρα άμμου και με μία συσκευή παραγωγής ελεύθερων ιόντων χαλκού. Από αυτές τις μεθόδους εφαρμόζονται κυρίως η παστερίωση με θέρμανση, η εφαρμογή υπεριώδους ακτινοβολίας και το αργό φιλτράρισμα με την χρήση πορωδών φίλτρων (Σάββας, 2012).

1.10 Πλεονεκτήματα καλλιέργειών εκτός εδάφους

Ξεκινώντας, ένα από τα πλεονεκτήματα που εμφανίζει η υδροπονική καλλιέργεια είναι ότι αντιμετωπίζει, με αποτελεσματικό τρόπο, τα προβλήματα που σχετίζονται με τα παθογόνα τού εδάφους, τα οποία προκαλούν ασθένειες, όπως το φουζάριο, το πύθιο, το βερτισίλλιο κ.ά, αλλά και με εχθρούς, όπως είναι τα έντομα ή οι νηματώδεις. Αυτός ο τρόπος καλλιέργειας αποτελεί μία ιδιαίτερα συμφέρουσα λύση για να αντιμετωπιστούν τα παθογόνα αυτά, αφού, από την στιγμή που δεν υπάρχει έδαφος, δεν χρειάζεται απολύμανση, ούτε με βρωμιούχο μεθύλιο, αλλά ούτε και με φυτοπροστατευτικά σκευάσματα. Αυτό έχει θετικό αντίκτυπο στο να μειωθεί η χρήση των σκευασμάτων, να μειωθούν τα εργατικά χέρια, αλλά και να προστατευθεί και το περιβάλλον. Δηλαδή, υπάρχει όφελος κυρίως για τους παραγωγούς, αφού μειώνονται σημαντικά τα κόστη των εργατικών χεριών και των φυτοπροστατευτικών προϊόντων, αλλά και για τους καταναλωτές, αφού τα προϊόντα που παράγονται δεν επιφορτίζονται με τα σκευάσματα (Raviv et al., 2019).

Παράλληλα, ένα δεύτερο πλεονέκτημα που παρουσιάζει η υδροπονία είναι το χαμηλότερο κόστος θέρμανσης των θερμοκηπίων συγκριτικά με τις καλλιέργειες που βρίσκονται στο έδαφος. Από την στιγμή που τα φυτά δεν καλλιεργούνται στο έδαφος, τότε δεν λαμβάνουμε υπόψιν ούτε την εδαφική εξάτμιση του νερού, ούτε και την απορρόφηση ενέργειας του εδάφους. Εκτός από αυτή την μείωση των εξόδων για θέρμανση, μείωση παρουσιάζεται και λόγω του ότι η υδροπονική καλλιέργεια δεν επηρεάζεται από την θερμοκρασία τού εδάφους. Ειδικά τους χειμερινούς μήνες, για να μπορέσει να παραμείνει η θερμοκρασία τού εδάφους σε ικανοποιητικά επίπεδα, μέσ' στο θερμοκήπιο, απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες στο εναέριο περιβάλλον ή απαιτείται τοποθέτηση ενός συστήματος θέρμανσης, είτε επιδαπέδια, είτε υπόγεια, πράγμα αρκετά κοστοβόρο. Με την υδροπονία, λοιπόν, οι ρίζες των φυτών, λόγω του περιορισμένου τους όγκου μέσα στα υποστρώματα ή μέσα στα θρεπτικά διαλύματα, διατηρούν περισσότερο την θερμοκρασία στο ριζικό τους περιβάλλον και, με αυτόν τον τρόπο, η θέρμανση ή η ψύξη επιτυγχάνονται με πιο γρήγορο τρόπο (Σάββας, 2012, Kawasaki & Yoneda, 2019; Wang et al., 2016; Yan et al., 2012).

Ακόμη, ένα τρίτο πλεονέκτημα της υδροπονίας είναι η μεγάλη ακρίβεια στη θρέψη των φυτών. Με το να τροφοδοτούνται τα φυτά, αποκλειστικά μέσω του θρεπτικού διαλύματος, με τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία για την ανάπτυξή τους,

υπάρχει μεγαλύτερος έλεγχος της καλλιέργειας και μπορεί πιο γρήγορα να διορθωθεί και κάποιο λάθος, το οποίο μπορεί να προκύψει. Αυτό συμβαίνει γιατί αρκετοί παράγοντες του εδάφους, όπως η σύστασή του, η ανταλλακτική του ικανότητα, η περιεκτικότητά του σε οργανική ουσία, αλλά και αυτοί που σχετίζονται με την ανοργανοποίηση της οργανικής του ουσίας, δεν έχουν πια καμία σημασία για την καλλιέργεια. Με αποτέλεσμα, να δημιουργείται με πιο εύκολο τρόπο ένα σύστημα ελέγχου της θρέψης των φυτών (Σάββας, 2012).

Εν συνεχεία των παραπάνω, ένα τέταρτο πλεονέκτημα αυτής της εναλλακτικής καλλιέργειας είναι ότι η παραγωγή ανθοκομικών και λαχανοκομικών φυτών δεν μειονεκτεί καθόλου, όσον αφορά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά, σε σχέση με τις καλλιέργειες του εδάφους. Τα χαρακτηριστικά εκείνα που βελτιώνουν οι υδροπονικές καλλιέργειες είναι η αύξηση, σε περιεκτικότητα, της βιταμίνης C, η μείωση της παρουσίας των νιτρικών, αλλά και η αύξηση του χρόνου διατήρησής τους. Εκτός από την βελτίωση αυτών των ποιοτικών χαρακτηριστικών, μπορούν να βελτιωθούν κι άλλα ποιοτικά χαρακτηριστικά με την αντίστοιχη ρύθμιση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC). Σε αυτά συμπεριλαμβάνεται το μέγεθος των καρπών, η περιεκτικότητα των καρπών σε ξηρή ουσία, σε σάκχαρα, σε διαλυτά στερεά κ.ά. (Σάββας, 2012).

Ένα πέμπτο πλεονέκτημα της υδροπονικής καλλιέργειας είναι στην περίπτωση που το αρδευτικό νερό, για την παρασκευή των θρεπτικών διαλυμάτων, παρουσιάζει υψηλή αγωγιμότητα. Δηλαδή, η ηλεκτρική αγωγιμότητα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $1 - 1,5 \text{ dS m}^{-1}$. Αυτή η υψηλή αγωγιμότητα μπορεί να έχει δημιουργηθεί είτε από αυξημένη συγκέντρωση κάποιου θρεπτικού στοιχείου, όπως είναι το μαγνήσιο (Mg^{2+}) και το ασβέστιο (Ca^{2+}), είτε από αυξημένη συγκέντρωση του νατρίου (Na^+), δηλαδή από αυξημένη αλατότητα που παρουσιάζει το αρδευτικό νερό. Στην περίπτωση του ασβεστίου και του μαγνησίου, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά τον υπολογισμό των λιπασμάτων και τα θρεπτικά στοιχεία που περιέχονται στο νερό. Δηλαδή, αυτές οι ποσότητες να μην ξεπερνάνε τις επιθυμητές τιμές κι έτσι να μην δημιουργούνται τοξικότητες στα φυτά. Στην περίπτωση του νατρίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές όπως η αφαλάτωση ή η χρήση των ανοιχτών υδροπονικών συστημάτων, όπου γίνεται έκπλυση των αλάτων κι έτσι να μην επηρεαστεί αρνητικά η παραγωγή (Σάββας, 2012, Voogt and Bar-Yosef, 2019).

Ένα έκτο πλεονέκτημα της εκτός εδάφους καλλιέργειας είναι ότι ο δεν απαιτείται από τον καλλιεργητή να προετοιμάσει το έδαφος με διάφορες εργασίες, οι οποίες στην περίπτωση της εδαφικής καλλιέργειας θα ήταν απαραίτητες. Τέτοιες εργασίες είναι το όργωμα, το φρεζάρισμα, η αφαίρεση ζιζανίων και αγριοχόρτων κ.ά., οπότε, με αυτόν τον τρόπο, δεν είναι ανάγκη η παρουσία πολλών εργατικών χεριών, πράγμα που μειώνει το κόστος εργασίας και το φόρτο εργασίας, αλλά και τον χρόνο που χρειάζεται για την απομάκρυνση της προηγούμενης καλλιέργειας με την τοποθέτηση της νέας (Σάββας, 2012).

Ένα τελευταίο πλεονέκτημα, άξιο αναφοράς, είναι ότι τα υδροπονικά θερμοκήπια, με τις σύγχρονες προδιαγραφές τους, παρουσιάζουν μεγάλο ποσοστό αυτοματισμών των διαφόρων εργασιών που χρειάζεται να γίνουν σε μία καλλιέργεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση ανθρωπίνου δυναμικού και, κατ' επέκταση, μείωση και των μισθών τους. Οπότε, μία σύγχρονη υδροπονική καλλιέργεια απαιτεί και σύγχρονα εξοπλισμένα θερμοκήπια, τα οποία κάλλιστα αποδίδουν σε κέρδος για τον παραγωγό (Σάββας, 2012).

1.11 Μειονεκτήματα καλλιεργειών εκτός εδάφους

Παρόλο που η υδροπονία παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, δεν παύει να ισχύει κι εδώ το γεγονός ότι κάθε νόμισμα έχει δύο πλευρές, οπότε και σε αυτή την εναλλακτική μέθοδο καλλιέργειας παρουσιάζονται αρκετά μειονεκτήματα.

Ένα από αυτά σχετίζεται με το κόστος που έχει η αρχική της εγκατάσταση. Η υδροπονία παρουσιάζει υψηλότερο κόστος σε σχέση με μία καλλιέργεια η οποία βρίσκεται στο έδαφος, λόγω του ότι, για την εγκατάστασή της, απαιτούνται κάποια έξοδα. Αυτά σχετίζονται με την δημιουργία, αλλά και την τροφοδοσία τού θρεπτικού διαλύματος, το οποίο χορηγείται στα φυτά, αλλά και με αυτά που απαιτούνται για τα υποστρώματα καλλιέργειας στην περίπτωση που το ριζικό σύστημα των φυτών δεν βρίσκεται απευθείας σε θρεπτικό διάλυμα. Ακόμη και να βρίσκονταν, όμως, απευθείας στο θρεπτικό διάλυμα, τότε πάλι θα προέκυπταν κάποια έξοδα για τις δεξαμενές που θα απαιτούνταν (Σάββας, 2012).

Ένα άλλο μειονέκτημα των υδροπονικών καλλιεργειών είναι ότι ο παραγωγός τής θερμοκηπιακής μονάδας θα πρέπει να έχει, τουλάχιστον, ένα χαμηλό μορφωτικό επίπεδο. Βέβαια, αυτό είναι σχετικό στην περίπτωση που ο γεωπόνος με τον οποίο

συνεργάζεται και ο οποίος τον συμβουλεύει, ειδικεύεται στην υδροπονία, οπότε, σε αυτήν την περίπτωση, το σημαντικότερο είναι να ακούει ο παραγωγός τις συμβουλές και τις οδηγίες τού γεωπόνου και να είναι επιμελής σε ό,τι κι αν του πει (Σάββας, 2012).

Ένα ακόμη μειονέκτημα της υδροπονικής καλλιέργειας είναι ότι στην περίπτωση των κλειστών υδροπονικών συστημάτων, δηλαδή, με την επαναχρησιμοποίηση του θρεπτικού διαλύματος απορροής, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης παθογόνων οργανισμών, ειδικά στην περίπτωση που δεν γίνεται απολύμανση του διαλύματος απορροής, πριν την ανακύκλωσή του. Αν, όμως, δεν έχουν προσβληθεί πολλά φυτά σε αριθμό και η εμφάνιση του παθογόνου περιορίζεται σε ένα με δύο φυτά, τότε, με την έγκαιρη απομάκρυνσή τους, δεν θα δημιουργηθεί περαιτέρω θέμα. Επίσης, η εξάπλωση του παθογόνου μπορεί να περιοριστεί και να αντιμετωπιστεί με την χρήση κάποιων μέσων απολύμανσης, τα οποία αναφέρθηκαν παραπάνω (Σάββας, 2012).

1.12 Αλατότητα

Στην περίπτωση των ανωτέρων φυτών, τα περισσότερα από αυτά έχουν υιοθετήσει κάποιους μηχανισμούς που αποκλείουν τα ιόντα νατρίου (Na^+) και χλωρίου (Cl^-) από τα κύτταρά τους και κυρίως από αυτά που συμμετέχουν σε λειτουργίες ζωτικής σημασίας, όπως είναι η φωτοσύνθεση. Το νάτριο (Na^+), αν και δεν αποτελεί θρεπτικό στοιχείο, είναι σε θέση να προκαλέσει τοξικότητες στα φυτά και γι' αυτό, ακόμη κι αν η συγκέντρωσή του στο ριζικό περιβάλλον είναι χαμηλή, τα ευαίσθητα κύτταρα προσπαθούν να το εμποδίζουν από το να εισέλθει στο εσωτερικό τους. Από την άλλη πλευρά, το χλώριο (Cl^-) αποτελεί θρεπτικό στοιχείο των φυτών και γι' αυτό τον λόγο οι μηχανισμοί για να το αποκλείσουν ενεργοποιούνται μόνο όταν υπερβεί κάποιο συγκεκριμένο όριο. Εξαιτίας της ύπαρξης αυτών των μηχανισμών, ένα μικρό μέρος νατρίου και χλωρίου, προερχόμενο από το νερό άρδευσης, το απορροφούν τα φυτά (Varlagas et al., 2010). Το υπόλοιπο, μεγαλύτερο, μέρος τους συγκεντρώνεται στο ριζικό περιβάλλον. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνονται οι συγκεντρώσεις νατρίου και χλωρίου στο ριζικό περιβάλλον επιδρώντας αρνητικά στην ανάπτυξη, αλλά και στην παραγωγή των φυτών.

Στην περίπτωση των κλειστών υδροπονικών συστημάτων, όπου το διάλυμα απορροής ανακυκλώνεται και χρησιμοποιείται όλο, τότε αυξάνονται οι συγκεντρώσεις

τού νατρίου και του χλωρίου στο διάλυμα τροφοδοσίας. Για την ρύθμιση, λοιπόν, των θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα τροφοδοσίας, όταν επαναχρησιμοποιείται το διάλυμα απορροής, υπάρχουν δύο τρόποι. Στον πρώτο τρόπο, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του διαλύματος τροφοδοσίας, έπειτα από την προσθήκη τού διαλύματος απορροής, θα διατηρείται σταθερή. Μόνο όταν αυξάνονται οι ποσότητες νατρίου και χλωρίου στο διάλυμα τροφοδοσίας των φυτών, τότε θα αρχίσει να μειώνεται σταδιακά η ποσότητα των θρεπτικών στοιχείων, για να μπορέσει να παραμείνει σταθερή η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Στον δεύτερο τρόπο, θα παραμένουν σταθερές οι ποσότητες των θρεπτικών στοιχείων, ώστε να προκύψει ένα άριστο επίπεδο θρεπτικών στοιχείων που παρέχονται στην καλλιέργεια χωρίς να προσέχουμε την ηλεκτρική αγωγιμότητα στο διάλυμα τροφοδοσίας. Εδώ, όμως, αφού γίνεται συσσώρευση του νατρίου και του χλωρίου, τότε αρχίζει να αυξάνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα στο διάλυμα τροφοδοσίας, αλλά και στο διάλυμα του ριζοστρώματος και μόλις ξεπεραστεί και η τιμή που αποτελεί το κατώφλι για την αλατότητα, τότε ξεκινάει να επηρεάζεται αρνητικά και η παραγωγή τής καλλιέργειας (Σάββας, 2012).

Για να μειωθούν ή και να αποφευχθούν, ακόμη, οι αρνητικές επιπτώσεις τής αλατότητας, ιδιαίτερα στο κλειστό υδροπονικό σύστημα, όπου συγκεντρώνεται πολύ μεγαλύτερη ποσότητα νατρίου και χλωρίου, θα πρέπει να απορρίπτεται ένα μέρος τής απορροής, όποιος τρόπος, από τους δύο που αναφέρθηκαν παραπάνω, κι αν ακολουθηθεί. Στο ριζικό περιβάλλον το νάτριο και το χλώριο συσσωρεύονται αργά, ιδιαίτερα στα αρχικά στάδια της καλλιέργειας, εξαιτίας τού ότι τα φυτά έχουν ακόμη μικρό μέγεθος και δεν καταναλώνουν τόσο νερό. Κάτι το οποίο αλλάζει, καθώς αυξάνεται το φυτό σε μέγεθος, αυξάνονται και οι απαιτήσεις του σε νερό, οπότε η συσσώρευση νατρίου και χλωρίου, στο περιβάλλον που βρίσκεται η ρίζα, αρχίζει όλο και να μεγαλώνει.

Σύμφωνα και με πειράματα που έχουν γίνει, έχει αποδειχθεί ότι στην περίπτωση της τομάτας, η παραγωγή καρπών σημειώνει μία γραμμική μείωση όταν η ηλεκτρική αγωγιμότητα ξεπεράσει κάποιο όριο, μόνο στην περίπτωση που κάποιο θρεπτικό στοιχείο δεν είναι σε έλλειψη ή σε περίσσεια στο διάλυμα. Γενικά, έχει αποδειχτεί ότι μικρά με μέτρια επίπεδα αλατότητας επηρεάζουν περισσότερο το υπέργειο τμήμα τής τομάτας και όχι την ρίζα. Στην περίπτωση της τομάτας, εν αντιθέσει με τα υπόλοιπα καρποδοτικά λαχανικά, η αλατότητα επηρεάζει περισσότερο την βλαστική ανάπτυξη και όχι την παραγωγή καρπών. Σε μέτρια επίπεδα αλατότητας επηρεάζεται το μέσο

βάρος τού καρπού τής τομάτας, αλλά όχι ο αριθμός των καρπών που παράγει το κάθε φυτό. Επίσης, όσο αυξάνεται η αλατότητα στο ριζικό περιβάλλον, τόσο αυξάνεται και η περιεκτικότητα των καρπών σε ξηρή ουσία. Αυτή η αύξηση της ξηρής ουσίας αποδίδεται στη μείωση της ποσότητας του νερού στον καρπό.

Όταν η αλατότητα κυμαίνεται σε μέτρια επίπεδα, τότε βελτιώνεται η ποιότητα των καρπών τής τομάτας. Η βελτίωση στην ποιότητα σχετίζεται με την αύξηση σε ξηρή ουσία, σε σάκχαρα, σε βιταμίνη C και σε καροτενοειδή, στην οξύτητα του χυμού, αλλά και στις πτητικές ουσίες, οι οποίες δίνουν το χαρακτηριστικό άρωμα των καρπών τής τομάτας (Savvas et al., 2011).

