

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**Σχολή Γεωπονικών Επιστημών**

**Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος**

**Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος**

**Πτυχιακή Διατριβή**

**«Επαναχρησιμοποίηση Απορροών Υδροπονικής Καλλιέργειας Τομάτας  
σε Υδροπονική Καλλιέργεια Μαρουλιού»**



**ΣΑΛΈΠΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΤΣΟΥΛΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ, Καθηγητής**

**Βόλος, 2022**

**Επαναχρησιμοποίηση Απορροών Υδροπονικής Καλλιέργειας  
Τομάτας σε Υδροπονική Καλλιέργεια Μαρουλιού**

**Σαλέπης Βασίλειος**

**Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή**

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

Σπύρος Πετρόπουλος, Αν. Καθηγητής, Λαχανοκομία.

Ευθυμία Λεβίζου, Επ. Καθηγήτρια, Φυσιολογία Φυτών.

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αισθάνομαι την ανάγκη και την υποχρέωση να ευχαριστήσω όλα τα άτομα τα οποία συνέβαλαν στην υλοποίηση της.

Θέλω να ευχαριστήσω αρχικά, τον επιβλέποντα και μέλος της τριμελούς επιτροπής Καθηγητή κ. Νικόλαο Κατσούλα, για την ευκαιρία που μου παρείχε για την πραγματοποίηση της πτυχιακής αυτής διατριβής στο Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος και για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της παρούσας μελέτης.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω, τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Σπύρο Πετρόπουλο και την Επίκουρο Καθηγήτρια κα. Ευθυμία Λεβίζου του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για τη συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή.

Νιώθω επίσης ευγνώμων και θέλω να ευχαριστήσω την Δρ. Αγγελική Ελβανίδη, την Ελένη Καρατσιβου και τη Σοφία Φαλιάγκα για την βοήθεια και την άκρως σημαντική καθοδήγηση τους κατά το πειραματικό μέρος, την συγγραφή και την διόρθωση της πτυχιακής αυτής διατριβής.

Επίσης θέλω και θα πρέπει να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, για την σημαντική συμβολή στη διεξαγωγή του πειραματικού μέρους και για τις πολύτιμες συμβουλές.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια, τους φίλους μου και όλους τους ξεχωριστούς και σημαντικούς ανθρώπους γύρω μου για την αμέριστη συμπαράσταση τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Έντονο προβληματισμό προκαλεί η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού της γης και η ανάγκη για κάλυψη των διατροφικών αναγκών του. Όμως, τα παραδοσιακά συστήματα καλλιέργειας τίθενται υπό αμφισβήτηση, εξαιτίας της εκτεταμένης χρήσης νερού και λιπασμάτων. Έτσι, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται επιστημονικό ενδιαφέρον για την ανάπτυξη βιώσιμων συστημάτων καλλιέργειας, που εφαρμόζουν τις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Συνεπώς, η τεχνική της πολυκαλλιέργειας έρχεται να δώσει λύση στη μείωση των εισροών στα ανοιχτά, κλειστά και ημίκλειστα υδροπονικά συστήματα, με στόχο την βιώσιμη ανάπτυξη τους. Στο καινοτόμο αυτό σύστημα, το απορρέον θρεπτικό διάλυμα μιας καλλιέργειας υψηλών συγκεντρώσεων θρεπτικών στοιχείων, χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία της επόμενης καλλιέργειας, η οποία έχει χαμηλότερες απαιτήσεις θρέψης, ενώ παράλληλα είναι πιο ανεκτική στην αλατότητα. Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται στη συλλογή του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος και στη μετέπειτα χορήγησή του στη δευτερεύουσα καλλιέργεια εφόσον έχει προηγηθεί η απολύμανση του, αλλά και η διόρθωση του pH. Σκοπός της παρούσας έρευνας ήταν να μελετηθεί η επίδραση διαφορετικών στρατηγικών διοχέτευσης του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος από την καλλιέργεια τομάτας (κύρια καλλιέργεια) στην καλλιέργεια μαρουλιού (δευτερεύουσα καλλιέργεια), με στόχο την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών. Συνεπώς, διερευνήθηκε η επίδραση των διαφορετικών μεταχειρίσεων, τόσο στα μορφολογικά όσο και στα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των φυτών μαρουλιού, καθώς και η αποδοτικότητα χρήσης νερού. Επιπλέον, αξιολογήθηκε η συνολική παραγωγή της καλλιέργειας ανά μεταχείριση και χρονική περίοδο διεξαγωγής των πειραμάτων. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην περιοχή του Βελεστίνου. Ο μάρτυρας του παρόντος πειράματος αρδεύονταν με θρεπτικό διάλυμα κατάλληλης χημικής σύστασης για την καλλιέργεια μαρουλιού, ενώ οι υπόλοιπες μεταχειρίσεις αρδεύονταν με το απορρέον θρεπτικό διάλυμα (D) της πρωτεύουσας καλλιέργειας, σε σταθερή αναλογία αραιώσεως, 1:1, 1:3 με νερό χαμηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) 0,7 dS m<sup>-1</sup> (50%D, 75%D, αντίστοιχα). Στην τελευταία μεταχείριση εφαρμόστηκε εξ ολοκλήρου επαναχρησιμοποίηση των απορροών της πρωτεύουσας (100%D). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν αρκετά ενθαρρυντικά, καθώς η 75% D είχε μεγαλύτερη

παραγωγή σε σχέση με το μάρτυρα στη πρώτη καλλιεργητική περίοδο, ενώ η 100%D ήρθε δεύτερη, όσον αφορά την απόδοση, έπειτα του μάρτυρα στη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο. Τόσο η συγκέντρωση χλωροφύλλης, όσο ο ρυθμός φωτοσύνθεσης, καθώς και ο ρυθμός διαπνοής της καλλιέργειας, εμφάνισαν έντονες διακυμάνσεις, ιδιαίτερα κατά τον πρώτο καλλιεργητικό κύκλο. Ωστόσο, κατά την δεύτερη καλλιεργητική περίοδο, τα αποτελέσματα έδειξαν να είναι καλύτερα στο μάρτυρα, ο οποίος παρουσίασε υψηλότερη παραγωγή σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις, με την μεταχείριση 100%D να ακολουθεί, εκτός από τη χλωροφύλλη, που παρουσίασε ανάλογες τιμές με αυτή της 100%D μεταχείρισης. Συμπερασματικά, το σύστημα διαδοχικών καλλιεργειών με πρωτεύουσα καλλιέργεια την τομάτα και δευτερεύουσα το μαρούλι, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας, χαρακτηρίζεται βιώσιμο δεδομένου του οικονομικού οφέλους από την ταυτόχρονη παραγωγή δυο διαφορετικών προϊόντων.

## SUMMARY

The rapid growth of the earth's population and the need to meet its nutritional needs are causing deep concern. But traditional farming systems are being challenged because of the widespread use of water and fertilizers. Thus, in recent years there has been a scientific interest in the development of sustainable farming systems, which apply the principles of the circular economy. Therefore, the technique of multiculturalism comes to provide a solution to reduce inputs in open, closed and semi-closed hydroponic systems, aiming at their sustainable development. In this innovative system, the resulting nutrient solution of a culture of high nutrient concentrations is used to feed the next crop, which has lower nutritional requirements, while being more tolerant of salinity. The operation of the system is based on the collection of the resulting nutrient solution and its subsequent administration to the secondary culture after its disinfection, as well as the pH correction. The purpose of this study was to study the effect of different strategies for channeling the resulting nutrient solution from tomato (main crop) to lettuce (secondary) to meet irrigation needs. Therefore, the effect of different treatments on both the morphological and physiological characteristics of lettuce plants, as well as water use efficiency, was investigated. In addition, the total crop production per treatment and time period of the experiments was evaluated. The experiment was carried out in the greenhouse facilities of the University of Thessaly in the area of Velestino. The control of the present experiment was irrigated with a nutrient solution of suitable chemical composition for the cultivation of lettuce, while the remaining treatments were irrigated with the resulting nutrient solution (D) of the primary culture, at a constant dilution ratio of 1: 1, 1: 3 with water conductivity (EC) 0.7 dS m<sup>-1</sup> (50% D, 75% D, respectively). In the last treatment, a complete reuse of the capital's effluents was applied (100% D). The results were quite encouraging, as 75% D had higher yields than the control in the first growing season, while 100% D came in second in terms of yield, following the control in the second growing season. Both the chlorophyll concentration and the rate of photosynthesis, as well as the rate of perspiration of the crop, showed strong fluctuations, especially during the first growing cycle. However, during the second growing season, the results showed to be better in the control, which showed a higher yield compared to the other treatments, with the 100% D treatment following, except for the chlorophyll, which showed similar values to that

of the 100% D treatment. In conclusion, the system of successive crops with primary cultivation of tomato and secondary lettuce, according to the results of the present study, is characterized as sustainable given the economic benefit from the simultaneous production of two different products.

# Περιεχόμενα

1.Εισαγωγή.....	1
1.1 Υδροπονία .....	2
1.1.1 Ταξινόμηση των υδροπονικών συστημάτων ανάλογα με τον τρόπο διαχείρισης των απορροών .....	4
1.1.2 Ταξινόμηση των υδροπονικών συστημάτων ανάλογα με το μέσο ανάπτυξης του συστήματος των ριζών .....	7
1.2 Διαχείριση θρεπτικού διαλύματος.....	10
1.3 Αποδοτικότητα Χρήσης Νερού (Water Use Efficiency).....	12
1.4 Απορρόφηση και μεταφορά νερού και θρεπτικών ιόντων στο φυτό.....	13
1.5 Αλατότητα .....	16
1.6 Ανοιχτό Υδροπονικό Σύστημα Επάλληλων Καλλιεργειών (Cascade hydroponics) με ανακύκλωση .....	17
1.7 Υδροπονική καλλιέργεια τομάτας.....	18
1.8 Υδροπονική καλλιέργεια μαρουλιού.....	20
2. Σκοπός.....	21
3. Υλικά και Μέθοδοι.....	22
3.1 Περιγραφή πειράματος.....	22
3.2 Καλλιέργειες.....	24
3.3 Σύστημα υδρολίπανσης.....	26
3.4 Μεταχειρίσεις.....	29
3.5 Μετρήσεις.....	30
3.5.1 Αριθμός φύλλων Εμβαδό Επιφάνειας φυτών Ύψος.....	30
3.5.2 Χλωροφύλλη .....	31
3.5.3 Ρυθμός Φωτοσύνθεσης και Διαπνοής .....	32
3.5.4 Νωπό – Ξηρό Βάρος.....	33
3.6 Στατιστική ανάλυση .....	33
4. Αποτελέσματα .....	34
4.1 Αριθμός φύλλων.....	34
4.1.1 Πρώτη καλλιεργητική περίοδος .....	34
4.1.2 Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος.....	35
4.2 Εμβαδό επιφάνειας.....	36
4.2.1 Πρώτη καλλιεργητική περίοδος .....	36
4.2.2 Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος.....	37
4.3 Ύψος φυτών .....	38
4.3.1 Πρώτη καλλιεργητική περίοδος .....	38
4.3.2 Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος.....	39



4.4 Χλωροφύλλη .....	40
4.4.1 Πρώτη καλλιεργητική περίοδος .....	40
4.4.2 Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος .....	41
4.5 Φωτοσύνθεση .....	42
4.5.1 Πρώτη καλλιεργητική περίοδος .....	42
4.5.2 Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος .....	43
4.6 Διαπνοή .....	44
4.6.1 Πρώτη καλλιεργητική περίοδος .....	44
4.6.2 Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος .....	45
4.7 Στιγμαία αποδοτικότητα χρήσης νερού (WUE).....	46
4.7.1 Πρώτη καλλιεργητική περίοδος .....	46
4.7.2 Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος .....	47
4.8 Νωπό-Ξηρό Βάρος .....	48
4.8.1 Πρώτη καλλιεργητική περίοδος .....	48
4.8.2. Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος .....	49
5. Συζήτηση .....	51
6. Συμπεράσματα.....	52
7. Βιβλιογραφία .....	54

## Περιεχόμενα Γραφημάτων

<b>Γράφημα 1.</b> Αριθμός φύλλων (Μέσος Όρος $\pm$ STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.....	34
<b>Γράφημα 2.</b> Αριθμός φύλλων (Μέσος Όρος $\pm$ STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.....	35
<b>Γράφημα 3.</b> Φυλλική επιφάνεια (Μέσος Όρος $\pm$ STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.....	36
<b>Γράφημα 4.</b> Φυλλική επιφάνεια (Μέσος Όρος $\pm$ STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.....	37
<b>Γράφημα 5.</b> Ύψος φυτών (Μέσος Όρος $\pm$ STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.....	38

<b>Γράφημα 6.</b> Ύψος φυτών (Μέσος Όρος $\pm$ STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.....	39
<b>Γράφημα 7.</b> Τιμές SPAD (Μέσος Όρος $\pm$ STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.....	40
<b>Γράφημα 8.</b> Τιμές SPAD (Μέσος Όρος $\pm$ STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.....	41
<b>Γράφημα 9.</b> Ρυθμός φωτοσύνθεσης ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) (Μέσος Όρος $\pm$ STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.....	43
<b>Γράφημα 10.</b> Ρυθμός φωτοσύνθεσης ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) (Μέσος Όρος $\pm$ STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου. ....	44
<b>Γράφημα 11.</b> Ρυθμός διαπνοής ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) (Μέσος Όρος $\pm$ STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.....	45
<b>Γράφημα 12.</b> Ρυθμός διαπνοής ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) (Μέσος Όρος $\pm$ STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.....	46
<b>Γράφημα 13.</b> Μεταβολή της στιγμιαίας WUE ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}/\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) (Μέσος Όρος $\pm$ STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου.....	47
<b>Γράφημα 14.</b> Μεταβολή της στιγμιαίας WUE ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}/\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) (Μέσος Όρος $\pm$ STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.....	48

## Περιεχόμενα Πινάκων

<b>Πίνακας 1.</b> Μέση τιμή της θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{C}$ ), της σχετικής υγρασίας (%) και της ημερήσιας συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας ( $\text{J cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου.....	24
<b>Πίνακας 2.</b> Ποσοτική και ποιοτική χημική ανάλυση του νερού της γεώτρησης στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου. Χημική σύσταση του διαλύματος τροφοδοσίας για την καλλιέργεια τομάτας και μαρουλιού. Οι συγκεντρώσεις των μακροστοιχείων εκφράζονται σε $\text{mmol L}^{-1}$ και των ιχνοστοιχείων σε $\mu\text{mol L}^{-1}$ . Η EC εκφράζεται σε $\text{dS m}^{-1}$ και το pH του διαλύματος σε σταθερή τιμή, 5.6.....	26

**Πίνακας 3.** Νωπό και ξηρό βάρος (Μέσος Όρος  $\pm$  STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου. ....49

**Πίνακας 4.** Νωπό και ξηρό βάρος (Μέσος Όρος  $\pm$  STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.....50

## **Περιεχόμενα Εικόνων**

**Εικόνα 1.** Ανοιχτά και κλειστά συστήματα υδροπονίας (De la Rosa-Rodríguez, 2020).....6

**Εικόνα 2.** Υπόστρωμα πετροβάμβακα.....10

**Εικόνα 3.** Θάλαμος εγκατάστασης πειράματος.....23

**Εικόνα 4.** Εγκατάσταση καλλιέργειας μαρουλιού και σπανακιού σε υδροπονικό σύστημα στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις του Βελεστίνου.....25

**Εικόνα 5.** Κάτοψη θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων και θέσης καλλιεργειών εντός του θερμοκηπίου. Διάταξη στο χώρο των μεταχειρίσεων και επαναλήψεων της καλλιέργειας μαρουλιού. Σύστημα δροσισμού, θέση πάνελ υγρής παρειάς-ανεμιστήρων.....30

## 1.Εισαγωγή

Ο παγκόσμιος πληθυσμός υπολογίζεται σήμερα στα 7.8 δισεκατομμύρια και θα αγγίξει τα 9.8 μέχρι το 2050 (United Nations, 2017). Καθώς ο πληθυσμός αυξάνεται, αντίστοιχη πορεία ακολουθούν και οι ανάγκες για κάλυψη των διατροφικών αναγκών των ανθρώπων. Συνεπώς, εντείνεται και η ανάγκη για άμεση εύρεση περισσότερων καλλιεργήσιμων εκτάσεων (Tyson et al., 2011). Ωστόσο, τα συστήματα που βασίζονται στον παραδοσιακό τρόπο καλλιέργειας αμφισβητούνται, εξαιτίας της περιορισμένης διαθεσιμότητας φυσικών πόρων. Σε αυτό φαίνεται να συντέλεσαν η κλιματική αλλαγή αλλά και η ανθρωπογενής γεωργική δραστηριότητα.

Επιπλέον, η αλόγιστη και υπερβολική χρήση νερού και λιπασμάτων εντείνουν το πρόβλημα της μόλυνσης του υδροφόρου ορίζοντα ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται το φαινόμενο της λειψυδρίας σε πολλές περιοχές ανά τον κόσμο. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (OECD) ο οποίος επισημαίνει πως μέχρι το 2050 η διαθεσιμότητα του νερού θα έχει μειωθεί δραματικά καθώς παρατηρείται ετήσια αύξηση κατανάλωσης της τάξης του 1% (Panda et al, 2014). Τα παραπάνω καθιστούν απαραίτητη την άμεση επέμβαση του ανθρώπου για την σωστή εφαρμογή στρατηγικών με στόχο τον περιορισμό της ρύπανσης και την ελαχιστοποίηση κατανάλωσης υδάτινων πόρων με ταυτόχρονη αύξηση της παραγωγής προϊόντων (Shannon et al., 2000).