Ακόμη, με την αύξηση της αλατότητας αυξάνεται και η διάρκεια ζωής, μετασυλλεκτικά, του καρπού. Όσο αυτή η αύξηση της αλατότητας παραμένει σε ελεγχόμενα επίπεδα, τόσο μειώνεται και ο κίνδυνος να εμφανιστούν χρυσίζουσες κηλίδες στον καρπό, καθώς και καστάνωση εσωτερικά τού καρπού. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις χλωρίου, στο ριζικό περιβάλλον, ευνοούν την εκδήλωση χρυσίζουσών κηλίδων, που μπορεί να οφείλεται σε υπερβολική συγκέντρωση ασβεστίου λόγω του ότι το χλώριο ευνοεί την απορρόφηση ασβεστίου (Σάββας, 2012).

1.13 Έλεγχος σύνθεσης θρεπτικού διαλύματος

1.13.1 Σύνθεση διαλύματος τροφοδοσίας

Η σύνθεση του διαλύματος τροφοδοσίας είναι από τις πιο σημαντικές διαδικασίες για τις υδροπονικές καλλιέργειες σε κάθε στάδιο ανάπτυξης του φυτού. Το θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας, λοιπόν, θα πρέπει να περιέχει τις ποσότητες εκείνες, των θρεπτικών στοιχείων, οι οποίες θα μπορούν να καλύψουν πλήρως τις ανάγκες των φυτών (Σάββας, 2012). Για την δημιουργία τής κατάλληλης συνταγής για την σύνθεση του διαλύματος τροφοδοσίας έχει δημιουργηθεί, από το Εργαστήριο Κηπευτικών τού Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, ένα λογισμικό το οποίο υπολογίζει αυτόματα τις τιμές – στόχους για κάθε θρεπτικό στοιχείο και ονομάζεται NUTRISENSE (Savvas et al., 2021).

1.13.2 Δημιουργία θρεπτικού διαλύματος στα κλειστά υδροπονικά συστήματα -

Διάλυμα συμπλήρωσης

Στην περίπτωση των κλειστών υδροπονικών συστημάτων, μετά που θα αναμειχθεί το νερό με το διάλυμα απορροής, τότε θα προκύψει ένα διάλυμα στο οποίο το διάλυμα απορροής θα συμμετέχει σε ένα κλάσμα α και το νερό σε ένα κλάσμα $1-\alpha$. Με αυτόν τον τρόπο θα υπολογιστεί η συγκέντρωση i του θρεπτικού στοιχείου στο παραγόμενο διάλυμα που θα δημιουργηθεί από την ανάμειξη του διαλύματος απορροής με το νερό και το οποίο συμβολίζεται ως C_{im} . Το παραγόμενο διάλυμα C_{im} προκύπτει από την μαθηματική σχέση: $C_{im} = \alpha C_{id} + (1-\alpha)C_{iw}$, όπου ως C_{id} συμβολίζεται η συγκέντρωση i του θρεπτικού στοιχείου στο διάλυμα απορροής και ως C_{iw} συμβολίζεται η συγκέντρωση i του θρεπτικού στοιχείου στο αρδευτικό νερό. Το κλάσμα α , του διαλύματος απορροής, ισούται με τον όγκο του διαλύματος απορροής (V_d) προς τον συνολικό όγκο που τροφοδοτείται στην καλλιέργεια (V_s). Η C_{iw} είναι ένα σταθερό μέγεθος καθ' όλη την διάρκεια της καλλιέργειας, οπότε αν γνωρίζουμε το C_{id} , το οποίο είναι ίσο με την συγκέντρωση i του θρεπτικού στοιχείου στο ριζικό περιβάλλον, δηλαδή στο διάλυμα απορροής, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε με εύκολο τρόπο το C_{im} και, εν τέλει, να υπολογίσουμε την ποσότητα του θρεπτικού στοιχείου που πρέπει να προστεθεί για την δημιουργία της επιθυμητής συγκέντρωσης στο διάλυμα τροφοδοσίας. Η ποσότητα αυτή θα προστεθεί με την παρασκευή του διαλύματος συμπλήρωσης (Σάββας, 2012).

Στα κλειστά υδροπονικά συστήματα, η κεφαλή υδρολίπανσης παρασκευάζει το διάλυμα συμπλήρωσης και μόλις δημιουργηθεί το διάλυμα τροφοδοσίας, τότε αυτό θα χορηγηθεί στην καλλιέργεια. Η κεφαλή υδρολίπανσης, όμως, μαζί με τον μείκτη του νερού άρδευσης και του διαλύματος απορροής μπορεί να έχει μία διάταξη που να βρίσκεται σε δύο διαφορετικά συστήματα. Δηλαδή, στο πρώτο σύστημα διάταξης, πρώτα ρίχνουμε το διάλυμα απορροής στο αρδευτικό νερό και μετά μετράμε την ηλεκτρική του αγωγιμότητα του μείγματος που δημιουργείται από το νερό και το διάλυμα απορροής (E_m). Η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυτού του μείγματος προκύπτει από τον τύπο: $E_m = \alpha E_d + (1-\alpha)E_w$, όπου E_d είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) που θα έχει το διάλυμα απορροής σε ένα πότισμα και το οποίο θα ανακυκλωθεί, E_w είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού άρδευσης που θα χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία των θρεπτικών διαλυμάτων και α είναι το κλάσμα που προκύπτει από το ανακυκλώμενο διάλυμα απορροής προς τον συνολικό όγκο του χορηγούμενου διαλύματος στην καλλιέργεια. Έπειτα, αυτό το μείγμα που θα δημιουργηθεί, θα οδηγηθεί στην κεφαλή υδρολίπανσης, όπου εκεί θα προστεθούν τα πυκνά διαλύματα

σε τέτοιες ποσότητες και αναλογίες μέχρις ότου η ηλεκτρική αγωγιμότητα φτάσει την τιμή – στόχο (EC_{target}) για την συγκεκριμένη καλλιέργεια. Στο δεύτερο σύστημα διάταξης, το νερό άρδευσης θα οδηγηθεί στην κεφαλή υδρολίπανσης και εκεί θα προστεθούν κατευθείαν τα πυκνά διαλύματα μέχρι την ηλεκτρική αγωγιμότητα EC_{uptake} . Σε αυτή την περίπτωση, οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων τού διαλύματος συμπλήρωσης θα πρέπει να είναι ίδιες με τις συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων που θα απορροφήσουν τα φυτά. Στην συνέχεια, αυτό το διάλυμα συμπλήρωσης που θα προκύψει θα οδηγηθεί στο μείκτη, όπου θα γίνει η ανάμειξη του διαλύματος συμπλήρωσης και του διαλύματος απορροής μέχρις ότου την επιθυμητή τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Εκτός από την επιθυμητή ηλεκτρική αγωγιμότητα, απαιτείται και ένας ρυθμιστής pH, ώστε να επιτευχθεί και αυτού του μεγέθους η επιθυμητή τιμή (Savvas and Gruda, 2018).

1.13.3 Αναπροσαρμογή διαλύματος τροφοδοσίας

Κατά την διάρκεια μίας καλλιέργειας, οι συγκεντρώσεις απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων δεν παραμένουν σταθερές, με αποτέλεσμα να πρέπει να εκτιμηθούν κάποιες μέσες τιμές για την δημιουργία τού διαλύματος τροφοδοσίας. Αυτές οι μέσες τιμές θα καθοριστούν έπειτα από χημικές αναλύσεις που θα γίνουν στο διάλυμα απορροής, ώστε να δούμε καλύτερα τι απορροφούν τα φυτά και τι όχι. Οι συγκεντρώσεις στο διάλυμα απορροής τροποποιούνται ανάλογα και από το στάδιο που βρίσκεται το φυτό, τις κλιματικές συνθήκες, αλλά και την εποχή τού έτους (Nikolaou et al., 2021).

Στην περίπτωση των κλειστών υδροπονικών συστημάτων, όπου το διάλυμα απορροής επαναχρησιμοποιείται, δημιουργείται ένα νέο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας, στο οποίο η αναπροσαρμογή είναι κάτι που χρειάζεται να γίνει. Η αναπροσαρμογή αυτή, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, βασίζεται στις αναλύσεις των θρεπτικών στοιχείων από τα διαλύματα απορροής για να μάθουμε τι υπάρχει στην περιοχή των ριζών και υπολογίζεται σύμφωνα με μαθηματικούς τύπους και εξισώσεις. Πλέον, όμως, με το λογισμικό NUTRISENSE η σύνθεση του διαλύματος τροφοδοσίας και η αναπροσαρμογή του γίνεται πολύ πιο εύκολα και γρήγορα, επιτυγχάνοντας μία ιδιαίτερη ακρίβεια στην σύνθεση του διαλύματος τροφοδοσίας.

1.14 Σύστημα διαχείρισης της σύνθεσης θρεπτικού διαλύματος – NUTRISENSE

Οι ανάγκες που έχουν τα φυτά, κατά την διάρκεια του βιολογικού τους κύκλου, μεταβάλλονται ανάλογα από το στάδιο ανάπτυξης στο οποίο βρίσκονται, τις κλιματικές συνθήκες που υπάρχουν στο εξωτερικό περιβάλλον, από το αν το φυτικό είδος που θα επιλεγεί θα είναι ποικιλία ή υβρίδιο ή από το ότι το υπόστρωμα που θα χρησιμοποιηθεί, στην υδροπονική καλλιέργεια, θα διαφοροποιήσει τις συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων που θα απορροφήσουν τα φυτά. Γι' αυτό το λόγο, η διαχείριση της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος στις υδροπονικές καλλιέργειες είναι κάτι το απαραίτητο.

Στην περίπτωση των κλειστών υδροπονικών συστημάτων, όπου το διάλυμα απορροής επαναχρησιμοποιείται, η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος είναι πιο απαιτητική, καθώς στο διάλυμα τροφοδοσίας θα πρέπει να συνυπολογιστούν και οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων από το διάλυμα απορροής, οι οποίες μεταβάλλονται συχνά. Για την διευκόλυνση, λοιπόν, της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος, το Εργαστήριο Κηπευτικών Καλλιεργειών έχει δημιουργήσει το πρόγραμμα NUTRISENSE (<https://nutrisense.online/>), το οποίο περιλαμβάνει μια σειρά από αλγορίθμους και μοντέλα (Savvas and Adamidis, 2000, 1999, Savvas et al., 2023;) για να μπορέσει να βελτιστοποιήσει την διαχείριση των θρεπτικών ουσιών σε καλλιέργειες εκτός εδάφους. Για την αναπροσαρμογή της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος απαιτούνται να γίνουν κάποιοι υπολογισμοί που βασίζονται σε εξειδικευμένα μοντέλα προσομοίωσης και αλγορίθμους (Block et al., 2023, Savvas et al., 2023), τα οποία καθορίζουν την θρέψη και την λίπανση των λαχανοκομικών φυτών (Katsoulas et al., 2015; Gallardo et al., 2020, 2021; Savvas et al., 2023). Στην περίπτωση που οι συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- στο νερό άρδευσης που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος είναι χαμηλές, τότε τα ιόντα αυτά δεν θα συσσωρευτούν στην περιοχή του ριζοστρώματος κι έτσι οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων θα παραμείνουν σταθερές σε όλη την διάρκεια της καλλιέργειας. Στην περίπτωση, όμως, που οι συγκεντρώσεις του νατρίου (Na^+) και του χλωρίου (Cl^-) δεν παραμείνουν σε χαμηλά επίπεδα, αλλά αυξηθούν, με αποτέλεσμα να συσσωρευτούν σταδιακά σε επιβλαβή επίπεδα στην περιοχή του ριζοστρώματος, τότε το πρόγραμμα NUTRISENSE θα μειώσει αναλογικά τις συγκεντρώσεις των κύριων θρεπτικών στοιχείων, ώστε να αντισταθμιστούν με την αύξηση του νατρίου και του χλωρίου και να μην επηρεαστεί αρνητικά η παραγωγή και η απόδοση της καλλιέργειας.

Κάτι αντίστοιχο έγινε και στην συγκεκριμένη μεταπτυχιακή μελέτη, η οποία πραγματοποιήθηκε για να αξιολογήσει την συνεισφορά τού λογισμικού «NUTRISENSE» στον έλεγχο της συσσώρευσης νατρίου σε φυτά τομάτας σε κλειστό υδροπονικό σύστημα. Έγινε, λοιπόν, η εγκατάσταση ενός πειράματος υδροπονικής καλλιέργειας υβριδίου τομάτας (*Solanum lycopersicum* L. 'Ekstasis' F1) σε πλάκες πετροβάμβακα όπου εφαρμόστηκαν τρεις μεταχειρίσεις.

1.15 Η τομάτα (*Solanum lycopersicum* L.)

Η τομάτα(*Solanum lycopersicum* L.) ανήκει στην οικογένεια Solanaceae τής τάξης των Solanales των δικοτυληδόνων των αγγειοσπέρμων. Είναι ένα φυτό θερμής εποχής που καλλιεργείται κυρίως για το εδώδιμο τμήμα του, τον καρπό του. Ο καρπός της τομάτας μπορεί να καταναλωθεί ως ώριμος, νωπός, αποξηραμένος, σε άλμη ή ξύδι, ως τουρσί ή ακόμη και σε πολτό.

Η τομάτα έχει καταγωγή από την Νοτιοανατολική Αμερική και μεταφέρθηκε στην Ευρώπη τον 16^ο αιώνα. Η εισαγωγή της στην Ελλάδα έγινε περίπου το 1818 και συγκεκριμένα στην Αθήνα. Η τομάτα καλλιεργείται τόσο στον αγρό, την θερμή εποχή τού έτους, όσο και υπό κάλυψη, όλο τον χρόνο, στα θερμοκήπια (Ολύμπιος, 2019).

1.15.1 Βοτανικά χαρακτηριστικά

Η τομάτα (*S. lycopersicum* L.) είναι ένα ποώδες φυτό που καλλιεργείται, κατά κανόνα, ετησίως. Αποτελείται από έναν κεντρικό βλαστό, ο οποίος είναι κυλινδρικός, εσωτερικά πλήρης και μπορεί να φτάσει από 60 μέχρι 180 cm. Τα πραγματικά φύλλα είναι σύνθετα και κάθε φύλλο αποτελείται από ζεύγη φυλλαρίων και παραφύλλων με ένα φυλλάριο στην άκρη. Ο αριθμός των ζευγών καθορίζεται από την ποικιλία και μπορεί να είναι 3, 4 ή ακόμη και 5 ζεύγη φυλλαρίων, αλλά και από την θέση τού φύλλου πάνω στο βλαστό (Ολύμπιος, 2019).

Τα άνθη τής τομάτας βρίσκονται συγκεντρωμένα σε ταξιανθίες πάνω στο βλαστό, αντίθετα και διακλαδιζόμενα συμμετρικά ή ασύμμετρα, αναλόγως από την ποικιλία. Ο κάλυκας του άνθους είναι πράσινος και δερματώδης, αποτελείται από 5 ή περισσότερα σέπαλα, μία κίτρινη στεφάνη, με διάμετρο περίπου 2 εκατοστά και 5 ή περισσότερα πέταλα, που είναι ενωμένα. Το άνθος δεν έχει νέκταρ και είναι κυρίως αυτογονιμοποιούμενο (Ολύμπιος, 2019).



Εικόνα 1.13 Πλάγια απεικόνιση άνθους *Solanum lycopersicum* L. 'Ekstasi F1' στον θάλαμο του θερμοκηπίου τού Γ.Π.Α.

1.15.2 Καρπόδεση τομάτας

Η τομάτα, κατά κύρια βάση, αυτογονιμοποιείται, παρόλο που κάτω από ορισμένες συνθήκες, όπως η χαμηλή ένταση φωτός, οι υψηλές θερμοκρασίες και η χαμηλή ατμοσφαιρική υγρασία, σταυρογονιμοποιείται. Μόλις το άνθος ανοίξει και το στίγμα είναι ώριμο, τότε πρέπει να περάσουν 24 με 48 ώρες για την διάρρηξη των ανθέρων, την απελευθέρωση της γύρης και την πραγματοποίηση της επικονίασης. Παρατηρείται, λοιπόν, το φαινόμενο της υστερανδρίας.

1.15.3 Επικονίαση - Γονιμοποίηση

Η θερμοκρασία έχει καθοριστικό ρόλο στη διάρρηξη των ανθέρων και στην εκτίναξη της γύρης. Η άριστη θερμοκρασία για την γονιμοποίηση είναι 21° C και τα άριστα επίπεδα για την σχετική υγρασία είναι 60 – 70%. Η επικονίαση των ανθέων στο θερμοκήπιο γίνεται με την χρήση εντόμων – επικονιαστών, όπως είναι οι βομβίνοι (*Bombus terrestris*). Οι βομβίνοι βρίσκονται μέσα σε κυψέλες που έχουν είσοδο και έξοδο, ώστε να μπορούν να μπεινοβγαίνουν (Ολύμπιος, 2019).



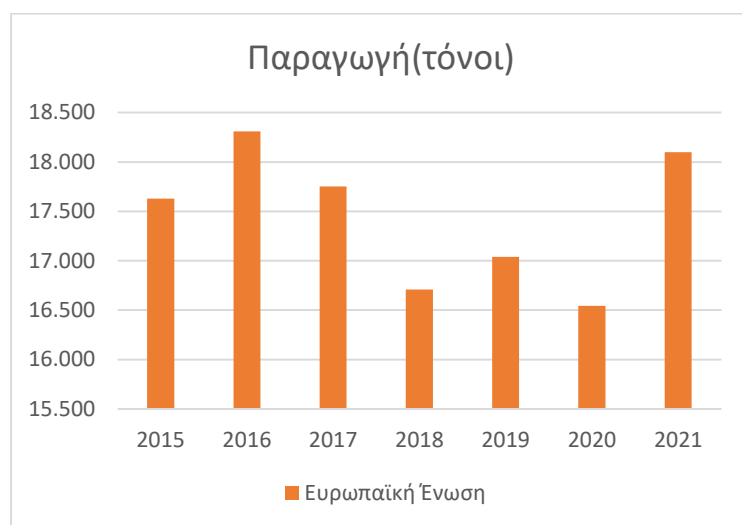
Εικόνα 1.14 Απεικόνιση βομβίνου πάνω σε άνθος στο θερμοκήπιο του Γ.Π.Α.