Ωστόσο, οι εναλλακτικές γεωργικές πρακτικές, όπως τα υδροπονικά αλλά και τα ενυδρειοπονικά συστήματα καλλιέργειας δύνανται να προσφέρουν ασφαλή προϊόντα υψηλής διατροφικής αξίας ενώ ταυτόχρονα κάνουν χρήση μικρότερων εκτάσεων γης και ελαχιστοποιούν την εκμετάλλευση φυσικών πόρων όπως το νερό (Rakocy et al., 2006; Love et., al., 2015; Knaus and Palm, 2017).

Πιο συγκεκριμένα, οι καλλιέργειες εκτός εδάφους έχουν προταθεί ως βιώσιμα συστήματα παραγωγής τροφίμων σε αστικές περιοχές, τα οποία σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, συμβάλλουν στην αποτελεσματικότερη διαχείριση της ανάπτυξης των φυτών, τον περιορισμό της χρήσης γλυκού νερού, ενώ επιτρέπουν την χρήση νερού κακής ποιότητας.

Επίσης, η αξιοποίηση συστημάτων αυτοματοποιημένης υδρολίπανσης, ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης νερού και θρεπτικών, μπορεί να συμβάλει

σημαντικά στην βελτίωση της παραγωγής τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Silva et al., 2016).

Τέλος, σύμφωνα και με τους Maliqa Majid et al. (2021), αξιολογώντας τους δείκτες οικονομικής ανάλυσης, η υδροπονία έχει υψηλότερες αποδόσεις από τις συμβατικές καλλιέργειες, με αναλογίες οφέλους-κόστους να ξεπερνούν το 2, καθιστώντας έτσι την υδροπονία κατάλληλη και βιώσιμη εναλλακτική λύση.

Συνεπώς, είναι μονόδρομος η επιλογή συστημάτων που έχουν χαρακτηριστεί, ως βιώσιμα εφόσον έχουν τη δυνατότητα να καλύψουν τις ανάγκες των ανθρώπων σε θρέψη, ενώ ταυτόχρονα αποφεύγουν την υπέρμετρη εκμετάλλευση φυσικών πόρων και την εκπομπή αερίων θερμοκηπίου (FAO-ONU, 2017). Αυτός ο προβληματισμός θεμελιώνεται από την έννοια της κυκλικής οικονομίας, οι οποία προωθείται σε πολλούς τομείς του ευρωπαϊκού και μη χώρου (Korhonen, Honkasalo, & Seppälä, 2018).

Σύμφωνα με τις βασικές αρχές της κυκλικής οικονομίας, η οικονομική ευημερία θα πρέπει να συμβαδίζει με την περιβαλλοντική ανάπτυξη, εξασφαλίζοντας κυκλική ροή των εισροών και όχι αλόγιστη χρήση των διαθέσιμων φυσικών πόρων (Sverko Grdic et al.,2020). Τέλος, η εφαρμογή τέτοιων μοντέλων οικονομίας αλλά και η αξιοποίηση των τελευταίων τεχνολογιών σε συνδυασμό με προηγμένες μεθόδους καλλιέργειας θα υποστηρίξει αναμφίβολα την προσπάθεια του ανθρώπου να αντιμετωπίσει αυτές τις σύγχρονες προκλήσεις.

## **1.1 Υδροπονία**

Καλλιέργεια εκτός εδάφους ονομάζεται κάθε μορφή καλλιέργειας φυτών, το ριζικό σύστημα των οποίων αναπτύσσεται απουσία φυσικού εδάφους με την παράλληλη τροφοδότηση τους με ειδικά παρασκευασμένο θρεπτικό διάλυμα (Jensen and Collins, 1985). Το ριζικό σύστημα αναπτύσσεται είτε σε τεχνητά υποστρώματα, διαβρεχόμενα τακτικά με θρεπτικό διάλυμα, είτε απευθείας στο θρεπτικό διάλυμα (SAT, NFT, AFT κ.α.). Έτσι, τα απαραίτητα για την φυσιολογική λειτουργία και ανάπτυξη των φυτών θρεπτικά συστατικά, παρέχονται μέσω των λιπασμάτων που βρίσκονται εντός του νερού άρδευσης στις απαραίτητες πάντα ποσότητες (Savvas et al.,2011).

Όσον αφορά τον όρο υδροπονία, προέρχεται από το συνδυασμό δύο λέξεων προερχόμενες από την ελληνική γλώσσα, ύδωρ και 'πόνος', δηλαδή εργασία, και δόθηκε από τον Dr. Gericke (Μαυρογιαννόπουλος, 2006). Παρ' όλα αυτά, κατά την διάρκεια του 20<sup>ου</sup> αιώνα υπήρχαν αρκετές διαφωνίες περί του ορισμού της υδροπονίας με αποτέλεσμα πολλοί ερευνητές να αναφέρονται στην υδροπονία με διαφορετικούς ορισμούς. Άλλοτε αναφέρεται ως η επιστήμη ανάπτυξης καλλιεργειών με χρήση ενός μέσου, πέραν του χώματος με ταυτόχρονη χρήση μίγματος απαραίτητων θρεπτικών διαλυμένα στο νερό (Harris, 1977), άλλοτε ως η καλλιέργεια φυτών με ανάπτυξη των ριζών απευθείας σε θρεπτικό διάλυμα αντί του εδάφους, ενώ άλλοτε αναφέρεται γενικά στην καλλιέργεια φυτών απουσία εδάφους και παρουσία αδρανούς υποστρώματος (Benton, 2005). Ωστόσο, όποιος και να είναι ο ακριβής ορισμός, η παραπάνω τεχνική φαίνεται να αποτελεί μια πιο αποδοτική και βιώσιμη λύση συγκριτικά με την καλλιέργεια στον αγρό, καθώς αξιοποιεί ορθότερα τους διαθέσιμους φυσικούς πόρους. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιώντας μικρότερες ποσότητες νερού παράλληλα αποφεύγεται και η υποβάθμιση του εδάφους, αλλά και η μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα (Elvanidi et al., 2020). Επιπλέον, η υδροπονία επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση αλλά και την εύκολη επέμβαση στο περιβάλλον της ρίζας δίνοντας έτσι την δυνατότητα ανάπτυξης υγιών φυτών με μεγαλύτερο δυναμικό παραγωγής. Για παράδειγμα, σε μια συμβατική καλλιέργεια τομάτας παράγονται 4kg όταν με την ίδια ποσότητα νερού, σε μία υδροπονική καλλιέργεια, μπορεί να επιτευχθεί έως και 60kg παραγωγή. Αυτό επιτυγχάνεται τόσο με την αποδοτικότερη χρήση του νερού όσο και με την ομοιόμορφη κατανομή του θρεπτικού διαλύματος (Abd-Elmoniem et al., 2006). Επιπλέον, ακόμη ένα πλεονέκτημα του συστήματος είναι η δυνατότητα παραγωγής ποιοτικών προϊόντων ανεξάρτητα από την τοποθεσία της εγκατάστασης, αλλά και από την κατάσταση του εδάφους σε αυτή (αλατότητα, κακή δομή κλπ.). Τέλος, ο παραγωγός «απαγκιστρώνεται» από την εξάρτηση του στα καιρικά φαινόμενα και τις καλλιεργητικές περιόδους, διότι η ανάπτυξη σε τέτοιου τύπου συστήματα γίνεται υπό ελεγχόμενες συνθήκες περιβάλλοντος, υποστηρίζοντας συνεχή παραγωγή καθ' όλη την διάρκεια του έτους με ελάχιστους περιορισμούς επιλογής φυτών (Savvas et al., 2013; Burrage, 2014). Γι' αυτό το λόγο τα τελευταία χρόνια παρατηρείται γενική αύξηση των θερμοκηπιακών μονάδων. Παρ' όλα αυτά, δεν μπορεί να θεωρηθεί πανάκεια καθώς φέρει μεγάλο κόστος εγκατάστασης (ακόμα και αν προσφέρει μια σύντομη σχετικά απόσβεση), απαιτεί υψηλή τεχνογνωσία και

θα πρέπει να γίνει κατανοητό ότι δεν μπορεί να λύσει το 100% των προβλημάτων που μπορεί να παρουσιάσει μία καλλιέργεια (μειώνει τις προσβολές παθογόνων και κατ' επέκταση την χρήση χημικών σκευασμάτων, ωστόσο δεν τις εξαλείφει) (Savvas et al., 2013).

### **1.1.1 Ταξινόμηση των υδροπονικών συστημάτων ανάλογα με τον τρόπο διαχείρισης των απορροών**

Τα συστήματα υδροπονίας ταξινομούνται σε ανοιχτά και κλειστά συστήματα με βάση τον τρόπο διαχείρισης του θρεπτικού διαλύματος των απορροών (Εικόνα 1). Στα ανοιχτά συστήματα υδροπονίας το θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας χορηγείται μια φορά και έπειτα απορρίπτεται στο περιβάλλον (Abd-Elmoniem et al., 2006). Κύριο πλεονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος είναι η αποφυγή της συνεχούς διόρθωσης του θρεπτικού διαλύματος, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες μετάδοσης μικροοργανισμών στα φυτά διαμέσου του αρδευτικού συστήματος (Jones, 2005; Paradiso et al., 2014). Παρ'όλα αυτά, το βασικότερο μειονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος είναι η περιβαλλοντική επιβάρυνση, μέσω της απόρριψης μεγάλων ποσοτήτων νερού και λιπασμάτων (Nederhoff & Stanghellini, 2010).

Αντίθετα σύμφωνα με τους Lykas et al. (2006), στα κλειστά συστήματα, το διάλυμα τροφοδοσίας χορηγείται πολλές φορές, κάνοντας προσθήκη νερού και θρεπτικών, αποφεύγοντας έτσι την τακτική αντικατάσταση του. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος αυτού, το θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας ελέγχεται και ρυθμίζεται τακτικά προκειμένου να διατηρηθούν οι κατάλληλες αναλογίες των θρεπτικών συστατικών με βάση τη συνταγή θρέψης της εκάστοτε καλλιέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, τα κλειστά συστήματα καλλιέργειας βασίζονται στη λειτουργία τους στη συνεχή ρύθμιση του θρεπτικού διαλύματος με τακτικούς ελέγχους του pH και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας αλλά και στη χημική ανάλυση του διαλύματος επανακυκλοφορίας (Pardossi et al., 2006; Sonneveld and Voogt, 2009). Έτσι, σε αντίθεση με τα ανοιχτά συστήματα, δεν πραγματοποιείται απόρριψη του θρεπτικού διαλύματος στο περιβάλλον, γεγονός που συντελεί σε περιορισμό των παραγόμενων απορροών που καταλήγουν στο περιβάλλον (Abd-Elmoniem et al., 2006).

Επιπλέον, ο όγκος του νερού αλλά και η ποσότητα των θρεπτικών των κλειστών συστημάτων υπολογίζεται ότι είναι κατά 20% - 40% λιγότερα σε σύγκριση με τα ανοιχτά συστήματα, ωστόσο συστήνεται τακτικός έλεγχος και συντήρηση (Nederhoff & Stanghellini, 2010). Παρ'όλα αυτά, πραγματοποιείται συσσώρευση των ιόντων Na και Cl στην περιοχή της ρίζας των φυτών διότι η απορρόφησή τους πραγματοποιείται σε μικρές συγκεντρώσεις. Συνεπώς, η μερική απομάκρυνση του απορρέοντος διαλύματος κρίνεται απαραίτητη, ώστε να ελέγχονται τόσο τα επίπεδα αλατότητας στο περιβάλλον της ρίζας των φυτών όσο και ύπαρξη παθογόνων μικροοργανισμών για την αποφυγή επιμόλυνσης (Lykas et al., 2006).

Ένας εναλλακτικός τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος αυτού είναι η πρόσθεση νερού καλής ποιότητας στο απορρέον θρεπτικό διάλυμα, με στόχο τη μείωση της συγκέντρωσης του NaCl. Έπειτα, από την αραίωση του θρεπτικού διαλύματος γίνεται προσθήκη θρεπτικών συστατικών, γεγονός που το καθιστά ικανό για εφαρμογή ξανά στην καλλιέργεια, αλλά και άρδευση ανθεκτικότερων καλλιεργειών στην αλατότητα. Το θρεπτικό διάλυμα που συλλέγεται από τις δεξαμενές απορροής μπορεί είτε να επαναχρησιμοποιηθεί άμεσα είτε έπειτα από την αραίωσή του με νερό από την θερμοκηπιακή εγκατάσταση (García-Caparrós et al., 2018).

Επίσης, έχουν αναπτυχθεί προγράμματα DSS (Decision Support Systems) τα οποία διαχειρίζονται δεδομένα σχετικά με το pH, την ηλεκτρική αγωγιμότητα, αλλά και τη θερμοκρασία και την υγρασία που παίρνουν από τους αισθητήρες που έχουν εγκατασταθεί στο θερμοκήπιο (Katsoulas et al., 2016). Τα προγράμματα αυτά έχουν αναπτυχθεί σύμφωνα με κάποια μαθηματικά μοντέλα και έχουν τη δυνατότητα σε πραγματικό χρόνο να 'επεξεργάζονται' αυτόματα το διάλυμα τροφοδοσίας. Κάποιες βασικοί παράμετροι που παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ρύθμιση του θρεπτικού διαλύματος είναι το στάδιο ανάπτυξης του φυτού, αλλά και οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούν κάθε χρονική περίοδο διότι φαίνεται να εμπλέκονται στη διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής, αλλά και στην απορρόφηση νερού και θρεπτικών (Sonneveld, 1995). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο όγκος της απορροής να διαφέρει σε κάθε άρδευση.

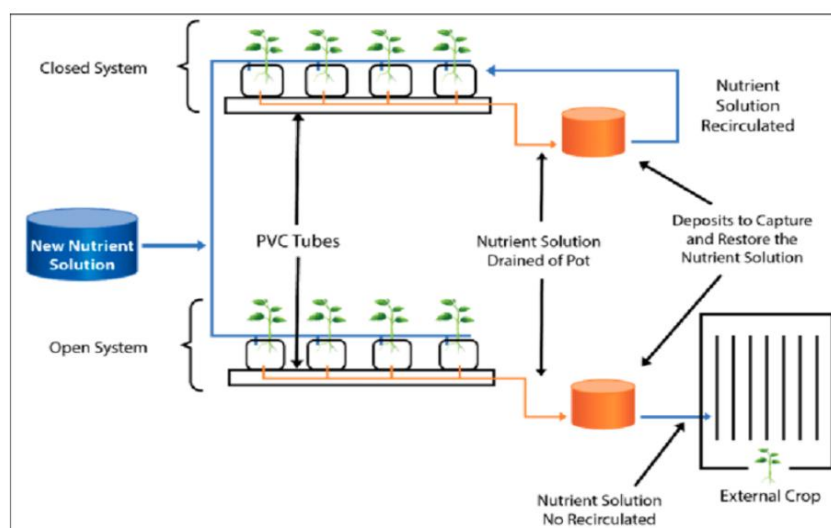
Επιπλέον, στα "ημίκλειστα" συστήματα το διάλυμα των απορροών μιας καλλιέργειας συλλέγεται, διορθώνεται στην κεφαλή υδρολίπανσης και έπειτα επαναχρησιμοποιείται για την άρδευση μιας δευτερεύουσας καλλιέργειας και τελικά



απορρίπτεται στο περιβάλλον ωστόσο με αισθητά μικρότερες ποσότητες θρεπτικών συγκριτικά με ένα ανοιχτό υδροπονικό σύστημα. Όμως, η επιλογή τόσο των κλειστών όσο και των ημίκλειστων συστημάτων υδροπονίας δεν συνηθίζεται σε εμπορικής κλίμακας θερμοκήπια εξαιτίας τόσο του αυξημένου κόστους εγκατάστασης του συστήματος όσο και του ενδεχόμενου προβλήματος με την αλατότητα και με τη μετάδοση ασθενειών διαμέσου του θρεπτικού διαλύματος (Stanghellini et al., 2005).

Σημαντικό θα ήταν να αναφερθεί ότι ο έλεγχος της αλατότητας στα κλειστά συστήματα υδροπονίας μπορεί να επιτευχθεί μέσω της συχνότητας της άρδευσης, εφόσον η αύξηση της συχνότητας της μπορεί να περιορίσει τη συγκέντρωση των ιόντων νατρίου και χλωρίου στις ρίζες της καλλιέργειας (Sannas et al., 2007). Ωστόσο, τόσο οι διαφορετικοί τύποι των κλειστών συστημάτων καλλιέργειας όσο και τα διάφορα υποστρώματα που χρησιμοποιούνται (περλίτης, πετροβάμβακας) παίζουν σημαντικό ρόλο στη συχνότητα άρδευσης μιας καλλιέργειας (Grewal et al., 2011; Νικολαου et al., 2017).

Τέλος, η εφαρμογή των κλειστών συστημάτων έχει συσχετιστεί με την υψηλότερη απόδοση των καλλιεργειών, αλλά και με τη καλύτερη διαχείριση των υδάτινων πόρων σε διάφορα είδη φυτών που παρουσιάζουν μέτρια ανθεκτικότητα στην αλατότητα, όπως η τομάτα και το μαρούλι (Pardossi et al., 2006). Επιπλέον, τα παραπάνω υδροπονικά συστήματα δύνανται να συμβάλλουν στην αποδοτικότερη χρήση του νερού (Katsoulas et al., 2014).



**Εικόνα 3.** Ανοιχτά και κλειστά συστήματα υδροπονίας (De la Rosa-Rodríguez, 2020).

### 1.1.2 Ταξινόμηση των υδροπονικών συστημάτων ανάλογα με το μέσο ανάπτυξης του συστήματος των ριζών

Με βάση το μέσο ανάπτυξης του ριζικού συστήματος των καλλιεργειών στα υδροπονικά συστήματα αναφέρεται η μέθοδος καλλιέργειας με απουσία υποστρώματος καθώς και η μέθοδος καλλιέργειας σε στέρεο υπόστρωμα (Jones 1997; Gradziel, 2010).