1.15.4 Στατιστικά στοιχεία σχετικά με την παραγωγή τομάτας

Σύμφωνα με τον FAO του 2019, η 1^η χώρα με την μεγαλύτερη παραγωγή υπαίθριας τομάτας, παγκοσμίως, ήταν η Κίνα, με παραγωγή 62.869.502 τόνων, στην 2^η θέση ήταν η Ινδία, με παραγωγή 19.007.000 τόνων και στην 3^η θέση ήταν η Τουρκία, με παραγωγή 12.841.990 τόνων.

Παρακάτω παρατίθεται ένα Γράφημα που δείχνει την παραγωγή υπαίθριας τομάτας στην Ευρωπαϊκή Ένωση, για τα έτη 2015 – 2021, σύμφωνα με τον FAO.

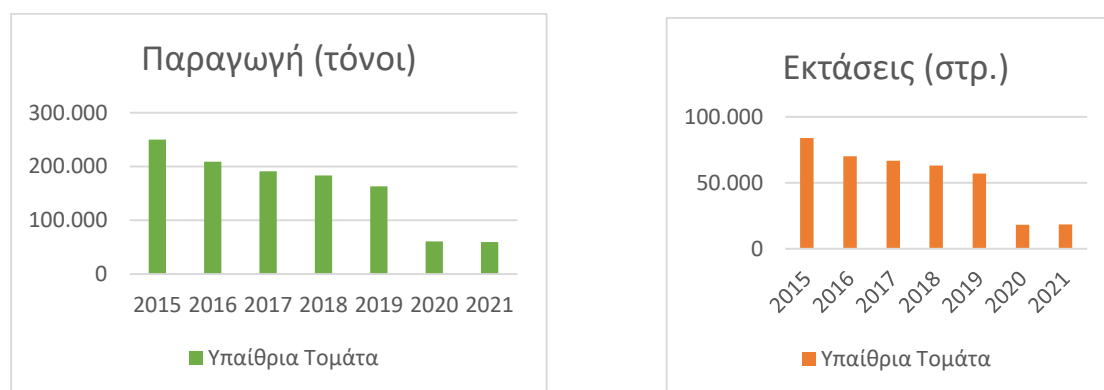
Παραγωγή τομάτας στην Ευρώπη



Σχήμα 1. Γράφημα που δείχνει την παραγωγή σε τόνους στην Ευρωπαϊκή Ένωση

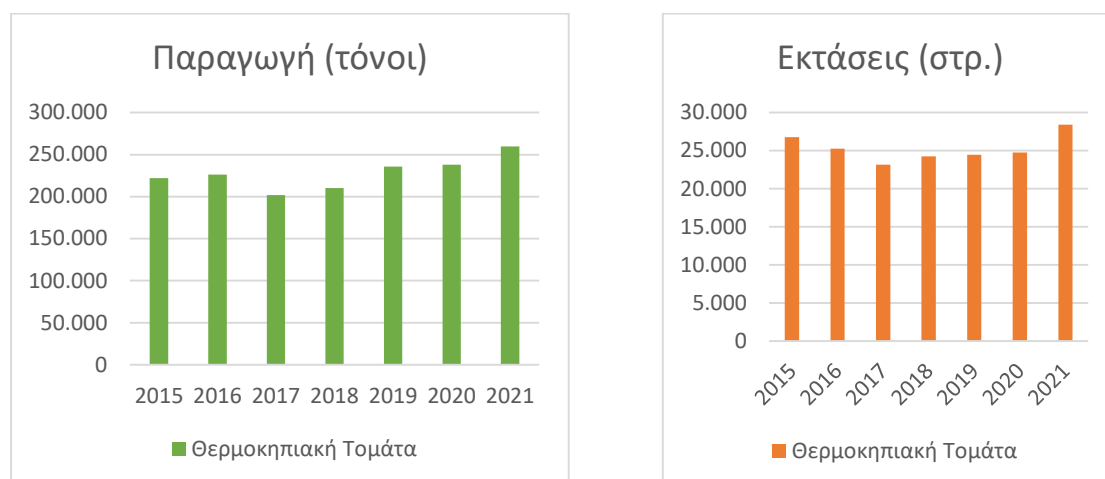
Παρακάτω παρατίθενται κάποια γραφήματα σχετικά με την παραγωγή και με τις εκτάσεις υπαίθριας και θερμοκηπιακής τομάτας στην Ελλάδα, για τα έτη 2015 – 2021, σύμφωνα με την Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία (ΕΛ.ΣΤΑΤ).

Παραγωγή και εκτάσεις υπαίθριας τομάτας στην Ελλάδα



Σχήμα 2. Γραφήματα που δείχνουν την παραγωγή σε τόνους και τις εκτάσεις σε στρέμμα για την υπαίθρια τομάτα στην Ελλάδα

Παραγωγή και εκτάσεις θερμοκηπιακής τομάτας στην Ελλάδα



Σχήμα 3. Γραφήματα που δείχνουν την παραγωγή σε τόνους και τις εκτάσεις σε στρέμμα για την θερμοκηπιακή τομάτα στην Ελλάδα

Όπως φαίνεται και από τα σχήματα, στην περίπτωση της υπαίθριας τομάτας στην Ελλάδα, με το πέρασμα των χρόνων μειώνονται οι εκτάσεις που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή της, με αποτέλεσμα να μειώνεται και η παραγωγή της σε τόνους. Κάτι που φαίνεται λογικό από την στιγμή που, χρόνο με τον χρόνο, όλο και αυξάνονται οι εκτάσεις που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή θερμοκηπιακής τομάτας, όπως φαίνεται και από τα σχήματα. Ειδικά από το 2017 και μετά, αυξάνονται κατά πολύ οι εκτάσεις που χρησιμοποιούνται για παραγωγή τομάτας στο θερμοκήπιο, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται και η παραγωγή αντίστοιχα. Τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα λόγω της κλιματικής αλλαγής, οι παραγωγοί δεν προτιμούν την φύτευση της τομάτας στο ύπαιθρο, αλλά επιλέγουν να καλλιεργούν σε θερμοκήπια, όπου οι συνθήκες είναι πιο ελεγχόμενες, άρα και η παραγωγή θα επηρεαστεί πολύ πιο θετικά. Επίσης, μέσα στο θερμοκήπιο ο παραγωγός μπορεί να παράξει τομάτες όλο τον χρόνο, όχι μόνο τους θερινούς μήνες, κάτι που δεν μπορεί να κάνει όταν η καλλιέργειά του είναι υπαίθρια.

1.15.5 Θρέψη και λίπανση της τομάτας σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια

Η σωστή θρέψη είναι το κλειδί για μία επιτυχημένη καλλιέργεια, ειδικά στην περίπτωση της υδροπονικής καλλιέργειας, η οποία βασίζεται εξ ολοκλήρου στο θρεπτικό διάλυμα για να μπορέσει να πάρει το φυτό τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία που χρειάζεται και να αναπτυχθεί. Οι συγκεντρώσεις, λοιπόν, των θρεπτικών στοιχείων

θα πρέπει να διατηρούνται στα επιθυμητά επίπεδα στο ριζικό περιβάλλον. Στην περίπτωση, όμως, που για την υδροπονική καλλιέργεια χρησιμοποιούνται υποστρώματα, τότε το πιο αντιπροσωπευτικό διάλυμα για να καταλάβουμε τι γίνεται στο περιβάλλον των ριζών είναι το διάλυμα απορροής. Οπότε, σύμφωνα με τις τιμές τού διαλύματος απορροής ρυθμίζεται και το διάλυμα τροφοδοσίας, αλλά και το διάλυμα συμπλήρωσης στα κλειστά υδροπονικά συστήματα.

Η σύσταση των θρεπτικών διαλυμάτων αλλάζει σύμφωνα με το στάδιο ανάπτυξης που βρίσκεται το φυτό και αποδίδεται στο ότι οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων είναι διαφορετικές στα φύλλα συγκριτικά με τους καρπούς. Στην αρχή, η τομάτα σχηματίζει μόνο φύλλα και αργότερα, όταν αρχίζουν να σχηματίζονται οι καρποί, τότε το μεγαλύτερο μέρος τής φυτικής μάζας, που παράγεται, αποτελείται από τους καρπούς. Γι' αυτό το λόγο, διαφέρουν οι συγκεντρώσεις απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων μεταξύ τού βλαστικού και του αναπαραγωγικού σταδίου.

Γενικά, η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας συνεχώς τροποποιείται ανάλογα από το στάδιο ανάπτυξης στο οποίο βρίσκεται το φυτό, την εποχή τού έτους και τις κλιματικές συνθήκες που υπάρχουν στην κάθε περιοχή, αν, δηλαδή, βρίσκεται στη Μεσόγειο ή στη Βόρεια Ευρώπη. Ακόμη, η σύνθεση μπορεί να επηρεαστεί και από το αν το φυτικό είδος είναι ποικιλία ή υβρίδιο, την θέση που βρίσκεται το θερμοκήπιο, την εποχή τού έτους, αν χρησιμοποιείται κάποιο υπόστρωμα για την καλλιέργεια κ.ά. Οι παραπάνω, λοιπόν, τιμές είναι ενδεικτικές και τροποποιούνται σύμφωνα με τους παραπάνω παράγοντες που αναφέρθηκαν (Nikolaou et al., 2021). Το λογισμικό NUTRISENSE, λοιπόν, λαμβάνει υπόψιν όλους αυτούς τους παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω και βοηθάει στην δημιουργία τής σύνθεσης των θρεπτικών διαλυμάτων σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που έχει το κάθε καλλιεργούμενο είδος (Savvas et al., 2020).

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η παρούσα μεταπτυχιακή μελέτη πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Κηπευτικών Καλλιεργειών τού Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Το πείραμα εγκαταστάθηκε στο υαλόφρακτο θερμοκήπιο του εργαστηρίου κηπευτικών και διήρκησε από τον Οκτώβριο του 2022 μέχρι και τον Μάιο του 2023 (25/10/2022 – 29/05/2023). Οι αναλύσεις που χρειάστηκαν να γίνουν για τις ανάγκες τού πειράματος πραγματοποιήθηκαν στους χώρους τού Εργαστηρίου Κηπευτικών με τον εξοπλισμό και τα απαραίτητα όργανα για την υλοποίησή του.

2.1 Ο χώρος του πειράματος

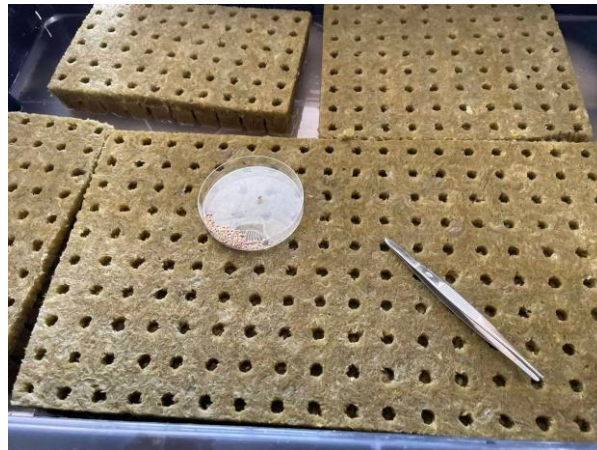
Το συγκεκριμένο πείραμα εγκαταστάθηκε στον τέταρτο θάλαμο του υαλόφρακτου θερμοκηπίου, ο οποίος είχε έκταση 60 m². Ο θάλαμος αυτός είχε κατάλληλες αυτοματοποιημένες συνθήκες για τον έλεγχο του κλίματος της καλλιέργειας. Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία ελέγχονταν από κατάλληλα αισθητήρια όργανα που βρίσκονταν μέσα στον χώρο τού θερμοκηπίου, όπως επίσης και η ρύθμιση της θέρμανσης, με το άνοιγμα και το κλείσιμο παραθύρων, γινόταν αυτόματα και ελέγχονταν και ο αερισμός. Με την χρήση ενός καυστήρα φυσικού αερίου γινόταν η θέρμανση του χώρου και συγκεκριμένα το αέριο μετακινούνταν με κατάλληλους σωλήνες, οι οποίοι βρίσκονταν σε περιμετρική διάταξη γύρω από την καλλιέργεια και διατηρούσαν τις θερμοκρασίες τής ημέρας στους 23°C και τις θερμοκρασίες τής νύχτας στους 16°C. Έτσι, διατηρήθηκε μία διαφορά θερμοκρασίας, μεταξύ ημέρας και νύχτας, τουλάχιστον 6°C, όπως προτείνεται από τον Yang et al., 2016. Τέλος, για τον έλεγχο των εντομολογικών εχθρών τής καλλιέργειας και την απομάκρυνσή τους χρησιμοποιούνταν ένα εντομοστεγές δίχτυ, το οποίο βρισκόταν στα παράθυρα του θαλάμου, αλλά και στην είσοδο.



Εικόνα 1.15 Εικόνα θαλάμου θερμοκηπίου αφού έγινε η εγκατάσταση των φυτών

2.2 Η εγκατάσταση του πειράματος

Για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης υδροπονικής καλλιέργειας του υβριδίου ‘Ekstasi’ F1 χρησιμοποιήθηκαν σπέρματα από το συγκεκριμένο υβρίδιο τομάτας, τα οποία, στις 25 Οκτωβρίου 2022, τοποθετήθηκαν σε μικρούς κύβους από πετροβάμβακα και καλύφθηκαν με βερμικουλίτη για την αρχική έκπτυξη του ριζιδίου και την ανάπτυξη των κοτυληδόνων.



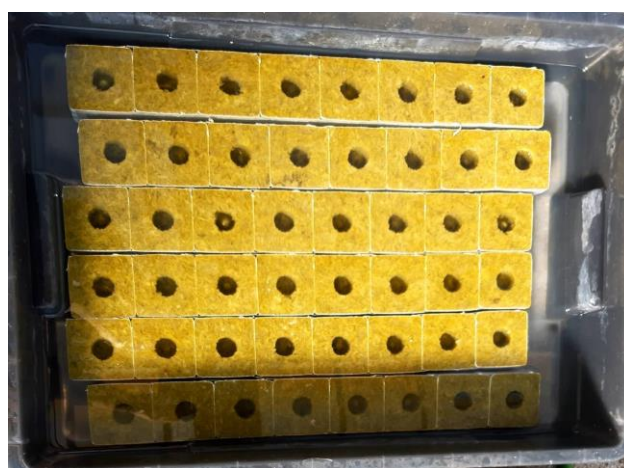
Εικόνα 1.16 Σπέρματα του υβριδίου *Solanum lycopersicum* L. ‘Ekstasi’ F1, μέσα στο τριβλίο και πριν την τοποθέτησή τους στους μικρούς κύβους πετροβάμβακα

Μόλις η ρίζα άρχισε να αποκτά μεγαλύτερο μέγεθος και να ξεφεύγει από τα όρια του μικρού κύβου, αλλά και όταν άρχισαν να εμφανίζονται οι κοτυληδόνες, τότε τα φυτά μεταφέρθηκαν σε μεγαλύτερο κύβο πετροβάμβακα με διαστάσεις 7,5x6x7,5 cm.



Εικόνα 1.17 Εμφάνιση κοτυληδόνων (αριστερά) και τοποθέτηση του κάθε μικρού κύβου σε δίσκους για μεγαλύτερη ανάπτυξη του ριζιδίου (δεξιά)

Τα νεαρά σπορόφυτα διαβρέχονταν με θρεπτικό διάλυμα σχεδόν κάθε δύο ημέρες. Την στιγμή που τα σπορόφυτα εμφάνισαν τις κοτυληδόνες, στις 12 Νοεμβρίου 2022, τότε τοποθετήθηκαν σε μεγαλύτερους κύβους, διαστάσεων 7,5x6x7,5 cm. Πριν τοποθετηθούν τα νεαρά σπορόφυτα, οι μεγαλύτεροι κύβοι είχαν διαβραχεί κι αυτοί με θρεπτικό διάλυμα, ώστε να μπορέσει η ρίζα να αναπτυχθεί μέσα σε αυτόν τον κύβο.



Εικόνα 1.18 Κύβοι πετροβάμβακα με διαστάσεις 7,5x6x7,5 cm, που είχαν υποστεί διαβροχή με θρεπτικό διάλυμα



Εικόνα 1.19 Εμφάνιση των πρώτων πραγματικών φύλλων

Στη συνέχεια, καθώς η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος γινόταν όλο και μεγαλύτερη, σε σημείο που ξέφευγε από το μέγεθος του κύβου, τότε τα φυτά τοποθετήθηκαν, στις 28 Νοεμβρίου 2022, σε ορθογώνιες πλάκες από πετροβάμβακα, διαστάσεων 100x20x7,5 cm. Σε αυτές τις πλάκες τοποθετήθηκαν τρία φυτά τομάτας. Μετά την μεταφορά των φυτών στις μεγαλύτερες ορθογώνιες πλάκες, τότε τοποθετήθηκαν και στον θάλαμο του ναλόφρακτου θερμοκηπίου για την συνέχεια του πειράματος.



Εικόνα 1.20 Εγκατάσταση φυτών στις μεγαλύτερες ορθογώνιες πλάκες πετροβάμβακα και τοποθέτησή τους στον θάλαμο του θερμοκηπίου

Στην αρχή, πριν την τοποθέτηση των φυτών, οι ορθογώνιες πλάκες από πετροβάμβακα είχαν υποστεί διαβροχή με θρεπτικό διάλυμα, το λεγόμενο διάλυμα διαβροχής και μόλις απορροφήθηκε το διάλυμα από το υπόστρωμα, τότε έγιναν τρεις

πλάγιες τομές σε κάθε σάκο για να μπορεί να εξέρχεται ό,τι δεν απορροφάται από το φυτό από τη χορήγηση του διαλύματος τροφοδοσίας.

Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν τρεις μεταχειρίσεις, T₁, T₂ και T₃ με τρεις επαναλήψεις στην κάθε μεταχείριση. Σε κάθε κανάλι, μήκους 6 μέτρων, τοποθετήθηκαν 6 ορθογώνιες πλάκες πετροβάμβακα, σε σύνολο 9 καναλιών, με τρία φυτά σε κάθε πλάκα από πετροβάμβακα, οπότε κάθε κανάλι είχε 18 φυτά με πυκνότητα 3,1 φυτά m⁻². Στην πρώτη μεταχείριση, στην T₁, που ήταν ο μάρτυρας, χρησιμοποιήθηκε ακατέργαστο νερό με συγκέντρωση Na⁺ 0,6 mM, στην δεύτερη και στην τρίτη μεταχείριση, στις T₂ και T₃ αντίστοιχα, χρησιμοποιήθηκε ακατέργαστο νερό με συγκέντρωση Na⁺ 4 mM.