Όσον αφορά την καλλιέργεια απουσία υποστρώματος η πιο διαδεδομένη τεχνική είναι αυτή της ρηχό ρεύμα θρεπτικού διαλύματος Nutrient Film Technique (NFT). Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα κανάλι με συγκεκριμένη κλίση, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα συνεχούς ροής του θρεπτικού διαλύματος προς τις ρίζες των φυτών οι οποίες αναπτύσσονται στο εσωτερικό του καναλιού (Rhesh, 2013). Σημαντικό θα ήταν να αναφερθεί ότι η κλίση των καναλιών αυτών εξαρτάται κυρίως από το ριζικό σύστημα της καλλιέργειας, αλλά και από το μήκος του καναλιού. Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα NFT απαρτίζονται από κανάλια τα οποία καλύπτονται από αδιαφανή υλικά, ώστε να μην εισέρχεται το ηλιακό φως μέσα στα οποία ρέει συνεχώς το θρεπτικό διάλυμα που προέρχεται από μια δεξαμενή (Graves, 1983). Το σύστημα NFT αποτελεί μια υδροπονική μέθοδο στην οποία εφαρμόζεται άρδευση με επαναλαμβανόμενη χρήση του νερού και των θρεπτικών ως μέσο ανάπτυξης. Το διάλυμα τροφοδόσιας που εφαρμόζεται στην εκάστοτε καλλιέργεια συλλέγεται σε μια δεξαμενή και εφαρμόζεται ξανά στο ριζικό σύστημα των φυτών. Ωστόσο, απαραίτητη προϋπόθεση για την ομαλή λειτουργία του συστήματος είναι η τακτική παρακολούθηση του θρεπτικού διαλύματος με στόχο να διατηρηθεί η σύνθεσή του (Lykas et al., 2006; Nederhoff & Stanghellini, 2010). Τέλος, οι παράμετροι που θα πρέπει να ελέγχονται συχνά ώστε να παραμένουν στο επιθυμητό εύρος για κάθε φυτό είναι το pH, αλλά και ηλεκτρική αγωγιμότητα του διαλύματος τροφοδόσιας, δεδομένου ότι επηρεάζουν άμεσα την ανάπτυξη των φυτών (Yolanda et al., 2017).

Ακόμη μια τεχνική ανάπτυξης των καλλιεργειών, χωρίς υπόστρωμα, είναι η αεροπονία. Στην αεροπονία το ριζικό σύστημα αναπτύσσεται σε κλειστές δεξαμενές ή σε κανάλια καλλιέργειας, όπου διάμεσου ενός συστήματος υδρονέφωσης ψεκάζεται συνεχώς με θρεπτικό διάλυμα (Weathers and Zobel, 1992). Το διάλυμα εφαρμόζεται κάθε 30 με 60 δευτερόλεπτα, απευθείας στις ρίζες οι οποίες πρέπει να διατηρούνται πάντα νωπές, ώστε να μπορούν να απορροφούν νερό και θρεπτικά συστατικά βάση

των κλιματικών συνθηκών που επικρατούν, της εκάστοτε καλλιέργειας, αλλά και του σταδίου ανάπτυξης των φυτών.

Τέλος, μια καινοτομική μέθοδος ανάπτυξης φυτών είναι η ενυδραιοπονία. Η ενυδραιοπονία αναφέρεται σε συστήματα στα οποία το νερό επανακυκλοφορεί, ενώ πραγματοποιείται ταυτόχρονα καλλιέργεια φυτών και εκτροφή ιχθύων, τα οποία χαρακτηρίζονται από συμβιωτική σχέση (Rakocy, 1997). Οι Palm et al. (2018) έδωσαν έναν ορισμό της ενυδραιοπονίας, σύμφωνα με τους οποίους ενυδραιοπονία είναι το σύστημα παραγωγής υδρόβιων οργανισμών και εδάδιμων φυτών, όπου η πλειοψηφία των θρεπτικών (>50%), που στηρίζουν την ανάπτυξη των φυτών προέρχεται από τα απόβλητα της τροφής των υδρόβιων οργανισμών.

Είναι γεγονός ότι, τα υδροπονικά συστήματα κάνουν χρήση συνθετικών λιπασμάτων, ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες για θρέψη των φυτών, αντίθετα τα συστήματα ενυδραιοπονίας εκμεταλλεύονται το πλούσιο σε θρεπτικά νερό στο οποίο αναπτύσσονται τα ψάρια, προκειμένου να αναπτυχθούν τα φυτά. Το σύστημα αυτό χαρακτηρίζεται βιώσιμο δεδομένης της ταυτόχρονης συμβίωσης πολλών οργανισμών (φυτών, ιχθύων, βακτηρίων) αλλά και της αειφόρου χρήσης νερού και θρεπτικών συστατικών και της ανακύκλωσής τους. Τέλος, θα πρέπει να τονιστεί ότι, αυτό το σύστημα καλλιέργειας ελαχιστοποιεί τόσο την ανάγκη για εισαγωγή συνθετικών λιπασμάτων όσο και την απόρριψη αυτών στο περιβάλλον (Goddek et al., 2015).

### **Υδροπονική καλλιέργεια σε στερεά υποστρώματα**

Ως υπόστρωμα ή αλλιώς μέσο ανάπτυξης χαρακτηρίζεται κάθε πορώδες υλικό που μπορεί να αντικαταστήσει το έδαφος και να χρησιμοποιηθεί για την καλλιέργεια των φυτών. Ανάλογα με τη σύστασή τους τα υποστρώματα κατατάσσονται στα οργανικά, τα οποία με τη σειρά τους μπορεί να είναι είτε συνθετικά είτε να βασίζονται σε φυσικά υλικά και σε ανόργανα, κάποια από τα οποία πριν χρησιμοποιηθούν επεξεργάζονται βιομηχανικά, όπως ο πετροβάμβακας και ο περλίτης και άλλα είναι φυσικής προέλευσης, όπως η άμμος (Gruda, 2012). Ωστόσο, σημαντικό είναι να τονιστεί ότι στα υδροπονικά συστήματα το υπόγειο μέρος των φυτών που αναπτύσσονται στα υποστρώματα που αναφέρθηκαν παρουσιάζουν μικρότερη ανάπτυξη σε σύγκριση με το ριζικό σύστημα των φυτών που αναπτύσσονται σε υπαίθριες καλλιέργειες. Για αυτό το λόγο, θα πρέπει να

μελετώνται προσεκτικά τόσο οι χημικές όσο και οι φυσικές ιδιότητες των υποστρωμάτων πριν χρησιμοποιηθούν στην εκάστοτε καλλιέργεια, προκειμένου να εξασφαλίζεται ο αερισμός του ριζικού συστήματος, αλλά και να επιτυγχάνεται η συγκράτηση των απαραίτητων θρεπτικών στοιχείων αλλά και του νερού (Carlile et al., 2019).

Ένα από τα πιο διαδεδομένα υποστρώματα που χρησιμοποιούνται στην υδροπονία είναι ο περλίτης. Το υπόστρωμα αυτό αποτελεί ένα υαλώδες αδρανές ορυκτό με αργιλλοπηριτική σύσταση ενώ έχει ηφαιστειακή προέλευση και χαρακτηρίζεται από υψηλή ικανότητα συγκράτησης νερού (συγκρατεί έως και 3 με 4 φορές το βάρος του σε νερό) και αερισμού (Tyson, 2008a). Επιπλέον, το pH του παίρνει τιμές από 6 έως 8 και δεν παρουσιάζει ρυθμιστική ικανότητα και ΙΑΚ (Jones, 1997), δηλαδή δε δεσμεύει τα θρεπτικά στοιχεία του θρεπτικού διαλύματος, αλλά είναι άμεσα διαθέσιμα προς απορρόφηση από την καλλιέργεια. Ο περλίτης επιλέγεται συχνά από τους παραγωγούς, γιατί μπορεί να εγκατασταθεί εύκολα ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει χαμηλό κόστος εφόσον, οι σάκοι στους οποίους εμπεριέχεται μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξανά έπειτα, από την αφαίρεση των φυτικών υπολειμμάτων, αλλά και την απαραίτητη απολύμανσή τους (Jones, 1997).