Όσον αφορά το νερό άρδευσης, αλλά και το διάλυμα διαβροχής για τις τρεις μεταχειρίσεις της κλειστή υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας θα έπρεπε να πληρούν κάποιες προϋποθέσεις, ώστε να μην ξεφεύγουν από τα επιτρεπτά όρια τιμών και να μπορέσει η καλλιέργεια να αποδώσει. Στον παρακάτω πίνακα, στον Πίνακα 1.4, παρουσιάζεται η αναλυτική χημική σύνθεση του νερού άρδευσης και του διαλύματος διαβροχής που χρησιμοποιήθηκαν και στις τρεις μεταχειρίσεις στην κλειστή υδροπονική καλλιέργεια τομάτας.

Πίνακας 1.3 Χημική σύνθεση του νερού άρδευση που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή θρεπτικού διαλύματος και του διαλύματος διαβροχής για τις T₁, T₂ και T₃. Η EC δίνεται σε dS m⁻¹, οι συγκεντρώσεις των μακροστοιχείων δίνονται σε mM και των ιχνοστοιχείων μM.

Παράμετρος	Νερό άρδευσης (T1)	Νερό άρδευσης (T2, T3)	Διάλυμα διαβροχής (T1)	Διάλυμα διαβροχής (T2)	Διάλυμα διαβροχής (T3)
EC	0.30	0.65	3.80	3.80	4.20
pH	7.30	7.30	5.60	5.60	5.60
K ⁺	0.00	0.00	7.25	6.47	7.25
Ca ²⁺	0.90	0.90	9.49	8.53	9.49
Mg ²⁺	0.30	0.30	4.22	3.79	4.22
NH ₄ ⁺	0.00	0.00	1.34	1.50	1.50
SO ₄ ²⁻	0.20	0.20	5.63	5.69	7.42
NO ₃ ⁻	0.00	0.00	19.24	19.11	19.24
P	0.00	0.00	1.20	1.20	1.20

Fe	0.00	0.00	20.00	20.00	20.00
Mn	0.00	0.00	10.00	10.00	10.00
Zn	0.00	0.00	7.00	7.00	7.00
Cu	0.00	0.00	0.75	0.75	0.75
B	0.00	0.00	40.00	40.00	40.00
Mo	0.00	0.00	0.70	0.70	0.70
Cl ⁻	0.40	3.80	4.50	4.50	4.50
Na ⁺	0.60	4.00	0.60	4.00	4.00
HCO ₃ ⁻	2.20	2.20	0.40	0.40	0.40

Σε όλα τα κανάλια έγινε εγκατάσταση ενός αρδευτικού σωλήνα όπου τοποθετήθηκαν σταλάκτες σταθερής παροχής (2lt/h). Σε αυτούς τους σταλάκτες τοποθετήθηκαν μικροσωληνίσκοι, τύπου ‘spaghetti’ (Φ6), οι οποίοι είχαν ειδική κόκκινη λόγχη στην απόληξή τους και στερεώθηκαν διαγωνίως στο υπόστρωμα, ώστε να χορηγούν θρεπτικό διάλυμα στην καλλιέργεια.



Εικόνα 1.21 Απεικόνιση μικροσωληνίων με τις κόκκινες λόγχες που έχουν τοποθετηθεί διαγώνια στον κύβο από πετροβάμβακα

2.3 Το Φυτικό Υλικό

Για την καλλιέργεια χρησιμοποιήθηκαν σπέρματα από φυτά τομάτας *S. lycopersicum* L. του υβριδίου ‘Ekstasi F1’, τα οποία τοποθετήθηκαν στα σπορεία με υπόστρωμα πετροβάμβακα για την βλάστησή τους και, στη συνέχεια, μεταφέρθηκαν για μεταφύτευση στο θάλαμο του θερμοκηπίου.



Εικόνα 1.22 Απεικόνιση καρπού υβριδίου ‘Ekstasi F1’ επάνω στο φυτό στον θάλαμο του θερμοκηπίου τού Γ.Π.Α.

Το συγκεκριμένο υβρίδιο είναι αναρριχώμενος τύπος τομάτας με μέτρια ωριμότητα. Ο καρπός έχει γλυκιά γεύση, η σάρκα του είναι σφιχτή και το βάρος του κυμαίνεται μεταξύ 250 με 300 γραμμάρια. Έχει πλούσιο φύλλωμα, το ριζικό του σύστημα είναι δυνατό και σε κάθε ταξιανθία μπορούν να παραχθούν 4 με 6 καρποί. Έχει ανεκτικότητα σε ασθένειες, όπως TSWV, ToMV κ.ά.

2.4 Καλλιεργητικές φροντίδες

2.4.1 Κλάδεμα – αραίωση ανθέων

Για την κατάλληλη ανάπτυξη και την ευρωστία των φυτών γινόταν κάθε εβδομάδα το κατάλληλο κλάδεμα των φυτών τοματιάς. Τα φυτά τοματιάς είχαν μονοστέλεχο βλαστό και στο κλάδεμά τους αφαιρούνταν οι πλευρικοί βλαστοί οι οποίοι εκφύονταν από τις μασχάλες των φύλλων. Επιπλέον, εκτός από το κλάδεμα, πραγματοποιούνταν και η αραίωση των ανθέων, αφού το φυτό είχε αναπτυχθεί βλαστικά και είχε αποκτήσει έναν γερό βλαστό. Σε κάθε ταξιανθία αφήνονταν τέσσερα άνθη, ώστε να μην επιβαρυνθεί αργότερα το φυτό με πάρα πολλούς καρπούς και να μπορέσει να διατηρηθεί η ομοιογένεια στο μέγεθος των καρπών και να εξισορροπηθεί η βλαστική και αναπαραγωγική ανάπτυξη, σύμφωνα με την καθιερωμένη εμπορική πρακτική γι’ αυτόν τον τύπο τομάτας.



Εικόνα 1.23 Απεικόνιση πλάγιου βλαστού που εκφύεται από την μασχάλη των φύλλων

2.4.2 Υποστύλωση

Τα φυτά τοματιάς διαμορφώθηκαν σε μονοστέλεχο σύστημα ανάπτυξης και όποτε η κορυφή τού στελέχους έφτανε στο επίπεδο των οριζόντιων συρμάτων στήριξης, τότε κατεβάζαμε τον βλαστό. Για την υποστύλωση χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένα καρούλια με σπάγκους, σε δύο χρώματα, λευκό και πράσινο, ώστε να ξεχωρίζουν τα φυτά σε κάθε σειρά και κρεμάστηκαν στα οριζόντια σύρματα που βρίσκονταν πάνω από τα κανάλια άρδευσης. Αφού έγινε η εγκατάσταση των φυτών, ο σπάγκος τυλίχτηκε στη βάση τού βλαστού τού φυτού και δημιουργήθηκε μία θηλιά γύρω από τον λαιμό τού φυτού. Καθ' όλη την διάρκεια ανάπτυξης των φυτών, ο σπάγκος τυλιγόταν κάτω από τα φύλλα των φυτών για να μπορέσει το φυτό να κρατηθεί σε όρθια θέση και να μην πλαγιάζει. Με το κατέβασμα των φυτών δεν χρειάστηκε να γίνει διακοπή τής καλλιέργειας από πολύ νωρίς, οπότε τα φυτά μπόρεσαν να αποκτήσουν μεγαλύτερο ύψος και διευκολύνονταν έτσι και οι καλλιεργητικές περιποιήσεις.



Εικόνα 1.24 Απεικόνιση καρουλιών διαφορετικού χρώματος που στερεώνονταν στα οριζόντια σύρματα για να ξεχωρίζουν τα φυτά τής κάθε σειράς



Εικόνα 1.25 Απεικόνιση του κατακόρυφου σπάγκου με ειδικό πλαστικό ‘πιαστράκι’ για τη στήριξη των φυτών

2.4.3 Αφαίρεση παλαιών φύλλων

Σε όλη την διάρκεια της καλλιέργειας αφαιρούνταν από τα φυτά τα κατώτερα φύλλα, τα οποία λόγω της θέσης που είχαν, είτε ήταν πιο γηρασμένα, είτε σκιάζονταν περισσότερο από τα υπόλοιπα, με αποτέλεσμα να μην αποδίδουν το ίδιο σε φωτοσυνθετικά προϊόντα. Επίσης, λόγω του λιγότερου φωτισμού και αερισμού που είχαν, αυξάνονταν και οι πιθανότητες για προσβολές από ιούς και ασθένειες. Σε κάθε φυτό, λοιπόν, αφαιρούνταν τα 3 με 4 παλαιά φύλλα αφήνοντας, σε σύνολο, γύρω στα 16 με 18 φύλλα σε όλο το φυτό και έχοντας ως στόχο έναν δείκτη φυλλικής επιφάνειας περίπου 3 (Σάββας., 2012).

2.4.4 Συγκομιδή καρπών

Η συγκομιδή των καρπών τής τομάτας ξεκίνησε την 81^η ημέρα, δηλαδή στις 27 Φεβρουαρίου 2023. Οι καρποί συλλέγονταν κάθε εβδομάδα, δύο φορές την εβδομάδα και η συγκομιδή τους εξαρτιόταν από το αν είχαν αποκτήσει το κατάλληλο εμπορικό τους χρώμα. Αν, δηλαδή, είχαν αποκτήσει κόκκινο χρώμα και ήταν σε κατάλληλο μέγεθος, τότε θα ήταν η στιγμή που θα αφαιρούνταν από το φυτό. Η κοπή των καρπών γινόταν με ένα κοφτάκι και σημειωνόταν σε ποιο κανάλι βρίσκονταν και από ποια μεταχείριση ήταν. Τέλος, οι ώριμοι καρποί από κάθε μεταχείριση ζυγίζονταν στον ζυγό.



Εικόνα 1.26 Όριμοι καρποί τομάτας αμέσως μετά την συγκομιδή

2.4.5 Έλεγχος διαλυμάτων απορροής

Κάθε δύο με τρεις ημέρες, δηλαδή περίπου τρεις φορές την εβδομάδα ελέγχονταν τα διαλύματα απορροής σχετικά με την ποσότητά τους, το pH τους, αλλά και την ηλεκτρική αγωγιμότητά τους (EC). Στο τέλος κάθε καναλιού, στον θάλαμο του θερμοκηπίου, υπήρχε ένας κουβάς περιεκτικότητας 20 λίτρων (L), ο οποίος ‘μάζευε’ την απορροή. Η ποσότητα του διαλύματος απορροής ήταν σημαντική για να υπολογιστεί το κλάσμα απορροής, αλλά και να ρυθμιστεί η άρδευση και συγκεκριμένα η συχνότητά της, αναλόγως από την κατάσταση στο περιβάλλον τής ρίζας. Στο κλειστό υδροπονικό σύστημα το κλάσμα απορροής ήταν 0,30 (Σάββας., 2012) και ήταν ρυθμισμένο έτσι, ώστε να λειτουργεί σωστά η κεφαλή υδρολίπανσης και να μπορέσει να αποδώσει στην μικρή έκταση της πειραματικής καλλιέργειας. Αυτό, βέβαια, δεν

επηρέασε σε κανένα βαθμό, αρνητικά, την καλλιέργεια, αφού το σύστημα λογισμικού NUTRISENSE ήταν ενημερωμένο από την αρχή και υπολογιζόταν κατά την διάρκεια της σύνθεσης του διαλύματος τροφοδοσίας. Με τον έλεγχο, λοιπόν, του pH και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας δημιουργήθηκε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την πορεία της καλλιέργειας και οι παράμετροι αυτοί παρέμεναν εντός των ανεκτών ορίων για να επιτευχθεί η σωστή ανάπτυξη των φυτών και, κατ' επέκταση, να δώσει μια καλή παραγωγή. Ακόμη κι, όμως, αν ξεπερνούσαν τα όρια των τιμών, έστω και λίγο, αυτοί οι παράμετροι, τότε άμεσα διορθωνόταν η σύνθεση του διαλύματος τροφοδοσίας, ώστε να επανέλθουν στις κανονικές τους τιμές και να μην επηρεαστεί αρνητικά η εξέλιξη της καλλιέργειας.

2.4.6 Εντομολογικοί εχθροί και ασθένειες τομάτας

Για την προστασία τής τομάτας από εχθρούς, όπως έντομα, μύκητες, βακτήρια, ιούς και ασθένειες, όπως ο περονόσπορος, το φουζάριο, το ωίδιο κ.ά., τοποθετήθηκαν στα παράθυρα, αλλά και στην είσοδο του θερμοκηπίου εντομοστεγή δίχτυα, όπως, επίσης, χρωματικές και φερομονικές παγίδες. Οι χρωματικές παγίδες ήταν τριών ειδών, αυτές με το κίτρινο χρώμα, αυτές με το μπλε χρώμα και αυτές με το μαύρο χρώμα. Οι κίτρινες παγίδες ήταν για να προσελκύσουν πληθυσμούς τού αλευρώδη (*Trialeurodes vaporariorum*), οι μπλε παγίδες ήταν για να προσελκύσουν πληθυσμούς τού θρίπα (*Frankliniella occidentalis*) και οι μαύρες παγίδες ήταν για να προσελκύσουν πληθυσμούς τού τετρανύχου (*Tetranychus urticae*). Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν και φερομονικές παγίδες για την προσέλκυση των πληθυσμών τής τούτας (*Tuta absoluta*), η οποία αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς εχθρούς για την καλλιέργεια της τομάτας.



Εικόνα 1.27 Απεικόνιση θαλάμου του θερμοκηπίου με τις χρωματικές παγίδες από αριστερά προς τα δεξιά και την φερομονική παγίδα στην άκρη δεξιά



Εικόνα 1.28 Απεικόνιση ενηλίκων ατόμων τούτας που πιάστηκαν στην φερομονική παγίδα



Εικόνα 1.29 Χαρακτηριστικές στοές που δημιουργεί η προνύμφη της τούτας στα φύλλα της τομάτας

Για την αντιμετώπιση των εχθρών, εκτός από τις παγίδες που τοποθετήθηκαν, έγινε και βιολογική αντιμετώπιση με την χρήση ενός αρπακτικού έντομου, του *Nesidiocoris tenuis*. Το συγκεκριμένο αρπακτικό έντομο τρέφεται με την τούτα και με τον αλευρώδη.



Εικόνα 1.30 Βιολογική αντιμετώπιση της τούτας και του αλευρώδη με αρπακτικό έντομο *Nesidiocoris tenuis*

Για την αντιμετώπιση ασθενειών, όπως ο περονόσπορος, γινόταν περιοδικά η χρήση του διασυστηματικού μυκητοκτόνου Fusiet Aliette με τρεις ψεκασμούς στην αρχή, τρεις φορές ανά μήνα.

2.5 Εργαστηριακές αναλύσεις θρεπτικών στοιχείων

2.5.1 Προσδιορισμός νιτρικών με την μέθοδο της φασματομετρίας χρησιμοποιώντας χλωριούχο βανάδιο

Για να προσδιοριστούν οι συγκεντρώσεις των νιτρικών στα δείγματα των διαλυμάτων απορροής χρησιμοποιήθηκε το φασματοφωτόμετρο 'Anthos zenith 200rt', το οποίο διαθέτει ένα microplate 96 θέσεων για την τοποθέτηση των δειγμάτων και έχει μήκος κύματος 540 nm.



Εικόνα 1.31 Φασματοφωτόμετρο, Anthos zenith 200rt, που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση των νιτρικών

2.5.2 Προσδιορισμός φωσφόρου με την μέθοδο Murphy – Riley

Για να προσδιοριστούν οι συγκεντρώσεις του φωσφόρου στα δείγματα των διαλυμάτων απορροής χρησιμοποιήθηκε ξανά το ίδιο μηχάνημα, το φασματοφωτόμετρο ‘Anthos zenith 200rt’, το οποίο διαθέτει ένα microplate 96 θέσεων για την τοποθέτηση των δειγμάτων, αλλά με μήκος κύματος 880 nm.



Εικόνες 1.32 Εμφανής αλλαγή χρώματος μετά που βάλामε τα διάφορα αντιδραστήρια για τον εντοπισμό του φωσφόρου

2.5.3 Προσδιορισμός ασβεστίου και μαγνησίου με τη χρήση της ατομικής απορρόφησης

Για να προσδιοριστούν οι συγκεντρώσεις των κύριων θρεπτικών στοιχείων, όπως είναι το ασβέστιο και το μαγνήσιο, στα δείγματα των διαλυμάτων απορροής έγινε η μέθοδος της «Φασματομετρίας ατομικής απορρόφησης» με την χρήση του μηχανήματος «Atomic absorption spectrophotometer Shimadzu AA-7000».



Εικόνα 1.33 Μηχάνημα ατομικής απορρόφησης, AA – 7000, που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του ασβεστίου και του μαγνησίου

2.5.4 Προσδιορισμός καλίου και νατρίου με την χρήση του φλογοφωτομέτρου

Για να προσδιοριστούν οι συγκεντρώσεις του καλίου και του νατρίου στα δείγματα των διαλυμάτων απορροής πραγματοποιήθηκε η μέθοδος της «Φασματοσκοπίας ατομικής εκπομπής φλόγας» με την χρήση του φλογοφωτομέτρου και συγκεκριμένα του μοντέλου «Sherwood Flame Photometer 410».



Εικόνα 1.34 Μηχάνημα φλογοφωτόμετρου, Flame Photometer 410, που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του καλίου και του νατρίου

2.5.5 Προσδιορισμός ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) και pH

Ο προσδιορισμός της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) και του pH γίνονταν άμεσα και γρήγορα με την χρήση του φορητού οργάνου «Hanna HI8424» για την μέτρηση του pH και του φορητού οργάνου «H198311 DiST 5, Hanna» για την μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.



Εικόνα 1.35 Φορητό όργανο μέτρησης pH (αριστερά) και EC (δεξιά)

2.5.6 Προσδιορισμός θειϊκών

Ο προσδιορισμός τής συγκέντρωσης των θειϊκών στα δείγματα των διαλυμάτων απορροής έγινε με τη χρήση νεφελομετρικής μεθόδου στα 420 nm.

2.5.7 Προσδιορισμός χλωρίου

Ο προσδιορισμός τής συγκέντρωσης του χλωρίου στα δείγματα των διαλυμάτων απορροής έγινε με τη μέθοδο του θειοκυανικού υδραργύρου – σιδήρου στα 480 nm.

2.5.8 Ξηρή βιομάζα (%) στα φύλλα

Για την μέτρηση της ξηρής βιομάζας στα φύλλα, πάρθηκε, την 59^η, την 87^η, 116^η, 146^η και 171 ημέρα, το 4^ο φύλλο (Campbell et al., 2000; Sonneveld and Voogt, 2009) από 6 τυχαία επιλεγμένα φυτά σε κάθε επανάληψη και συλλέχθηκε, ζυγίστηκε και τοποθετήθηκε για ξήρανση στους 65°C για 7 ημέρες μέχρι να αποκτήσει σταθερό βάρος. Στη συνέχεια, όλα τα αποξηραμένα δείγματα ιστού αλέστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων καλίου (K⁺), ασβεστίου (Ca²⁺), μαγνησίου (Mg⁺), ολικού αζώτου (ολικού-N), φωσφόρου (P) και νατρίου (Na⁺). Για την εκχύλιση K, Ca, Mg, P και Na από τους φυτικούς ιστούς, ακολουθήθηκε η διαδικασία ξηρής τέφρας. Τα αλεσμένα μετατράπηκαν σε τέφρα σε φούρνο muffle (LM-112, Linn High Therm) στους 550°C για 8 ώρες και, έπειτα, εκχυλίστηκαν με τη χρήση διαλύματος HCl (0,25 M). Τα λαμβανόμενα υδατικά διαλύματα υποβλήθηκαν, στη συνέχεια, σε χημική ανάλυση.



Εικόνα 1.36 Ορισμένα δείγματα από την ξηρή βιομάζα των φύλλων



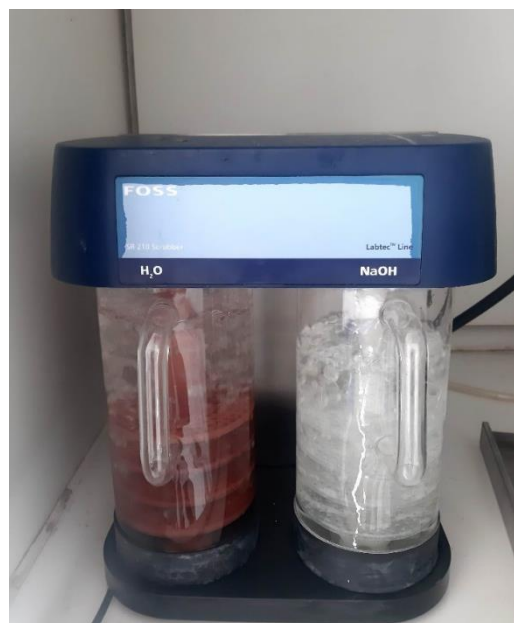
Εικόνα 1.37 Μηχάνημα LM-112, Linn High Therm που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία τέφρας

Επίσης, μετρήθηκε και η περιεκτικότητα σε ολικό άζωτο στα αποξηραμένα δείγματα φυτικών ιστών σύμφωνα με την μέθοδο Kjendal.



Εικόνα 1.38 Μηχάνημα Tecator Kjeltac 8200 για τον προσδιορισμό του ολικού αζώτου

Η χώνευση και η απόσταξη πραγματοποιήθηκαν με την χρήση ενός Labtec SR 210 και ένα Tecator Kjeltac 8200 (FOSS A/S, Hillerod, Δανία). Έπειτα, τα αποσταγμένα δείγματα τιτλοδοτήθηκαν χειροκίνητα για τον προσδιορισμό τού ολικού αζώτου.



Εικόνα 1.39 Μηχάνημα Labtec SR 210, για χώνευση (αριστερά) και απόσταξη (δεξιά) δείγματος για τον προσδιορισμό του ολικού αζώτου

2.5.9 Μέτρηση ολικών διαλυτών στερεών (°Brix) με την χρήση του διαθλασιμέτρου

Ο βαθμός °Brix μετρήθηκε με διαθλασίμετρο για να υπολογιστούν τα σάκχαρα που υπάρχουν στον καρπό.



Εικόνα 1.40 Διαθλασίμετρο που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση των διαλυτών στερεών συστατικών (°Brix), ονομασία: Schmidt & Haensch HR32B



Εικόνα 1.41 Ενδεικτικοί καρποί τομάτας που χρησιμοποιήθηκαν για να μετρηθούν τα °Brix

2.5.10 Μέτρηση Τιτλοδοτούμενης Οξύτητας (κιτρικό οξύ %)

Η τιτλοδοτούμενη οξύτητα προσδιορίστηκε σε 10 mL χυμού τομάτας με ποτενσιομετρική τιτλοδότηση με 0,02 M NaOH σε pH 8,1.



Εικόνα 1.42 Απεικόνιση χυμού τομάτας για την μέτρηση της οξύτητας των καρπών

2.5.11 Μέτρηση δείκτη γεύσης

Ο δείκτης γεύσης, που προτάθηκε από τους Navez et al., (1999) και Nielsen (2003), μετρήθηκε σύμφωνα με τον τύπο:

Δείκτης γεύσης = (Βαθμοί °Brix / (20 x Τιτλοδοτούμενη Οξύτητα)) + Τιτλοδοτούμενη Οξύτητα

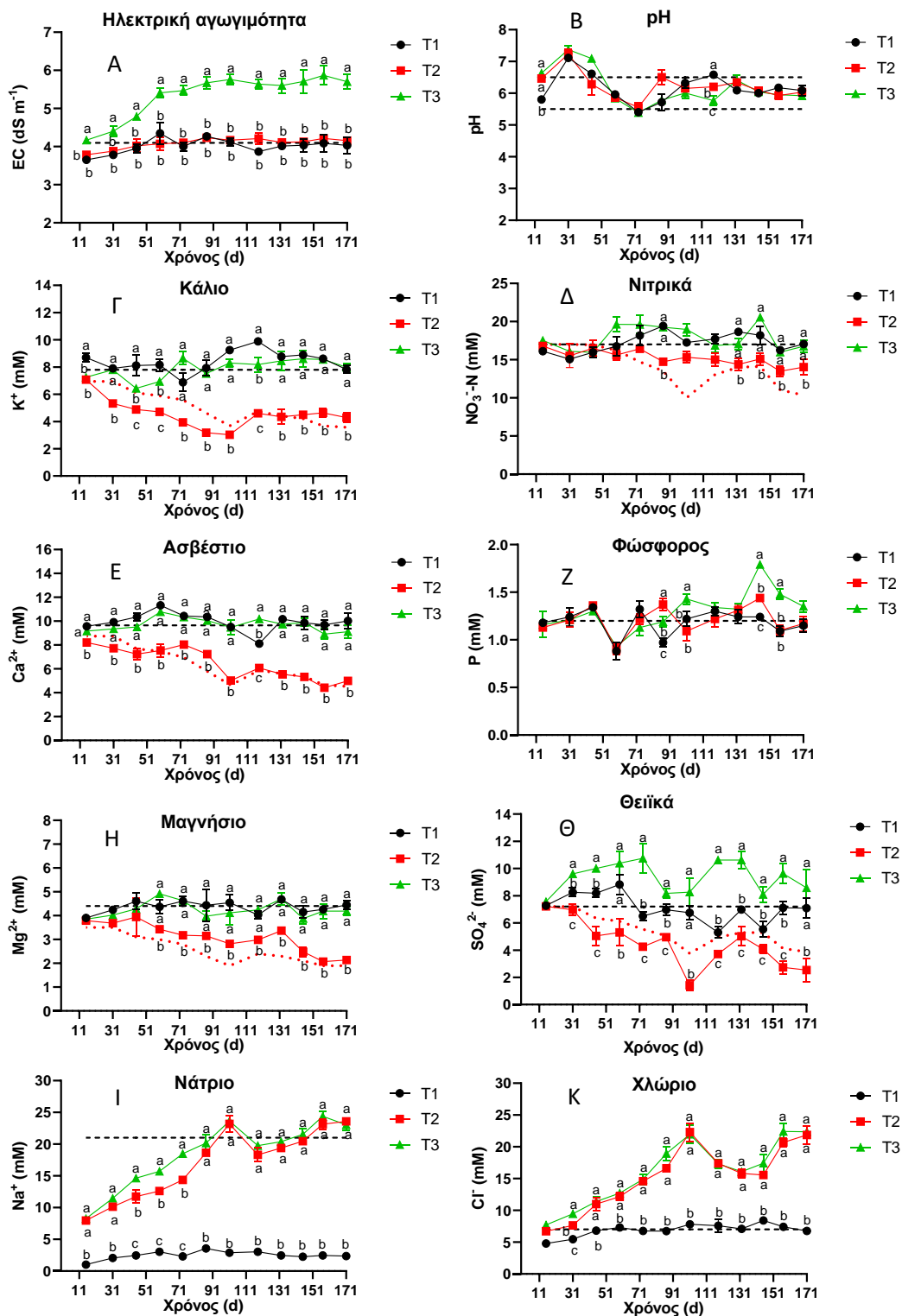
2.5.12 Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων

Το πείραμα διαμορφώθηκε ως ένα πλήρως τυχαιοποιημένο σχέδιο με τρεις μεταχειρίσεις και τρεις επαναλήψεις ανά μεταχείριση. Η σημαντικότητα των διαφορών μεταξύ των μεταχειρίσεων αξιολογήθηκε με την εφαρμογή μονοσήμαντης ανάλυσης ANOVA. Όταν η ANOVA ήταν σημαντική για μία μετρούμενη παράμετρο, ο διαχωρισμός των μέσων όρων πραγματοποιήθηκε με επίπεδο σημαντικότητας $p \leq 0,05$. Η στατιστική ανάλυση έγινε με το πακέτο STATISTICA, έκδοση 12,5 για Windows. Η γραφική αναπαράσταση των δεδομένων έγινε με την χρήση τού λογισμικού GraphPad Prism 8.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για να γίνει η αξιολόγηση του λογισμικού NUTRISENSE σχετικά με την αναπροσαρμογή των θρεπτικών διαλυμάτων στο κλειστό υδροπονικό σύστημα τομάτας μετρήθηκαν και μελετήθηκαν η πορεία τής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), η πορεία τού pH καθ' όλη την διάρκεια της κλειστής υδροπονικής καλλιέργειας, οι συγκεντρώσεις των κύριων θρεπτικών μακροστοιχείων, όπως του καλίου (K^+), του ασβεστίου (Ca^{2+}), του μαγνησίου (Mg^{2+}), του φωσφόρου (P), των θεικών (SO_4^{2-}), των νιτρικών (NO_3^- -N), αλλά και του νατρίου (Na^+) και του χλωρίου (Cl^-) σε δείγματα των διαλυμάτων απορροής (ΔΑ). Ακόμη, μετρήθηκαν θρεπτικά στοιχεία, όπως το ολικό άζωτο, ο φώσφορος (P), το κάλιο (K^+), το ασβέστιο (Ca^{2+}), το μαγνήσιο (Mg^{2+}) και το νάτριο (Na^+) στα φύλλα. Επίσης, παρατηρήθηκε και σημειώθηκε η πορεία τής παραγωγής των καρπών, αλλά και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τής παραγωγής, όπως τα ολικά διαλυτά στερεά ($^{\circ}Brix$), η τιτλοδοτούμενη οξύτητα (κιτρικό οξύ %) και ο δείκτης γεύσης.

3.1 Πορεία ηλεκτρικής αγωγιμότητας, pH, συγκέντρωσης μακροθρεπτικών στοιχείων, νατρίου και χλωρίου στο διάλυμα απορροής



Γράφημα 1. Εξέλιξη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), του pH, των συγκεντρώσεων των μακροθρεπτικών στοιχείων, του νατρίου (Na⁺) και του χλωρίου (Cl⁻) σε δείγματα διαλύματος απορροής (Δ.Α.) που συλλέγονται τακτικά από τις τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις κατά τη διάρκεια του πειράματος. Οι οριζόντιες διακεκομμένες γραμμές δείχνουν τις τυπικές τιμές-στόχους (χωρίς αναπροσαρμογή για την αντιστάθμιση της συσσώρευσης Na⁺ και Cl⁻) για K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, NO₃³⁻, P, SO₄²⁻ και Cl⁻ στο Δ.Α., ενώ οι

κόκκινες διακεκομμένες γραμμές δείχνουν τις αντίστοιχες τιμές-στόχους για την μεταχείριση T₂ που προσομοιώθηκαν από το NUTRISENSE σε κάθε αναπροσαρμογή του διαλύματος συμπλήρωσης. Οι κατακόρυφες ράβδοι υποδηλώνουν \pm τυπικά σφάλματα των μέσων όρων και τα διαφορετικά γράμματα σε κάθε ημερομηνία δειγματοληψίας υποδηλώνουν τις σημαντικές διαφορές σύμφωνα με το Duncan's post hoc test ($p \leq 0,05$).

Στο Γράφημα 1Α παρουσιάζεται η πορεία της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) σε όλη την διάρκεια της καλλιέργειας, στις μεταχειρίσεις T₁, T₂, και T₃ του πειράματος. Παρατηρείται ότι δεν υπήρξαν σημαντικές στατιστικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων T₁ και T₂, παρά μόνο στην μεταχείριση T₃, συγκριτικά με τις άλλες δύο. Συγκεκριμένα, την 101^η ημέρα παρατηρήθηκε μία αύξηση στις μεταχειρίσεις T₁ και T₂, αλλά, στη συνέχεια, οι συγκεντρώσεις των δύο αυτών μεταχειρίσεων παρέμειναν κοντά στην τιμή – στόχο, δηλαδή τα 4.1 dS m⁻¹ και η μεταχείριση T₃, ενώ στις πρώτες δειγματοληψίες ξεκίνησε σχετικά κοντά στην τιμή – στόχο, στη συνέχεια όλο και απομακρυνόταν.

Στο Γράφημα 1Β παρουσιάζεται το pH όπου δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές στατιστικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων T₁, T₂ και T₃. Μόνο την 11^η και την 118^η ημέρα παρατηρήθηκε μία στατιστική διαφορά στις τιμές, η οποία στη συνέχεια του πειράματος σταμάτησε να υπάρχει και οι τιμές συνέχισαν να παραμένουν εντός του εύρους των τιμών – στόχων. Επίσης, την 31^η ημέρα, στην δεύτερη και στην τρίτη δειγματοληψία, το pH ήταν υψηλότερο από το εύρος των τιμών - στόχων, που είναι μεταξύ 5.5 με 6.5, αλλά με την αναπροσαρμογή παρέμεινε εντός των επιτρεπτών ορίων για την υπόλοιπη διάρκεια του πειράματος.

Στο Γράφημα 1Γ παρουσιάζεται η συγκέντρωση του καλίου όπου στην μεταχείριση T₂ μειώθηκε, με την συσσώρευση του νατρίου και σταθεροποιήθηκε κοντά στα 4 mM, που ήταν ελάχιστα υψηλότερη από την μικρότερη αποδεκτή τιμή των 3.60 mM, σύμφωνα με την αναπροσαρμογή που έκανε το λογισμικό NUTRISENSE. Μετά την πρώτη δειγματοληψία, η συγκέντρωση του καλίου, στην μεταχείριση T₂, ήταν σημαντικά χαμηλότερη συγκριτικά με τις μεταχειρίσεις T₁ και T₃, οι οποίες παρέμειναν κοντά στην τιμή – στόχο, που ήταν τα 7.80 mM. Επίσης, σημαντικές στατιστικές διαφορές παρατηρήθηκαν μεταξύ των μεταχειρίσεων T₁ και T₃ μόνο την 45^η, την 59^η και την 118^η ημέρα, όταν η συγκέντρωση του καλίου στην μεταχείριση T₃ ήταν χαμηλότερη από αυτήν της T₁.

Στο Γράφημα 1Δ παρουσιάζεται η συγκέντρωση των νιτρικών και φαίνεται ότι η μεταχείριση T₁ με την T₃ δεν έχουν σημαντικές διαφορές, ενώ εντοπίζονται διαφορές στην μεταχείριση T₂ σε σχέση με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις. Συγκεκριμένα, η συγκέντρωση των νιτρικών στην T₂ είναι χαμηλότερη από αυτή στις μεταχειρίσεις T₁ και T₃, οι οποίες παρέμειναν κοντά στην τιμή – στόχο στη μεγαλύτερη διάρκεια της καλλιέργειας. Με την αναπροσαρμογή του διαλύματος συμπλήρωσης, στην 5^η δειγματοληψία η συγκέντρωση των νιτρικών, στην μεταχείριση T₂, παρέμεινε κοντά στην τιμή – στόχο, αλλά στην 6^η, στην 9^η, στην 10^η, στην 11^η και στην 12^η δειγματοληψία ήταν χαμηλότερη από αυτή των T₁ και T₃ λόγω της συσσώρευσης του χλωρίου.

Στο Γράφημα 1Ε παρουσιάζεται η συγκέντρωση του ασβεστίου και φαίνεται ότι στις μεταχειρίσεις T₁ και T₃ παρέμεινε κοντά στην τιμή – στόχο χωρίς σημαντικές στατιστικές διαφορές, παρά μόνο την 118^η ημέρα παρατηρήθηκε μία διαφορά. Στην μεταχείριση T₂ η συγκέντρωση του ασβεστίου μειωνόταν σταδιακά και, ακόμη και με την αναπροσαρμογή του διαλύματος συμπλήρωσης, συνέχισε να παραμένει χαμηλότερη από την συγκέντρωση των μεταχειρίσεων T₁ και T₃ και να μην ξεφεύγει από την τιμή - στόχο.

Στο Γράφημα 1Ζ παρουσιάζεται η συγκέντρωση του φωσφόρου και φαίνεται ότι μέχρι την 73^η ημέρα οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων ήταν παρόμοιες και στις τρεις μεταχειρίσεις και παρέμειναν κοντά στην τιμή – στόχο. Από ‘κεί και μετά, στην μεταχείριση T₃ παρατηρήθηκαν υψηλότερες τιμές συγκριτικά με τις μεταχειρίσεις T₁ και T₂ και ιδιαίτερα την 145^η ημέρα υπήρξε μία κορύφωση.