Ο πετροβάμβακας επίσης είναι ένα εξίσου συχνά χρησιμοποιούμενο υπόστρωμα. Είναι ένα ανόργανο ινώδες υλικό το οποίο παράγεται με θερμική επεξεργασία ενός μείγματος που αποτελείται κατά 60% από διαβάση, 20% από ασβεστόλιθο και 20% από άνθρακα (Verwer, 1976). Για την παραγωγή του, το παραπάνω μείγμα θερμαίνεται στους 1600°C και υπόκειται σε ειδική επεξεργασία. Ταυτόχρονα, αυτές οι θερμοκρασίες καθιστούν τον πετροβάμβακα πλήρως αποστειρωμένο και κατ' επέκταση απαλλαγμένο από οποιοδήποτε είδος ζιζανίου, μικροβίου ή ζωικού εχθρού. Το ολικό πορώδες του πετροβάμβακα είναι 95-97% και κατά την επεξεργασία του προστίθενται ουσίες που αυξάνουν τη διαβρεκτικότητα του υλικού (όπως η Phemolresin) λαμβάνοντας οποιοδήποτε σχήμα χρειάζεται ανάλογα την χρήση του. Ο πετροβάμβακας έχει διαδοθεί, λόγω της αδράνειας του η οποία επιτρέπει τον ολικό έλεγχο του μικροκλίματος της ρίζας και της θρέψης με το θρεπτικό διάλυμα (Savvas et al., 2013).



Εικόνα 4. Υπόστρωμα (α) περλίτη και (β) πετροβάμβακα .

## 1.2 Διαχείριση θρεπτικού διαλύματος

Θρεπτικό διάλυμα ή διάλυμα τροφοδοσίας καλείται το διάλυμα νερού στο οποίο εμπεριέχονται σε διαλυμένη μορφή το σύνολο των απαραίτητων μακροστοιχείων (C, O<sub>2</sub>, H, N, P, S, K, Ca, Mg), αλλά και ιχνοστοιχείων (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Cl), απαραίτητων για την ορθή ανάπτυξη και ολοκλήρωση του βιολογικού κύκλου των φυτών. Το παραπάνω αυτό διάλυμα διοχετεύεται άμεσα στο ριζικό σύστημα το οποίο και λαμβάνει τα απαραίτητα αυτά στοιχεία. Το υδατικό αυτό διάλυμα είναι δυνατό να ικανοποιήσει όλες τις θρεπτικές ανάγκες που ενδέχεται να απαιτεί μία καλλιέργεια πλην των στοιχείων του άνθρακα, υδρογόνου οξυγόνου και χλωρίου (το χλώριο τις περισσότερες των περιπτώσεων, υπάρχει ήδη σε μορφή ανιόντος στο νερό, που χρησιμοποιείται) (Sonneveld, 2002). Η χρήση θρεπτικού διαλύματος επιτρέπει τόσο την μείωση χρήσης νερού, διότι γίνεται ταυτόχρονη άρδευση και λίπανση, αλλά και μείωση λιπασμάτων διότι η απορρόφηση είναι πιο άμεση και με σημαντικά λιγότερες απώλειες σε σχέση με την κοινή λίπανση. Στην προετοιμασία των θρεπτικών διαλυμάτων πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή για αποφυγή δημιουργίας συσσωματωμάτων ή τοξικών αντιδράσεων μεταξύ χημικών ενώσεων που χρησιμοποιούνται (Savvas et al., 2013).

Σε ένα υδροπονικό σύστημα η χορήγηση του διαλύματος τροφοδοσίας στο ριζικό σύστημα της καλλιέργειάς μας πραγματοποιείται έπειτα από την ανάμειξη

χημικών λιπασμάτων και του νερού άρδευσης μέσω του συστήματος υδρολίπανσης. Κύριο πλεονέκτημα της τεχνικής είναι ο έλεγχος αλλά και ο υπολογισμός της δόσης τόσο του λιπάσματος όσο και του νερού ανάλογα με την απορρόφηση του κάθε φυτικού είδους, αλλά και την εφαρμογή των θρεπτικών συστατικών με ομοιόμορφο τρόπο στην περιοχή της ριζόσφαιρας. Ωστόσο, το υψηλό κόστος εγκατάστασης του συστήματος αυτού αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία καταγράφονται δυο τρόποι διαχείρισης του θρεπτικού διαλύματος (Savvas, 2002). Ο πρώτος ορίζει εξ αρχής μια συγκεκριμένη τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας σύμφωνα με την οποία πραγματοποιείται η ρύθμιση και διατήρηση των θρεπτικών συστατικών στο διάλυμα άρδευσης. Αντίστοιχα, ο δεύτερος εστιάζει στη ρύθμιση της συγκέντρωσης, ώστε να πάρει το φυτό την απαραίτητη ποσότητα θρεπτικών που χρειάζεται με βάση το στάδιο ανάπτυξης του, η οποία συνήθως προκύπτει από μαθηματικά μοντέλα που εστιάζουν στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης (Marcelis et al., 2005).

Στις καλλιέργειες εκτός εδάφους ο κυριότερος παράγοντας από τον οποίο επηρεάζεται άμεσα η ποιότητα του θρεπτικού διαλύματος είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, όταν η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι χαμηλή τότε παρουσιάζεται δυσκολία στην πρόσληψη των θρεπτικών ουσιών από την καλλιέργεια. Ωστόσο, αν η τιμή της EC είναι αυξημένη τότε ορισμένα φυτά βρίσκονται σε κατάσταση καταπόνησης. Οι Livia et al (2012) αναφέρουν ότι σε συστήματα υδροπονίας η επιθυμητή τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας κυμαίνεται από 1.5 μέχρι 2.5dS m<sup>-1</sup>. Τιμές πάνω από αυτό το όριο κρίνονται μη επιθυμητές, διότι εκθέτουν την καλλιέργειά σε stress αλατότητας (Dorais et al, 2001). Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι, κάθε φυτικό είδος ανταποκρίνεται διαφορετικά στα επίπεδα αλατότητας. Συνεπώς, θα πρέπει για κάθε φυτικό είδος να προσδιορίζονται οι τιμές αυτές πειραματικά (Savvas, 2001) ή μέσω συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων (ΣΥΑ).

Επιπρόσθετα, το pH αποτελεί τον επόμενο σημαντικότερο παράγοντα που παίζει σημαντικό ρόλο στη θρέψη των φυτών, γι' αυτό και χρήζει συνεχούς προσδιορισμού του. Το pH εκφράζει τη συγκέντρωση των υδρογονοκατιόντων και επηρεάζει σημαντικά τόσο τη διαλυτότητα όσο και το βαθμό διαθεσιμότητας των θρεπτικών στοιχείων στα φυτά. Ωστόσο, η διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων στην καλλιέργεια μας σχετίζεται άμεσα με το pH του υποστρώματος που

χρησιμοποιείται (Nelson, 1991). Επιπλέον, το εύρος τιμών του pH που καθιστά άμεσα διαθέσιμα τα θρεπτικά είναι 5.6- 6.2.

Σύμφωνα με τους Putra & Yuliando (2015), ο όγκος του νερού στο ριζικό σύστημα της καλλιέργειάς μας είναι δυνατόν να μεταβάλλει αυτές τις τιμές. Σημαντικό θα ήταν να αναφερθεί ότι, το N εφαρμόζεται στην καλλιέργεια τόσο με τη μορφή ανιόντος ( $\text{NO}_3^-$ ) όσο και με την με τη μορφή κατιόντος ( $\text{NH}_4^+$ ), όμως οι συγκεντρώσεις των δυο ιόντων στο θρεπτικό διάλυμα επηρεάζουν άμεσα τον ρυθμό απορρόφησής τους από τα φυτά (Forde & Clarkson, 1999). Ωστόσο, η διαχείριση του λόγου αμμωνιακό άζωτο/νιτρικό άζωτο στο διάλυμα τροφοδοσίας, καθορίζει το λόγο συνολικής πρόσληψης κατιόντων/ανιόντων. Τέλος, αυτές οι μεταβολές επηρεάζουν με τη σειρά τους την το pH της ριζόσφαιρας (Savvas et al., 2006).

### **1.3 Αποδοτικότητα Χρήσης Νερού (Water Use Efficiency)**

Ο όρος αποδοτικότητα χρήσης νερού (WUE), εκφράζεται ως ο λόγος του νερού που συμμετέχει στις διάφορες διεργασίες του μεταβολισμού των φυτών, προς το νερό που καταναλώνεται κατά τη διαδικασία της διαπνοής (Briggs, and Shantz, 1913). Είναι γεγονός ότι, αποτελεί έναν αξιόπιστο δείκτη εκτίμησης εξοικονόμησης νερού και της προσαρμογής της καλλιέργειας στο περιβάλλον του θερμοκηπίου. Σε επίπεδο φύλλων εκφράζεται από το λόγο της φωτοσύνθεσης προς διαπνοή ή από το λόγο φωτοσύνθεσης προς στοματική αγωγιμότητα (Bacon, 2004).

Σύμφωνα με τον Stanghellini (2014), στα κλειστά υδροπονικά συστήματα η διαπνοή αποτελεί τον κύριο παράγοντα απώλειας νερού από τα φυτά φτάνοντας μέχρι και το 90% της συνολικής άρδευσης που χορηγήθηκε. Τα φυτά μέσω της διαδικασίας αυτής, προκαλούν αύξηση της σχετικής υγρασίας στο περιβάλλον του θερμοκηπίου. Ως συνέπεια αυτού, προκαλείται περαιτέρω αύξηση της διαπνοής των φυτών (Singh, 1982) και αυτό με τη σειρά του, οδηγεί στη μείωση της αποδοτικότητας νερού.

Γενικά, όταν τα φυτά εκτίθενται σε συνθήκες καταπόνησης, που οφείλεται είτε σε αβιοτικούς είτε σε βιοτικούς παράγοντες παρατηρείται μείωση της παραγωγικότητας δεδομένου ότι αναπτύσσονται σε μη ιδανικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση της παραγωγικότητας οφείλεται στο κλείσιμο των στομάτων

και ως αποτέλεσμα αυτού παρατηρείται αναστολή της διαπνοής των φυτών, γεγονός που οδηγεί με τη σειρά του στην αύξηση της θερμοκρασίας του φυλλώματος (Katsoulas et al., 2009).

Τέλος, σε έρευνα των Katsoulas et al., (2015) σε ημίκλειστο σύστημα υδροπονίας, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός του δείκτη αποτελεσματικότητας νερού, έπειτα από τοποθέτηση συστήματος ψύξης, ώστε να μειωθούν οι ανάγκες για αερισμό, ενώ παράλληλα να επιτευχθεί καλύτερος έλεγχος θερμοκρασίας και υγρασίας του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας, καταγράφηκε αύξηση στην απόδοση της καλλιέργειας εξαιτίας της ύπαρξης ιδανικών συνθηκών ενώ παράλληλα παρατηρήθηκε αποτελεσματικότερη χρήση νερού εφόσον οι υδρατμοί συλλέγονταν και επαναχρησιμοποιούνταν. Συνεπώς, η εκμετάλλευση του νερού που χάνεται κατά την εξατμισοδιαπνοή οδηγεί στην αύξηση του δείκτη WUE, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει την απόδοση της καλλιέργειας.

Τέλος, η ανάπτυξη συστημάτων που εξασφαλίζουν αποδοτικότερη χρήση νερού φαίνεται να αποτελούν μονόδρομο ώστε να αποφευχθεί η εξάντληση του φυσικού πόρου (Koech & Langat, 2018). Η αειφορική διαχείριση των υδάτινων πόρων αποτελεί κύριο μέλημα των αναπτυσσόμενων χωρών.

#### **1.4 Απορρόφηση και μεταφορά νερού και θρεπτικών ιόντων στο φυτό**

Η απορρόφηση του νερού και των θρεπτικών συστατικών συμβαίνει από το ριζικό σύστημα των φυτών και έπειτα, μεταφέρονται κατακόρυφα στο υπέργειο μέρος (Clemens et al., 2002). Όταν τα θρεπτικά εισέλθουν στο εσωτερικό της ρίζας ακολουθούν μια συνδυαστική πορεία, μέσω του αποπλάστη, των μεμβρανών και συμπλάστη γνωστή και ως αποπλαστική, διαμεμβρανική και συμπλαστική κίνηση. Όσον αφορά την αποπλαστική οδό, τα θρεπτικά μετακινούνται με τη βοήθεια του νερού στους μεσοκυττάριους χώρους και στα κυτταρικά τοιχώματα, ενώ όσον αφορά τη διαμεμβρανική οδό, η κίνηση πραγματοποιείται στην πλασματική μεμβράνη. Αντίστοιχα, κατά την συμπλαστική πορεία το νερό κινείται από κύτταρο σε κύτταρο διαμέσου των πλασμοδεσμών. Ωστόσο, σημαντικό θα ήταν να αναφερθεί ότι στην



περιοχή της ενδοδερμίδας η αποπλαστική κίνηση του νερού και των θρεπτικών παρεμποδίζεται από την ταινία Caspary και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή πορείας. Έπειτα, με στόχο την τροφοδότηση του υπέργειου μέρους του φυτού, το νερό και τα ιόντα οδηγούνται στον κεντρικό κύλινδρο, ώστε να μεταφερθούν στα αγγεία του ξύλου των φυτών (Clemens et al., 2002). Η μεταφορά αυτή ουσιαστικά είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διαδικασία της διαπνοής των φυτών, δηλαδή της απομάκρυνσης νερού από τα φύλλα γεγονός που προκαλεί αρνητική πίεση ή αλλιώς πτώση του υδατικού δυναμικού ( $\Psi$ ) από τα αγγεία των φύλλων στα αγγεία του βλαστού και στα αγγεία της ρίζας τροφοδοτώντας έτσι τα φυτά με τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία και νερό. Στην περίπτωση χαμηλού ρυθμού διαπνοής, ενεργό ρόλο παίζει η ριζική πίεση, η οποία βοηθά την ανοδική κίνηση στα αγγεία του ξύλου. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μείωσης του  $\Psi$  στα ξυλώδη αγγεία του ριζικού συστήματος λόγω της ενεργητικής απέκκρισης των ανόργανων ιόντων αλλά και της αδυναμίας απομάκρυνσης αυτών από το φυτό. Η προαναφερθείσα κατάσταση έχει επιφέρει την ανάπτυξη  $\Delta\Psi$  μεταξύ του νερού που κινείται στα ξυλώδη αγγεία και του εξωτερικού θρεπτικού διαλύματος. Το νερό που εισέρχεται προωθεί την άνοδο των ιόντων τα οποία βρίσκονται ήδη στο εσωτερικό του φυτού, γεγονός που οδηγεί τόσο στην μεταφορά όσο και στην ομοιόμορφη κατανομή τους σε όλα τα υπέργεια μέρη του φυτού. Σημαντικό θα ήταν να αναφερθεί ότι η ομοιόμορφη κατανομή των θρεπτικών σε όλους του φυτικούς ιστούς συμβαίνει μόνο κατά την ενεργοποίηση της ριζικής πίεσης. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω εξαιτίας της παρεμπόδισης των ιόντων από την ταινία Caspary, τα ανόργανα ιόντα να αλλάξουν πορεία και να κινηθούν μέσω των μεμβρανών ώστε να φτάσουν στον αγγειώδη κύλινδρο της ρίζας. Μέσω της διαμεμβρανικής οδού διασφαλίζεται η επιλεκτική μεταφορά ιόντων τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά του κυττάρου (Νεοκλέους, 2017).

Ωστόσο, τα ιόντα απορροφούνται και μεταφέρονται στο κυτόπλασμα είτε ενεργητικά είτε παθητικά. Όσον αφορά τον παθητικό τρόπο ή αλλιώς τη διάχυση συμβαίνει αυθόρμητα, τα ιόντα σε αυτή την περίπτωση μεταφέρονται ανάλογα με τη συγκέντρωσή τους, από τη μεγαλύτερη προς τη μικρότερη. Πιο συγκεκριμένα, με αυτόν τον τρόπο, διαμέσου της κυτταρικής μεμβράνης μπορούν να μετακινούνται ενώσεις μικρού μοριακού βάρους χωρίς κατανάλωση ενέργειας από το φυτό. Αντίθετα, κατά τον ενεργητικό τρόπο απορρόφησης και μετακίνησης, τα ιόντα δεν μετακινούνται βάσει της συγκέντρωσης αλλά διαμέσου πρωτεϊνικών μεταφορέων με

κατανάλωση μεταβολικής ενέργειας, η οποία παρέχεται κυρίως με τη μορφή της της τριφωσφορικής αδενοσίνης ή απλώς ATP (Νεοκλέους, 2017).

Σύμφωνα με τους Sonneveld and Voogt (2009), ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την απορρόφηση των ιόντων είναι η συγκέντρωσή τους στο θρεπτικό διάλυμα. Ωστόσο, εκτός από αυτό τον παράγοντα σημαντικό ρόλο παίζουν κλιματικοί παράγοντες όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία όσο και παράγοντες που αφορούν το υπόστρωμα και το θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας όπως pH, η συγκέντρωση άλλων ιόντων, αλλά και γενικότερα η θρεπτική κατάσταση του φυτού (White and Broadley, 2003; Bouranis et al., 2014).

Αρχικά, υψηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας επηρεάζουν θετικά την ταχύτητα απορρόφησης ιόντων εξαιτίας της μετακίνησης των παραγόμενων από την φωτοσύνθεση σακχάρων προς το ριζικό σύστημα για την παραγωγή ενέργειας με στόχο την αξιοποίησή της στην ενεργητική απορρόφηση των ιόντων (Salisbury and Ross, 1969). Επιπλέον, η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα σε ένα θερμοκήπιο συνδέεται με τη βελτίωση της απορρόφησης του καλίου, του ασβεστίου και του μαγνησίου από τα φυτά (Nkasnsah and Ito, 1995).

Το pH αναφέρεται, είτε στην αλκαλικότητα είτε στην οξύτητα του θρεπτικού διαλύματος στο οποίο εμπεριέχονται με μορφή ιόντων τα ανόργανα θρεπτικά στοιχεία. Όταν το pH είναι αλκαλικό τότε παρεμποδίζεται η απορρόφηση των ανιόντων εξαιτίας του ανταγωνισμού τους τα ιόντα  $\text{OH}^-$ , σε αντίθεση με την παρουσία όξινου pH όπου παρατηρείται μείωση της απορρόφησης των κατιόντων και βελτίωση της απορρόφησης των ανιόντων λόγω ανταγωνισμού.