Στο Γράφημα 1Η παρουσιάζεται η συγκέντρωση του μαγνησίου και φαίνεται ότι καθ’ όλη την διάρκεια της καλλιέργειας η συγκέντρωση του μαγνησίου, για τις μεταχειρίσεις T₁ και T₃, παρέμεινε κοντά στην τιμή – στόχο, χωρίς να υπάρχουν σημαντικές στατιστικές διαφορές μεταξύ τους. Στην περίπτωση της μεταχείρισης T₂ η συγκέντρωση του μαγνησίου μειωνόταν σταδιακά και υπήρχαν σημαντικές στατιστικές διαφορές με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις, παραμένοντας, όμως, κοντά στην χαμηλότερη τιμή – στόχο.

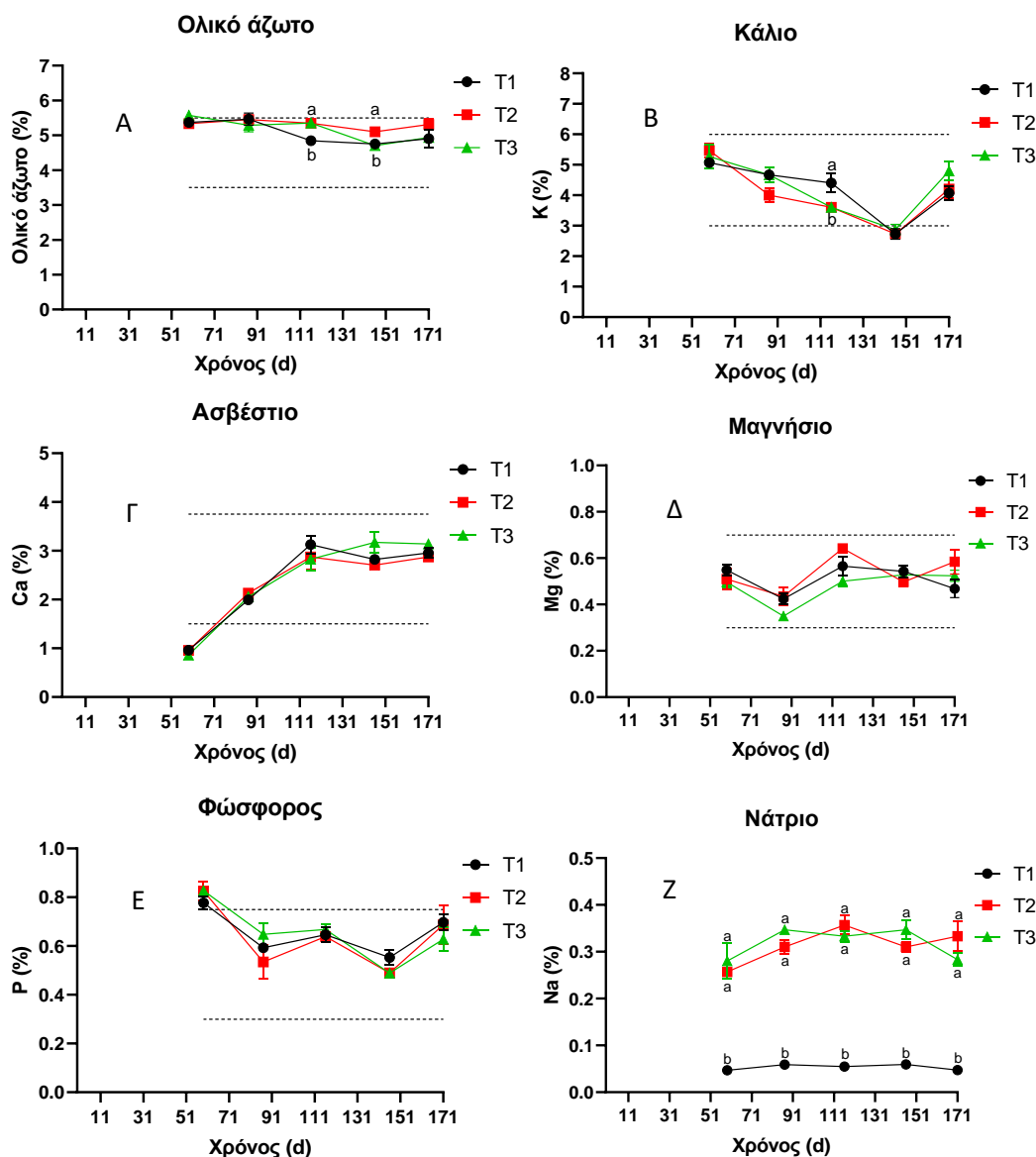
Στο Γράφημα 1Θ παρουσιάζεται η συγκέντρωση των θειικών και φαίνεται ότι στην συγκέντρωση των θειικών υπήρξαν σημαντικές διαφορές και στις τρεις μεταχειρίσεις, με την συγκέντρωση της μεταχείρισης T₂ πάλι να παραμένει χαμηλότερη

συγκριτικά με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις. Αυτή την φορά η μεταχείριση T₃ είχε την μεγαλύτερη συγκέντρωση θειϊκών σε όλη την διάρκεια της καλλιέργειας, έπειτα ακολούθησε η T₁, που παρέμεινε πιο κοντά στην τιμή – στόχο σε σχέση με τις άλλες δύο και τελευταία ήταν η μεταχείριση T₂, ακόμη και μετά που έγινε η αναπροσαρμογή τού διαλύματος συμπλήρωσης.

Στο Γράφημα 1I παρουσιάζεται η συγκέντρωση του νατρίου και φαίνεται ότι η συγκέντρωση του νατρίου στις μεταχειρίσεις T₂ και T₃ είχε ένα αυξανόμενο ρυθμό, χωρίς ιδιαίτερες σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Μέχρι την 101^η ημέρα η συγκέντρωση του νατρίου αυξανόταν μέχρι που έγινε αναπροσαρμογή τού διαλύματος συμπλήρωσης και, όπως φαίνεται, παρέμεινε κοντά στην τιμή – στόχο και μετά την αναπροσαρμογή. Η μεταχείριση T₁, όπως είναι λογικό, είχε πολύ χαμηλή συγκέντρωση νατρίου σε όλη την διάρκεια της καλλιέργειας, παρόλο που στις τρεις πρώτες δειγματοληψίες παρουσιάστηκε μία ελάχιστη αύξηση της συγκέντρωσης.

Στο Γράφημα 1K παρουσιάζεται η συγκέντρωση του χλωρίου και φαίνεται ότι, όπως και στην συγκέντρωση του νατρίου, έτσι και στην συγκέντρωση του χλωρίου, παρατηρείται μία παρόμοια πορεία. Πάλι στις μεταχειρίσεις T₂ και T₃ η συγκέντρωση του χλωρίου αυξήθηκε αρκετά, χωρίς ιδιαίτερες διαφορές μεταξύ τους μέχρι την 101^η ημέρα και, έπειτα, αφού έγινε η αναπροσαρμογή, σταμάτησε η αύξηση και παρέμεινε η συγκέντρωση κοντά στην τιμή – στόχο. Επίσης, στην μεταχείριση T₁ υπήρξε πάλι μία πολύ μικρή αύξηση στην αρχή και στην συνέχεια η συγκέντρωση του χλωρίου παρέμεινε σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

3.2 Πορεία συγκέντρωσης μακροθρεπτικών στοιχείων και νατρίου στα φύλλα



Γράφημα 2. Συγκέντρωση μακροθρεπτικών στοιχείων και νατρίου στο 4^ο φύλλο φυτών τομάτας σε πέντε ημερομηνίες δειγματοληψίας κατά τη διάρκεια του πειράματος. Οι συγκεντρώσεις παρουσιάζονται ως ποσοστά στην ξηρή βιομάζα (% w/w). Οι οριζόντιες διακεκομμένες γραμμές δείχνουν το βέλτιστο εύρος-στόχο για κάθε θρεπτικό στοιχείο στον φυτικό ιστό. Οι κατακόρυφες ράβδοι υποδηλώνουν \pm τυπικά σφάλματα των μέσων όρων και τα διαφορετικά γράμματα σε κάθε ημερομηνία δειγματοληψίας υποδηλώνουν σημαντικές διαφορές σύμφωνα με το Duncan's post hoc test ($p \leq 0,05$).

Στο Γράφημα 2Α παρουσιάζεται η συγκέντρωση του ολικού αζώτου και φαίνεται ότι παρέμεινε εντός των επιτρεπτών ορίων και στις τρεις μεταχειρίσεις σε όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας, παρόλο που παρατηρήθηκαν στατιστικές διαφορές την 116^η και την 146^η ημέρα.

Στο Γράφημα 2B παρουσιάζεται η συγκέντρωση του καλίου και φαίνεται ότι και αυτή παρέμεινε εντός των επιτρεπτών ορίων με μία μόνο στατιστική διαφορά την 116^η ημέρα.

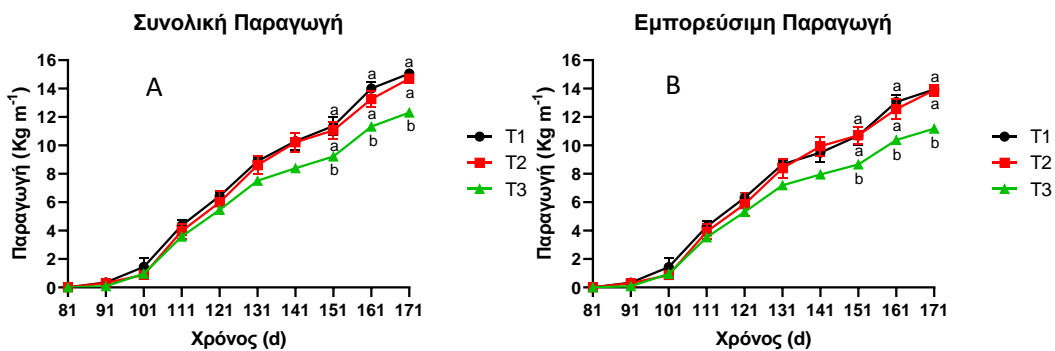
Στο Γράφημα 2Γ παρουσιάζεται η συγκέντρωση του ασβεστίου και φαίνεται ότι, μέχρι την 59^η ημέρα, παρέμεινε χαμηλότερη από το εύρος – στόχο και στις τρεις μεταχειρίσεις. Μετά από αυτή την ημέρα, όμως, άρχισε να έχει αυξανόμενα ρυθμό, παραμένοντας εντός των επιτρεπτών ορίων και στις τρεις μεταχειρίσεις, καθ' όλη την διάρκεια της καλλιέργειας, χωρίς σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.

Στο Γράφημα 2Δ παρουσιάζεται η συγκέντρωση του μαγνησίου και φαίνεται ότι παρέμεινε εντός των ορίων τού εύρους – στόχου και στις τρεις μεταχειρίσεις χωρίς να παρατηρούνται διαφορές μεταξύ τους στην διάρκεια της καλλιέργειας.

Στο Γράφημα 2Ε παρουσιάζεται η συγκέντρωση του φωσφόρου και φαίνεται ότι την 59^η ημέρα ήταν λίγο υψηλότερη από τα επιτρεπτά όρια και στις τρεις μεταχειρίσεις. Στην συνέχεια, όμως, παρέμεινε εντός των ορίων χωρίς να υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των τριών μεταχειρίσεων.

Στο Γράφημα 2Ζ παρουσιάζεται η συγκέντρωση του νατρίου και φαίνεται ότι στις μεταχειρίσεις T₂ και T₃ ήταν πολύ υψηλή σε σχέση με τη μεταχείριση T₁, που, ως μάρτυρας, παρέμεινε σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Μεταξύ των μεταχειρίσεων T₂ και T₃ δεν παρατηρήθηκαν καθόλου σημαντικές στατιστικές διαφορές καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας.

3.3 Πορεία Συνολικής και Εμπορεύσιμης Παραγωγής



Γράφημα 3. Εξέλιξη της αθροιστικής συνολικής και εμπορεύσιμης απόδοσης (Kg m⁻²) κατά την περίοδο συγκομιδής. Οι κατακόρυφες ράβδοι υποδηλώνουν ± τυπικά

σφάλματα των μέσων όρων και τα διαφορετικά γράμματα σε κάθε ημερομηνία δειγματοληψίας υποδηλώνουν σημαντικές διαφορές σύμφωνα με το Duncan's post hoc test ($p \leq 0,05$).

Όπως φαίνεται και από το Γράφημα 3 και στη Συνολική και στην Εμπορεύσιμη Παραγωγή ήταν αυξάνοντας ο ρυθμός σε όλη την διάρκεια της καλλιέργειας και για τις τρεις μεταχειρίσεις. Η μεταχείριση T₁ με την μεταχείριση T₂ δεν είχαν διαφορές μεταξύ τους παρά μόνο με την μεταχείριση T₃, η οποία ήταν χαμηλότερη από τις άλλες δύο μεταχειρίσεις. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στην μεταχείριση T₃, σε σχέση με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις, την 151^η ημέρα, την 161^η και την 171 ημέρα, τόσο στην Συνολική, όσο και στην Εμπορεύσιμη Παραγωγή.

Πίνακας 1.4 Μέσο βάρος καρπού (ΜΒΚ), αριθμός καρπών (καρποί ανά τετραγωνικό μέτρο), Ολικά διαλυτά στερεά (°Brix), Τιτλοδοτούμενη οξύτητα (κιτρικό όξύ %), Δείκτης γεύσης στις τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις.

Μεταχείριση	T1	T2	T3
ΜΒΚ της συνολικής παραγωγής (g)	172.15 a	170.01 a	156.22 b
ΜΒΚ της εμπορεύσιμης παραγωγής (g)	191.30 a	188.15 a	168.14 b
Συνολικός αριθμός καρπών	28.31	28.37	27.37
Εμπορεύσιμος αριθμός καρπών	23.75	24.15	21.51
Ολικά διαλυτά στερεά (°Brix)	5.19 b	5.34 b	6.13 a
Τιτλοδοτούμενη οξύτητα (Κιτρικό όξύ %)	0.386 b	0.389 b	0.471 a
Δείκτης γεύσης	1.06 b	1.08 b	1.14 a

Σε κάθε σειρά οι μέσοι που ακολουθούνται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σύμφωνα με το Duncan's multiple range test ($p \leq 0.05$).

Από τον Πίνακα 1.4, για το Μέσο Βάρους Καρπού, παρατηρείται ότι στην περίπτωση της Συνολικής, αλλά και της Εμπορεύσιμης Παραγωγής οι μεταχειρίσεις T₁ και T₂ δεν παρουσιάζουν διαφορές, ενώ η μεταχείριση T₃ παρουσιάζει σημαντικές διαφορές με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις, έχοντας την χαμηλότερη παραγωγή μεταξύ των τριών μεταχειρίσεων. Συγκεκριμένα, για την Συνολική Παραγωγή, το Μέσο Βάρος

Καρπού για την μεταχείριση T₁ ήταν 172.15 γραμμάρια, για την μεταχείριση T₂ ήταν 170.01 γραμμάρια και για την μεταχείριση T₃ ήταν 156.22 γραμμάρια. Φαίνεται, λοιπόν, ότι οι τιμές της Συνολικής Παραγωγής για τις μεταχειρίσεις T₁ και T₂ είναι πολύ κοντινές, ενώ η τιμή για την μεταχείριση T₃ είναι αρκετά πιο χαμηλή σε σχέση με τις άλλες δύο. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και στην περίπτωση της Εμπορεύσιμης Παραγωγής, όπου στην μεταχείριση T₁ ήταν 191.30 γραμμάρια, στην μεταχείριση T₂ ήταν 188.15 γραμμάρια και στην μεταχείριση T₃ ήταν 168.14 γραμμάρια.

Από τον Πίνακα 1.4, για τον Αριθμό Καρπών, τόσο Συνολικά, όσο και Εμπορεύσιμα, φαίνεται ότι δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές σε καμία από τις τρεις μεταχειρίσεις. Η μεταχείριση T₃, με τον Συνολικό αριθμό καρπών στα 27.37 και με τον Εμπορεύσιμο αριθμό καρπών στα 21.51, είναι ελάχιστα μικρότερη από τις μεταχειρίσεις T₁ και T₂ με τιμές 28.31 και 28.37, αντίστοιχα, για τον Συνολικό αριθμό καρπών και 23.75 και 24.15 για τον Εμπορεύσιμο αριθμό καρπών.

Από τον Πίνακα 1.4, για τα Ολικά Διαλυτά Στερεά, φαίνεται ότι η μεταχείριση T₁ και T₂, με 5.19 και 5.34 °Brix αντίστοιχα, δεν έχουν διαφορές μεταξύ τους παρά μόνο με την μεταχείριση T₃, η οποία είχε 6.13 °Brix. Δηλαδή, η μεταχείριση T₃ είχε τα περισσότερα Ολικά Διαλυτά Στερεά μεταξύ των τριών μεταχειρίσεων.

Από τον Πίνακα 1.4, για την τιτλοδοτούμενη οξύτητα φαίνεται ότι η μεταχείριση T₁ με την μεταχείριση T₂ πάλι δεν έχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους, παρά μόνο με την μεταχείριση T₃. Για την μεταχείριση T₁ και T₂ το κιτρικό οξύ ήταν στα 0.38% και για την μεταχείριση T₃, η οποία ήταν αυξημένη συγκριτικά με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις, ήταν 0.47%.

Από τον Πίνακα 1.4, για τον Δείκτη Γεύσης φαίνεται πάλι ότι η μεταχείριση T₁ με την μεταχείριση T₂ δεν έχουν διαφορές μεταξύ τους. Σημαντική διαφορά παρατηρείται στην μεταχείριση T₃, όπου και στην περίπτωση του δείκτη γεύσης η τιμή είναι μεγαλύτερη από τις τιμές που έχουν οι άλλες δύο μεταχειρίσεις. Συγκεκριμένα, ο δείκτης γεύσης για την μεταχείριση T₁ ήταν 1.06, για την μεταχείριση T₂ 1.08 και για την μεταχείριση T₃ ήταν 1.14.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή μελέτη, ο νέος αλγόριθμος που δημιουργήθηκε είχε ως στόχο να ελαχιστοποιήσει τις αρνητικές επιπτώσεις που προκαλεί η συσσώρευση νατρίου (Na^+) στα κλειστά υδροπονικά συστήματα σε καλλιέργεια τομάτας, η οποία διήρκησε έξι μήνες. Γενικά, έχουν γίνει αρκετές προτάσεις για διάφορα μοντέλα και στρατηγικές στα κλειστά υδροπονικά συστήματα, οι οποίες οδηγούν στην αποφυγή ή στην ελαχιστοποίηση της απόρριψης της απορροής, στην περίπτωση που το νάτριο (Na^+) και το χλώριο (Cl^-), από το νερό, συσσωρεύονται σε υπερβολικό βαθμό (Voogt and Sonneveld, 1996-Grewal et al., 2010-Massa et al., 2011-Savvas and Gruda, 2018-Voogt et al., 2021). Μία επιλογή που θα μπορούσε να γίνει στην καλλιέργεια κηπευτικών σε κλειστό υδροπονικό σύστημα θα ήταν το να αντισταθμιστούν οι αυξημένες συγκεντρώσεις του νατρίου (Na^+) και του χλωρίου (Cl^-) στο περιβάλλον των ριζών με αντίστοιχες ισοδύναμες μειώσεις των συγκεντρώσεων των κύριων θρεπτικών μακροστοιχείων (Sonneveld and Van Der Burg, 1991-Voogt and Van Os, 2012-Voogt et al., 2021), κάτι που εξετάστηκε και στο συγκεκριμένο πείραμα. Επίσης, οι Massa κ.ά. (2010) δοκίμασαν κι αυτοί μία παρόμοια προσέγγιση, αλλά με πολύ υψηλότερη συγκέντρωση NaCl στο νερό άρδευσης, ενώ εστίασαν κυρίως στο να ελαχιστοποιηθεί η συγκέντρωση των νιτρικών (NO_3^-) στο διάλυμα απορροής.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος, όταν δοκιμάστηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή μελέτη, στην περίπτωση της μεταχείρισης T_2 διατήρησε με επιτυχία την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) κάτω από το ανώτατο όριο - στόχος, στο περιβάλλον των ριζών, χωρίς να υπάρχουν σημαντικές διαφορές σε σχέση με την μεταχείριση T_1 , δηλαδή τον μάρτυρα. Αυτό συνέβη γιατί μείωνε σταδιακά τις συγκεντρώσεις – στόχους του καλίου (K^+), του ασβεστίου (Ca^{2+}), του μαγνησίου (Mg^+), των νιτρικών (NO_3^-) και των θειϊκών (SO_4^{2-}) στο περιβάλλον των ριζών για την μεταχείριση T_2 συγκριτικά με τις τυπικές συγκεντρώσεις – στόχους των μεταχειρίσεων T_1 και T_3 .

Η απόδοση της Συνολικής και της Εμπορεύσιμης Παραγωγής στις μεταχειρίσεις T_1 και T_2 ήταν παρόμοια συγκριτικά με την απόδοση που είχε η μεταχείριση T_3 . Από αυτό καταλαβαίνουμε ότι η σταδιακή μείωση των κύριων θρεπτικών μακροστοιχείων, μέχρι τα ελάχιστα επίπεδα ασφαλείας, για να αντισταθμιστεί η συσσώρευση νατρίου (Na^+) και χλωρίου (Cl^-), δεν είχε αρνητικές

επιπτώσεις στην θρέψη των φυτών και, κατ' επέκταση, δεν επηρέασε αρνητικά και την απόδοση της καλλιέργειας.

Επίσης, παρατηρείται ότι η συγκέντρωση του νατρίου (Na^+) στα φύλλα ήταν παρόμοια στις μεταχειρίσεις T_2 και T_3 και σημαντικά υψηλότερη απ' ό,τι στην μεταχείριση T_1 . Ωστόσο, η απόδοση της Παραγωγής, τόσο στην Συνολική, όσο και στην Εμπορεύσιμη Παραγωγή, μειώθηκε στην μεταχείριση T_3 , η οποία εκτέθηκε σε υψηλότερα επίπεδα ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) στο περιβάλλον των ριζών, ενώ στην περίπτωση των μεταχειρίσεων T_1 και T_2 η παραγωγή ήταν παρόμοια, αφού ανταποκρίθηκε στην παρόμοια ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) στο περιβάλλον των ριζών και όχι στις διαφορετικές συγκεντρώσεις νατρίου (Na^+) στο ριζικό περιβάλλον και στα φύλλα. Συνεχίζοντας στην πορεία των συγκεντρώσεων στα φύλλα, σχεδόν όλα τα θρεπτικά στοιχεία παρέμειναν εντός των επιτρεπτών ορίων σε όλη την διάρκεια της καλλιέργειας. Στις περιπτώσεις του μαγνησίου, του φωσφόρου και του ασβεστίου δεν υπήρξαν διαφορές μεταξύ των τριών μεταχειρίσεων, παραμένοντας εντός των ορίων, ενώ στην περίπτωση του ολικού αζώτου και του καλίου παρατηρήθηκαν κάποιες διαφορές την 116^η ημέρα και την 146^η ημέρα στο ολικό άζωτο και μόνο την 116^η ημέρα στη συγκέντρωση του καλίου.

Όπως είναι γνωστό, η μικρή με μέτρια αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), πάνω από τα επιτρεπτά όρια, που στην περίπτωση της τομάτας είναι το 4.1 dS m^{-1} , μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη παραγωγή, αλλά επιδρά θετικά στην ποιότητα των καρπών. Συγκεκριμένα, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τα οποία βελτιώνει είναι η περιεκτικότητα σε σάκχαρα, η ογκομετρούμενη οξύτητα, το άρωμα, η περιεκτικότητα σε ξηρή ουσία, αλλά και η συνεκτικότητα της σάρκας των καρπών. Όσο αυξάνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα, τόσο αυξάνονται και τα οργανοληπτικά αυτά χαρακτηριστικά, με αποτέλεσμα οι καρποί να είναι πιο γευστικοί και να μην είναι τόσο υδαρείς. Όπως φαίνεται και στο Γράφημα 1Α, σε συνδυασμό με τον Πίνακα 1, διακρίνεται η σχέση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με την παραγωγή, τόσο την Συνολική, όσο και την Εμπορεύσιμη. Με την αύξηση, λοιπόν, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, ιδιαίτερα στην μεταχείριση T_3 , φαίνεται αυτή η μείωση της απόδοσης (Σάββας, 2012).

Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η τομάτα στο εύρος των συγκεντρώσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη μεταπτυχιακή μελέτη δεν βλάπτεται από την τοξικότητα των ιόντων του νατρίου (Na^+), αλλά από την επίδραση που είχε το

υπερβολικό νάτριο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα το αυξημένο οσμωτικό δυναμικό στο ριζικό περιβάλλον. Αυτό έρχεται σε συμφωνία και με προηγούμενες μελέτες που είχαν γίνει σχετικά με την ανταπόκριση της τομάτας σε μέτρια επίπεδα αλατότητας, οι οποίες υποδεικνύουν οσμωτικές και όχι ειδικές επιδράσεις για τα ιόντα σε επίπεδα αλατότητας παρόμοια με αυτά που δοκιμάστηκαν στο συγκεκριμένο πείραμα (Sonneveld and Voogt, 2009-Rodriguez –Ortega et al., 2019-Zhang et al., 2022a). Στην περίπτωση που η αλατότητα βρίσκεται σε μέτρια επίπεδα, η παραγωγή μειώνεται εξαιτίας της μείωσης του μέσου βάρους των καρπών, ενώ ο αριθμός των καρπών ανά φυτό επηρεάζεται μόνο στην περίπτωση που τα επίπεδα της αλατότητας είναι υψηλά (Cuartero and Fernandez-Munoz, 1998-Qaryouti et al., 2007-Magan et al., 2008), πράγμα που έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα που πήραμε. Όπως φαίνεται και στο Γράφημα 1Α, η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο διάλυμα απορροής, δηλαδή στο ριζικό περιβάλλον, από 4.1 dS m^{-1} στις μεταχειρίσεις T_1 και T_2 σε 5.8 dS m^{-1} στην μεταχείριση T_3 οδήγησε σε μείωση της απόδοσης των καρπών, στην μεταχείριση T_3 , σε ποσοστό 18.2%, που συμφωνεί και με τα ποσοστά μείωσης που είχε η απόδοση από δεδομένα άλλων ερευνητών. Σύμφωνα και με τον Qaryouti et al. (2007), η μείωση της απόδοσης λόγω αυξημένης αλατότητας σε κλειστό υδροπονικό σύστημα τομάτας ήταν περίπου 7.2% ανά μονάδα (dS m^{-1}) αύξησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) πάνω από 3 dS m^{-1} στο περιβάλλον της ρίζας. Ακόμη, σύμφωνα με τον Magan et al. (2008) έχουν διαπιστωθεί μειώσεις της τάξης του 18.9% και 17.9% στην απόδοση των καρπών που έχει η τομάτα, στην περίπτωση που η ηλεκτρική αγωγιμότητα σημείωσε μία αύξηση από 4.1 σε 5.8 dS m^{-1} και από 4 σε 5.5 dS m^{-1} αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, σύμφωνα με τους Rodriguez-Ortega et al. (2019) σημειώθηκε μείωση της απόδοσης κατά 35% στην περίπτωση που η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) από 2.2 αυξήθηκε σε 6 dS m^{-1} στο ριζικό περιβάλλον. Εκτός των άλλων, η αυξημένη αγωγιμότητα αυξάνει και την συγκέντρωση σε βιταμίνη C, αλλά και καροτενίων στην περίπτωση της τομάτας (Σάββας, 2012).

Έχει παρατηρηθεί ότι η αυξημένη αγωγιμότητα οδηγεί σε μείωση του μέσου βάρους των καρπών (Σάββας, 2012). Αυτό φαίνεται και από τον Πίνακα 1, σχετικά με το Μέσο βάρους καρπού, τον αριθμό των καρπών, τον δείκτη γεύσης, την οξύτητα, τα °Brix, όπου η μεταχείριση T_3 είχε χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τις μεταχειρίσεις T_1 και T_2 λόγω αυξημένης αγωγιμότητας.

Η ποιότητα, όμως, των καρπών βελτιώθηκε σημαντικά στην μεταχείριση T₃ συγκριτικά με τις μεταχειρίσεις T₁ και T₂, όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 1, λόγω της αύξησης των ολικών διαλυτών στερεών (°Brix), της τιτλοδοτούμενης οξύτητας, καθώς και του δείκτη γεύσης. Παρόμοιες βελτιώσεις της τιτλοδοτούμενης οξύτητας, αλλά και των ολικών διαλυτών στερεών, λόγω ήπιας ή και μέτριας αλατότητας, για τους καρπούς της τομάτας έχουν αναφερθεί και από άλλους ερευνητές (Magan et al. (2008)-Zushi and Matsuzoe, 2015-Moya et al., (2017)-Rodriguez-Ortega et al., 2019-(Ntanasi et al., 2023). Σύμφωνα με τον Hernandez Suarez et al., (2008), οι καρποί τομάτας που έχουν τιμές άνω του 0.85 στην περίπτωση του δείκτη γεύσης, η ποιότητά τους είναι αποδεκτή. Ο Zhang et al., 2022a παρατήρησε σε καταπόνηση αλατότητας αυξημένα ολικά διαλυτά στερεά, τιτλοδοτούμενη οξύτητα, αλλά και δείκτη γεύσης σε τιμές, για τον δείκτη γεύσης, μεταξύ 1 και 2.32. Σε μία ακόμη μελέτη παρατηρήθηκαν τιμές για τον δείκτη γεύσης μεταξύ 1 και 1.20 για διάφορες ποικιλίες τομάτας (Ayuso-Yuste et al., 2022), δεδομένα που συμφωνούν με τα δεδομένα του συγκεκριμένου πειράματος. Συνεπώς, παρόλο που, σύμφωνα με τις τιμές των ολικών διαλυτών στερεών, της τιτλοδοτούμενης οξύτητας και του δείκτη γεύσης, η ποιότητα των καρπών της υδροπονικής τομάτας επηρεάστηκε θετικά από την αυξημένη αγωγιμότητα στην περίπτωση της μεταχείρισης T₃, οι τιμές για τις μεταχειρίσεις T₁ και T₂ έδωσαν κι αυτές, αν και χαμηλότερες, ικανοποιητική ποιότητα καρπών.

Συνεχίζοντας, θα δούμε την περίπτωση του pH. Το pH πρέπει να βρίσκεται μέσα στα κατάλληλα όρια, που για την τομάτα είναι 5,5 με 6,5, διότι επηρεάζει διάφορους παράγοντες. Σύμφωνα με το Γράφημα 1B, φαίνεται ότι με το πρόγραμμα NUTRISENSE διατηρήθηκε το pH μέσα στο επιθυμητό εύρος τιμών και στις τρεις μεταχειρίσεις. Η μόνη παρέκκλιση που υπήρξε ήταν την 11^η και την 118^η ημέρα, αλλά με την κατάλληλη αναπροσαρμογή που έκανε το NUTRISENSE, στη σύνθεση του διαλύματος, συνέχισε να παραμένει εντός των ορίων χωρίς να επηρεάσει αρνητικά ούτε την καλλιέργεια, ούτε την παραγωγή της, αλλά ούτε και την διαθεσιμότητα κάποιου άλλου θρεπτικού στοιχείου.

Προχωρώντας, θα συζητηθεί και η εξέλιξη των κύριων μακροθρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα απορροής, ξεκινώντας με αυτήν του καλίου. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, στην περίπτωση που το κάλιο έχει χαμηλή συγκέντρωση στο περιβάλλον της ρίζας, τότε αυξάνεται η πιθανότητα εμφάνισης διαταραχών σχετικά με την ωρίμανση των καρπών, αλλά και το χρώμα τους, ενώ, ταυτόχρονα, μειώνεται και η

οξύτητα του χυμού των καρπών (Σάββας, 2012). Αν, όμως, η συγκέντρωσή του είναι αρκετά υψηλή, τότε επηρεάζει την απορρόφηση του ασβεστίου (Ca^+), μειώνοντάς την. Στο συγκεκριμένο πείραμα, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει, διότι σε όλη την διάρκεια της καλλιέργειας το κάλιο παρέμεινε εντός των επιθυμητών ορίων στις μεταχειρίσεις T_1 και T_3 . Μόνο στην μεταχείριση T_2 η συγκέντρωσή του ήταν αρκετά χαμηλότερη από το επιτρεπτό όριο, κάτι που διορθώθηκε έπειτα από την αναπροσαρμογή τού NUTRISENSE.

Το ασβέστιο, στο συγκεκριμένο πείραμα, παρέμεινε κοντά στην τιμή – στόχο στις μεταχειρίσεις T_1 και T_3 , χωρίς σημαντικές διαφορές, παρά μόνο την 118^η ημέρα. Στην περίπτωση της μεταχείρισης T_2 , η συγκέντρωσή του μειωνόταν σταδιακά και, μετά από την αναπροσαρμογή, παρέμεινε στην τιμή – στόχο. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, το ασβέστιο απορροφάται με αργό ρυθμό από το φυτό, γι' αυτό τον λόγο χρειάζεται η συγκέντρωσή του στο θρεπτικό διάλυμα να είναι υψηλή (Σάββας, 2012). Στο στάδιο της καρποφορίας η συγκέντρωσή του χρειάζεται να μειώνεται, αλλά κάποια μεγάλη μείωση, ώστε να μην υπάρξει κίνδυνος εμφάνισης BER (Σάββας, 2012).

Το μαγνήσιο, σε όλη την διάρκεια του πειράματος παρέμεινε στην τιμή – στόχο για τις μεταχειρίσεις T_1 και T_3 , ενώ στην περίπτωση της μεταχείρισης T_2 μειωνόταν και απομακρυνόταν από την αντίστοιχη τιμή – στόχο γι' αυτήν τη μεταχείριση, αλλά, μετά την αναπροσαρμογή, ήταν κοντά στην χαμηλότερη τιμή - στόχο. Για την τομάτα, το μαγνήσιο είναι ένα σημαντικό θρεπτικό στοιχείο, το οποίο πρέπει να υπερβαίνει τα 2 mmol L^{-1} στο θρεπτικό διάλυμα που δημιουργείται και χορηγείται στα φυτά, κάτι που συμβαίνει και στο συγκεκριμένο πείραμα (Σάββας, 2012).

Στα θρεπτικά διαλύματα, το μεγαλύτερο μέρος τού αζώτου βρίσκεται σε νιτρική μορφή, ενώ η αμμωνιακή του μορφή ρυθμίζει το pH. Τα φυτά προσλαμβάνουν κατά προτίμηση τα αμμωνιακά, λόγω της υψηλότερης ενεργειακής τους στάθμης, με αποτέλεσμα η συγκέντρωσή τους να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Γι' αυτό το λόγο, παρουσιάζεται μόνο η συγκέντρωση των νιτρικών σε αυτό το πείραμα (Σάββας, 2012). Τα νιτρικά παρέμειναν κοντά στην τιμή – στόχο στις μεταχειρίσεις T_1 και T_3 , ενώ στην μεταχείριση T_2 η συγκέντρωσή τους ήταν ελάχιστα υψηλότερη από την αντίστοιχη τιμή – στόχο. Γενικά, στην περίπτωση της τομάτας, οι υπερβολικές συγκεντρώσεις αζώτου, στο ριζικό περιβάλλον, κάνουν τους καρπούς πιο υδαρείς, παρουσιάζουν μεγαλύτερη

ευαισθησία σε ασθένειες, μειώνουν την οξύτητα του χυμού των καρπών, αλλά και την περιεκτικότητα σε ολικά διαλυτά στερεά (Σάββας, 2012).

Σχετικά με τον φώσφορο, η συγκέντρωσή του δεν πρέπει να βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα, δηλαδή να υπερβαίνει την τιμή των $1,5 \text{ mmol L}^{-1}$, γιατί επηρεάζει την απορρόφηση άλλων θρεπτικών στοιχείων και συγκεκριμένα ιχνοστοιχείων, όπως του μαγγανίου (Mn), του ψευδαργύρου (Zn) και του βορίου (B). Επίσης, υψηλή συγκέντρωση φωσφόρου στη ρίζα δεσμεύει ασβέστιο (Ca) και μαγνήσιο (Mg), εξαιτίας τού ότι σχηματίζονται ιζήματα. Δεν θα πρέπει, όμως, ούτε να είναι χαμηλότερη από 1 mmol L^{-1} , γιατί μπορεί να μειωθεί η καρπόδεση και να επηρεαστεί αρνητικά η συνολική παραγωγή. Επιπλέον, η συγκέντρωσή του στο ριζικό περιβάλλον δεν επηρεάζει, ποιοτικά, τούς καρπούς τής τομάτας, ούτε το χρώμα τους, αλλά ούτε την οξύτητα των χυμών τους και την περιεκτικότητά τους σε διαλυτά σάκχαρα (Σάββας, 2012). Στο συγκεκριμένο πείραμα η συγκέντρωση του φωσφόρου παρέμεινε κοντά στην τιμή – στόχο και στις τρεις μεταχειρίσεις, έχοντας μία κορύφωση, στην διαφορά τους, στη μεταχείριση T₃, σε σχέση με τις άλλες δύο, την 145^η ημέρα.

Σχετικά με τα θειϊκά, η τομάτα αντιδρά αρνητικά στις χαμηλές συγκεντρώσεις στην περιοχή τού ριζοστρώματος, χωρίς, όμως, να επηρεάζεται από την αύξηση, αν αυτή κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 5 με 20 mmol L^{-1} (Σάββας, 2012). Αυτό συμβαίνει στο συγκεκριμένο πείραμα όπου παρατηρείται ότι η συγκέντρωση των θειϊκών δεν ξεφεύγει από αυτό το εύρος, παρά μόνο στην μεταχείριση T₂, της οποίας η συγκέντρωση είναι αρκετά πιο χαμηλή από την τιμή – στόχο, αλλά με την αναπροσαρμογή παραμένει σχετικά πιο κοντά μέχρι το τέλος τού πειράματος.

Σχετικά με το νάτριο και το χλώριο, στο διάλυμα απορροής, η συγκέντρωσή τους ακολουθεί μία παρόμοια πορεία. Συγκεκριμένα, οι μεταχειρίσεις T₂ και T₃ έχουν έναν αυξανόμενο ρυθμό, ενώ η μεταχείριση T₁ έχει την πιο χαμηλή τιμή και στις δύο περιπτώσεις των στοιχείων. Η μεταχείριση T₁, ως ο μάρτυρας, περιέχει την μικρότερη ποσότητα και νατρίου και χλωρίου συγκριτικά με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις σε όλη την διάρκεια της καλλιέργειας.

Όπως παρατηρήθηκε, η καταπόνηση αλατότητας επηρέασε σημαντικά την Συνολική και την Εμπορεύσιμη Παραγωγή στην T₃ σε σχέση με την T₁ και T₂, ενώ η μείωση των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα ριζοστρώματος στην T₂ δεν επηρέασε την παραγωγή.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή μελέτη δοκιμάστηκε μια στρατηγική που αποσκοπεί στην προοδευτική μείωση των συγκεντρώσεων – στόχων για τα μακροθρεπτικά στοιχεία μέχρι κάποια ελάχιστα επίπεδα ασφαλείας στο διάλυμα της ριζόσφαιρας και στο διάλυμα απορροής, ώστε να αντισταθμιστεί η συσσώρευση Na^+ και Cl^- στα κλειστά υδροπονικά συστήματα σε καλλιέργεια τομάτας. Όταν οι συγκεντρώσεις, τόσο του Na^+ , όσο και του Cl^- στο νερό άρδευσης, που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή τού θρεπτικού διαλύματος, είναι στο επίπεδο των 4 mM, η στρατηγική αυτή επιτρέπει να διατηρηθεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) εντός του εύρους - στόχου για 101 ημέρες, χωρίς δυσμενείς επιπτώσεις στη θρέψη και στην απόδοση της καλλιέργειας.

Η διατήρηση της βέλτιστης θρεπτικής κατάστασης για την καλλιέργεια τομάτας, παρά τη συσσώρευση του Na^+ και του Cl^- , ήταν δυνατή με τη χρήση ενός νέου αλγορίθμου, μέσω του συστήματος υποστήριξης αποφάσεων (DSS) NUTRISENSE. Χρησιμοποιώντας αυτό το λογισμικό, οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων - στόχων στο διάλυμα της ριζόσφαιρας και στο διάλυμα απορροής αναπροσαρμόζονταν τακτικά, διατηρώντας παράλληλα τις βέλτιστες μεταξύ τους αναλογίες για την εξισορρόπηση της συσσώρευσης Na^+ και Cl^- . Ωστόσο, η στρατηγική αυτή δεν απέτρεψε την συσσώρευση νατρίου (Na^+) και χλωρίου (Cl^-) πέραν των μεγίστων αποδεκτών επιπέδων στο διάλυμα της ρίζας, όταν οι συγκεντρώσεις νατρίου στο νερό ήταν 4 mM. Ως εκ τούτου, το διάλυμα απορροής έπρεπε να απορρίπτεται, εν μέρει, για να μπορέσει να διατηρηθεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) του διαλύματος της ρίζας κάτω από το όριο - στόχο, αποτρέποντας έτσι τις απώλειες αποδόσεων λόγω της αλατότητας. Συνεπώς, οι συγκεντρώσεις των μακροθρεπτικών στοιχείων μειώθηκαν στα ελάχιστα αποδεκτά επίπεδα, ώστε να μπορέσει να αντισταθμιστεί η συσσώρευση νατρίου και χλωρίου. Τέλος, η παρούσα μεταπτυχιακή μελέτη έδειξε ότι η συγκέντρωση του Na^+ , που επηρεάζει την ανακύκλωση, στο νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή τού διαλύματος τροφοδοσίας θα πρέπει να είναι χαμηλότερη από 4 mM, ώστε να είναι δυνατή η πλήρης ανακύκλωση του διαλύματος απορροής κατά τη διάρκεια μιας μακροχρόνιας καλλιεργητικής περιόδου.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

- Μαυρογιαννόπουλος, Γ., 2006. Υδροπονικές Εγκαταστάσεις. Αθ. Σταμούλη, Αθήνα, σελ. 278, σελ. 124 - 216
- Σάββας, Δ., 2012. Καλλιέργειες Εκτός Εδάφους. Εκδόσεις ΑγροΤύπος, Αθήνα
- Ολύμπιος, Χ. Μ., 2019. Η τεχνική της καλλιέργειας των υπαίθριων κηπευτικών. Εκδόσεις UNIBOOKS IKE, Αθήνα,

Αγγλική

- Ayuso-Yuste, M.C., González-Cebrino, F., Lozano-Ruiz, M., Fernández-León, A.M., Bernalte-García, M.J. (2022). Influence of Ripening Stage on Quality Parameters of Five Traditional Tomato Varieties Grown under Organic Conditions. *Horticulturae*. 8(4), 313 <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040313>.
- Block, C., Voogt, W., Barbagli, T. (2023). Reducing nutrient imbalance in recirculating drainage solution of stone wool grown tomato. *Agric. Water Manag.* 285, 108360. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108360>.
- Campbell, C.R. (2000). Reference Sufficiency Ranges for Plant Analysis in the Southern Region of The United States. *Southern Cooperative Series Bulletin* 394, pp. 122, www.ncagr.gov/agronomi/saesd/scsb394.pdf.
- Cuartero, J., Fernández-Muñoz, R. (1998). Tomato and salinity. *Sci. Hort.* 78, 83-125. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00191-5](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00191-5).
- Gallardo, M., Elia, A., Thompson, R.B. (2020). Decision support systems and models for aiding irrigation and nutrient management of vegetable crops, *Agric. Water Manag.*, Volume 240, 2020, 106209. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106209>.
- Gallardo, M., Cuartero, J., Andújar de la Torre, L., Padilla, F.M., Segura, M.L., Thompson, R.B. (2021). Modelling nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium uptake, and uptake concentration, of greenhouse tomato with the VegSyst model. *Sci Hort.* 279. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109862>.
- Grewal, H.S., Maheshwari, B., Parks, S.E. (2010). Water and nutrient use efficiency of a low-cost hydroponic greenhouse for a cucumber crop: An Australian case study. *Agric. Water Manag.* 98, 841–846. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.010>.
- Gruda, N. S. (2020). Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy* 10(9), 1-24.
- Heller, H., Bar-Tal, A., Assouline, S., Nakris, K., Suryano, S., De La Forge, A., Barak M., Alon, H., Bruner M., Cohen S., & Tsohar, D. (2015). The effects of container geometry on water and heat regimes in soilless culture: Lettuce as a case study. *Irrigation science*, 33(1), 53-65.

- Hernández Suárez, M., Rodríguez Rodríguez, E.M., Díaz Romero, C. (2008). Chemical composition of tomato (*Lycopersicon esculentum*) from Tenerife, the Canary Islands. *Food Chem.* 106, 1046–1056. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.07.025>.
- Katsoulas, N., Savvas, D., Bartzanas, T., Kittas, C. (2015). Model-based control of water and nutrient discharge in a tomato crop grown in a semi-closed soilless system as influenced by the drainage fraction. *Comp. Electron. Agric.* 113, 61-71. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.01.014>.
- Kawasaki, Y., & Yoneda, Y. (2019). Local temperature control in greenhouse vegetable production. *Horticulture Journal* 88(3), 305-314.
- Magán, J.J., Gallardo, M., Thompson, R.B., Lorenzo, P. (2008). Effects of salinity on fruit yield and quality of tomato grown in soil-less culture in greenhouses in Mediterranean climatic conditions. *Agric. Water Manag.* 95, 1041–1055. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.03.011>.
- Massa, D., Incrocci, L., Maggini, R., Bibbiani, C., Carmassi, G., Malorgio, F., Pardossi, A. (2011). Simulation of crop water and mineral relations in greenhouse soilless culture. *Environ. Model Softw.* 26, 711–722. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.01.004>.
- Massa, D., Incrocci, L., Maggini, R., Carmassi, G., Campiotti, C.A., Pardossi, A. (2010). Strategies to decrease water drainage and nitrate emission from soilless cultures of greenhouse tomato. *Agric. Water Manag.* 97, 971–980. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.01.029>.
- Moya, C., Oyanedel, E., Verdugo, G., Flores, M.F., Urrestarazu, M., Álvaro, J.E. (2017). Increased electrical conductivity in nutrient solution management enhances dietary and organoleptic qualities in soilless culture tomato. *HortSci.* 52, 868–872. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12026-17>.
- Navez, B., Letard, M., Graselly, D., Jost, M. (1999). Les criteres de qualite de la tomate. *Infos-Ctifl*, 155, 41–47. <http://dx.doi.org/10.5772/58239>.
- Nielsen, S. (2003). *Food analysis*. 3rd Edition, Kluwer Academic, New York.
- Nikolaou, G., Neocleous, D., Christou, A., Polycarpou, P., Kitta, E., & Katsoulas, N. (2021). Energy and water related parameters in tomato and cucumber greenhouse crops in semiarid mediterranean regions. A review, part ii: Irrigation and fertigation. *Horticulturae* 7(12).
- Ntanasi, T., Ntatsi, G., Karavidas, I., Ziogas, I., Karaolani, M., Fortis, D., Zioviris, G., Fotopoulos, V., Schubert, A., Guillaume, M., Causse, M., Conesa, M., Savvas, D. (2023). Impact of salinity stress on fruit quality of different Mediterranean cherry-type tomato landraces. *Acta Hort.* 1372, 301–308. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1372.39>.
- Qaryouti, M.M., Qawasmi, W., Hamdan, H., Edwan, M. (2007). Influence of NaCl salinity stress on yield, plant water uptake and drainage water of tomato grown in soilless culture. *Acta Hort.* 747, 539–544. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2007.747.70>.

- Raviv, M., Lieth, J. H., & Bar-Tal, A. (2019). Significance of soilless culture in agriculture. In *Soilless Culture: Theory and Practice* (Second edi, pp. 3-14). Elsevier B. V.
- Rodríguez-Ortega, W.M., Martínez, V., Nieves, M., Simón, I., Lidón, V., Fernandez-Zapata, J.C., Martinez-Nicolas, J.J., Cámara-Zapata, J.M., García-Sánchez, F. (2019). Agricultural and physiological responses of tomato plants grown in different soilless culture systems with saline water under greenhouse conditions. *Sci Rep* 9, 6733, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42805-7>.
- Savvas, D., Adamidis, K. (1999). Automated management of nutrient solutions based on target electrical conductivity, pH, and nutrient concentration ratios. *J. Plant Nutr.* 22, 1415–1432. <https://doi.org/10.1080/01904169909365723>.
- Savvas, D., Ntatsi, G., Passam, H. C. (2008). Plant nutrition and physiological disorders in greenhouse grown tomato, pepper and eggplant. *Europ. J. Plant Sci. Biotechn.* 2, 45-61.
- Savvas, D., Giannothanasis, E., Ntanasi, T., Karavidas, I., Drakatos, S., Panagiotakis, I., Neocleous, D., Ntatsi, G. (2023). Improvement and validation of a decision support system to maintain optimal nutrient levels in crops grown in closed-loop soilless systems. *Agric. Water Manag.* 285, 108373. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108373>.
- Savvas, D., Adamidis, K. (2000). Erratum. *J Plant Nutr* 23, 1371–1371. <https://doi.org/10.1080/01904160009382106>.
- Savvas, D., Ntatsi, G., Passam, H. C. (2008). Plant nutrition and physiological disorders in greenhouse grown tomato, pepper and eggplant. *Europ. J. Plant Sci. Biotechn.* 2, 45-61.
- Savvas, D., Savva, A., Ntatsi, G., Ropokis, A., Karapanos, I., Krumbein, A., Olympios, C. (2011). Effects of three commercial rootstocks on mineral nutrition, fruit yield and quality in salinised tomatoes. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 174, 154-162.
- Savvas, D., & Gruda, N. S. (2018). Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry – A review. *European Journal of Horticulture Science*, 83(5), 280-293.
- Savvas, D., Ntatsi, G., & Drakatos, S. (2020). A decision support system to automatically calculate and readjust nutrient solutions in commercial soilless cultivations. *Acta Horticulturae*, 1271, 293-300.
- Savvas, D., Drakatos, S., Panagiotakis, I., Ntatsi, G. (2021). NUTRISENSE: A new on-line portal to calculate nutrient solutions and optimize fertilization of greenhouse crops grown hydroponically. *Acta Hort.* 1320, 149-156. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1320.19>.
- Sonneveld, C., Voogt, W. (2009). *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2532-6>.
- Sonneveld, C., Voogt, W. (2009). *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2532-6>.

- Sonneveld, C., Van Der Burg, A.M.M. (1991). Sodium chloride salinity in fruit vegetable crops in soilless culture. *Neth. J. Agri. Sci.* 39, 115–122. <https://doi.org/10.18174/njas.v39i2.16546>.
- Van Os, E. A., Gieling, T. H., Lieth, J. H. (2019). Technical equipment in soilless production systems. In *Soilless Culture: Theory and Practice*. (pp. 587-635). Elsevier B. V.
- van Os, E. A., Beerling, E. A. M., Blok, C., Janse, J., Leyh, R., van Ruijven, J. P. M., van der Staij, M., & Kaarsemaker, R. (2019). Zero discharge of nutrients and pesticides to the environment in hydroponic production. *Acta Horticulturae*, 1266(November), 443-450.
- Van Os, E., Gieling, T. H. & Lieth, J. H. (2008). Technical equipment in soilless production systems. In *Soilless Culture: Theory and Practice* (1st ed.)Elsevier Ltd.
- Varlagas, H., Savvas, D., Mouzakis, G., Liotsos, C., Karapanos, I., Sigrimis, N. (2010). Modelling uptake of Na⁺ and Cl⁻ by tomato in closed-cycle cultivation systems as influenced by irrigation water salinity. *Agric. Water Manage.* 97, 1242-1250.
- Voogt, W. & Bar-Yosef, B. (2019). Water and Nutrient management and crops response to nutrient solution recycling in soilless growing systems in greenhouses. In *Soilless Culture: Theory and Practice* (Second Edi, pp. 425-507). Elsevier B. V.
- Voogt W. and Sonneveld C. (1996). Nutrient management in closed growing systems for greenhouse production. In: *Plant Production in Closed Ecosystems - Automation, Culture and Environment*. Kluwer Academic Press, Dordrecht, 83 - 102. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8889-8_6.
- Voogt, W., Diaz Ismael, A., Oud, N., Leyh, R. (2021). Dealing with Na accumulation in soilless systems with recirculation of drainwater: a case study with sweet pepper (*Capsicum annuum*). *Acta Hort.* 1321, 141-148. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1321.18>.
- Voogt, W., Van Os, E.A. (2012). Strategies to Manage Chemical Water Quality Related Problems in Closed Hydroponic Systems. *Acta Hort.* 927, 949–956. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.117>.
- Voogt, W., Diaz Ismael, A., Oud, N., Leyh, R. (2021). Dealing with Na accumulation in soilless systems with recirculation of drainwater: a case study with sweet pepper (*Capsicum annuum*). *Acta Hort.* 1321, 141-148. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1321.18>.
- Voogt, W., & Bar-Yosef, B. (2019). Water and Nutrient management and crops response to nutrient solution recycling in soilless growing systems in greenhouses. In *Soilless Culture: Theory and Practice Theory and Practice* (Second edi, pp. 425-507). Elsevier B. V.
- Wang, X., Zhang, W., Miao, Y., & Gao, L. (2016). Root-zone warming differently benefits mature and newly unfolded leaves of *Cucumis sativus* L. seedlings under sub-optimal temperature stress. *PLoS ONE*, 11(5), 14-17.

- Yan, Q., Duan, Z., Mao, J., Li, X., & Dong, F. (2012). Effects of root-zone temperature and N, P and K supplies on nutrient uptake of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings in hydroponics. *Soil Science and Plant Nutrition*, 58(6), 707-717.
- Yang, Z., Li, Y., Li, P., Zhang, F., Thomas, B.W. (2016). Effect of difference between day and night temperature on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) root activity and low molecular weight organic acid secretion. *Soil Sci. Plant Nutr.* 62, 423–431. <https://doi.org/10.1080/00380768.2016.1224449>.
- Zhang, P., Jiang, S., Dai, Y., Zhang, Z., Senge, M. (2022). Combined Treatment of Salinity Stress and Fruit Thinning Effect on Tomato. *Front Nutr* 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.857977>.
- Zushi, K., Matsuzoe, N. (2015). Metabolic profile of organoleptic and health-promoting qualities in two tomato cultivars subjected to salt stress and their interactions using correlation network analysis. *Sci Hort.* 184, 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.12.030>.

Διαδικτυακές εικόνες:

<https://www.ancient-origins.net/sites/default/files/field/image/Hanging-Gardens-of-Babylon.jpg>

<https://greenbookpages.com/wp-content/uploads/2014/02/hollandhydro.jpg>

https://www.hydroponics.gr/wp-content/uploads/2020/11/127529443_3120201101415232_4840697852228866593_n.jpg

<https://nwdistrict.ifas.ufl.edu/phag/files/2020/01/013595-scaled.jpg>

<https://www.iefimerida.gr/news/367943/sto-tei-thessalias-kalliergoyn-lahanika-me-methodo-tis-nasa-eikones>