Σημαντικό θα ήταν να αναφερθεί ότι, οι έντονες διακυμάνσεις του pH είναι ικανές να προκαλέσουν τροφопενίες ή τοξικότητες στην καλλιέργειά μας. Ωστόσο, όπως έχει αναφερθεί, η επιθυμητή συγκέντρωση των ιόντων στο θρεπτικό διάλυμα για κάθε καλλιέργεια διαφέρει και δεν μένει πάντοτε σταθερή διότι επηρεάζεται από τον ανταγωνισμό των στοιχείων γεγονός που τελικά οδηγεί στην παρεμπόδιση απορρόφησης άλλων στοιχείων. Όπως διαπίστωσαν οι Bell et al. (1989), όταν το K απαντάται σε μεγάλες συγκεντρώσεις στο θρεπτικό διάλυμα φαίνεται να επηρεάζεται αρνητικά η περιεκτικότητα Ca, ενώ αντίστοιχα όταν η συγκέντρωση του ασβεστίου είναι αυξημένη τότε παρατηρείται μείωση της απορρόφησης του  $\text{Mg}^{++}$ . Ακόμη, διάφορες αντιδράσεις που μπορεί να συμβούν μεταξύ στοιχείων (συνήθως  $\text{Ca}^{++}$  με

HPO<sup>4-</sup>) είναι πιθανό να επιδράσουν αρνητικά τόσο στη συγκέντρωση άλλων θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα τροφοδοσίας όσο και στη δημιουργία ιζήματος.

## 1.5 Αλατότητα

Ο παράγοντας της αλατότητας φαίνεται να ταλανίζει ιδιαίτερα τον τομέα της γεωργίας (Parida & Das, 2005; Munns & Tester, 2008). Ανάμεσα στους σημαντικότερους αβιοτικούς παράγοντες που προκαλούν καταπόνηση στα φυτά είναι και αυτός της αλατότητας, καθώς φαίνεται να επηρεάζει τόσο την ανάπτυξη όσο και την παραγωγικότητα τους (Munns, 2002; Afzal et al., 2006).

Σύμφωνα με τον Καραμπουρνιώτη (2012), η αλατότητα αφορά στις υψηλές συγκεντρώσεις ιόντων νατρίου και χλωρίου στη ριζόσφαιρα. Το γεγονός αυτό, μπορεί να οφείλεται στη χρήση νερού με αυξημένες συγκεντρώσεις νατρίου και χλωρίου. Επιπλέον, όσον αφορά τα συστήματα υδροπονίας, όπως αναφέρθηκε σε παραπάνω κεφάλαιο, η χρήση μεγάλων ποσοτήτων λιπασμάτων στα συστήματα αυτά οδηγεί στην συσσώρευση ιόντων στο περιβάλλον των ριζών. Συνεπώς, προκύπτει δυσκολία στη διαχείριση ή/και στην επαναχρησιμοποίηση του διαλύματος γεγονός που ωθεί τους παραγωγούς στην απόρριψή του στο περιβάλλον.(Ahuja et al., 2010; Garrido et al., 2013).

Οι επιπτώσεις αυτού του παράγοντα καταπόνησης μπορεί να είναι είτε βραχυπρόθεσμες είτε μακροπρόθεσμες, ανάλογα με το είδος του φυτού. Αρχικά, η συσσώρευση αλάτων στη ριζόσφαιρα των φυτών προκαλεί αλλαγές στο υδατικό δυναμικό των ριζών με αποτέλεσμα να προκαλείται οσμωτικό στρες και έπειτα μείωση της ανάπτυξης και της παραγωγικότητας των φυτών (Zorb et al., 2005; Pitann et al., 2009b).

Επιπλέον, σύμφωνα με τον Munns (2002, 2006), η αλατότητα μπορεί να προκαλέσει μείωση στο ρυθμό κυτταροδιαίρεσης. Όσον αφορά τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της αλατότητας στα φυτά, η ιδιαίτερα αυξημένη συγκέντρωση χλωριούχου νατρίου στα κενοτόπια των κυττάρων αλλά και στο κυτταρόπλασμα προκαλεί καταπόνηση των φυτών γεγονός που συνεπάγεται τόσο τον πρόωρο τραυματισμό όσο και την πρόωρη γήρανση των φύλλων (Munns, 2006). Επιπρόσθετα, αυξημένες συγκεντρώσεις των ιόντων αυτών στο περιβάλλον της ριζόσφαιρας, ενδέχεται να προκαλέσουν αποδιοργάνωση των μεμβρανών.

Σύμφωνα με του Santos et al. (2019), αποτέλεσμα όλων αυτών των επιπτώσεων που αναφέρθηκαν έχουν άμεση επίδραση σε μορφολογικά χαρακτηριστικά των φυτών όπως η περιορισμένη αύξηση των φυτών ως προς το ύψους αλλά και ως προς τη διάμετρο των στελεχών.

Επιπλέον, σύμφωνα με τους Heuvelink et al. (2003), αυξημένες συγκεντρώσεις χλωρίου ανταγωνίζονται τα νιτρικά άλατα και προκαλείται μειωμένη πρόσληψη νερού και άλλων θρεπτικών λόγω των αλλαγών στο Ψ γεγονός που προκαλεί μείωση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας και αύξηση της ξηρής ουσίας των φυτών.

Τέλος, η αλατότητα επιδρά ακόμα και σε φυσιολογικά χαρακτηριστικά και διεργασίες του φυτού όπως η διαδικασία της φωτοσύνθεσης, η οποία σε συνθήκες στρες παρεμποδίζεται (Kougo 2006; Munns et al., 2006; Tarchoune et al., 2012). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η αλατότητα επεμβαίνει στην αφομοίωση του φωτοσυνθετικού διοξειδίου του άνθρακα, αλλά και στη χλωροφύλλη των φύλλων και τελικά επηρεάζει τη λειτουργία του PSII.

Συνεπώς, προκειμένου σε ένα κλειστό ή ημίκλειστο σύστημα υδροπονίας να αποφεύγεται η έκθεση των φυτών σε συνθήκες στρες και να διασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία του, κρίνεται απαραίτητος ο υπολογισμός τόσο του όγκου απορροής που συλλέγεται έπειτα από την τροφοδοσία όσο και η συχνή μέτρηση της EC στο απορρέον θρεπτικό διάλυμα. Αναγκαίος είναι και ο έλεγχος της συχνότητας, αλλά και της δόσης άρδευσης, ώστε αν εμφανιστούν αυξημένες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας τόσο μέσο ανάπτυξης του ριζικού συστήματος της καλλιέργειας όσο και στη δεξαμενή απορροής, να αυξηθεί άμεσα η δόση και η συχνότητα άρδευσης (Pardossi et al., 2006).

## **1.6 Ανοιχτό Υδροπονικό Σύστημα Επάλληλων Καλλιεργειών (Cascade hydroponics) με ανακύκλωση**

Ο όρος ανακύκλωση θρεπτικού διαλύματος στην υδροπονία περιλαμβάνει τη συνεχή επανακυκλοφορία και την επαναχρησιμοποίηση της περίσσειας του θρεπτικού διαλύματος, που αποστραγγίζεται μετά από κάθε κύκλο άρδευσης. Σε ένα ανοιχτό υδροπονικό σύστημα, οι απορροές μίας πρωτεύουσας καλλιέργειας, λιγότερο ανθεκτικής στην υψηλή αλατότητα, συλλέγονται και επιδέχονται μερική διόρθωση

των ποιοτικών ιδιοτήτων του διαλύματος, pH, EC. Έπειτα χρησιμοποιούνται για την υδρολίπανση μίας δευτερεύουσας καλλιέργειας, εμφανώς πιο ανθεκτική στην αλατότητα από την πρωτεύουσα.

Σε ένα σύστημα παρατηρείται ότι από την πρωτεύουσα καλλιέργεια απορρέει το 30-40% της αρχικής άρδευσης, ενώ επίσης παρατηρείται αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των απορροών έπειτα από κάποιες επαναλήψεις. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί πως το απορριφθέν αυτό διάλυμα υστερεί σε φωσφορικά και νιτρικά, κάνοντας έτσι την απόρριψη αυτή πιο βιώσιμη και λιγότερο επιβλαβή για το περιβάλλον σε σχέση με τα ανοιχτά συστήματα. Η παραπάνω δυνατότητα για πολλαπλές καλλιέργειες σε μία καλλιεργητική περίοδο σε συνεργασία με τον έλεγχο του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου, που αποφέρει μικρότερες καλλιεργητικές περιόδους, επιτρέπονται πολλαπλές καλλιέργειες ανά έτος και κατά συνέπεια, υψηλότερες αποδόσεις (Barbosa et al., 2015). Η επιλογή φυτών που εμφανίζουν μέτρια ανθεκτικότητα στην αλατότητα, όπως η καλλιέργεια τομάτας, εμφανίζει θετική επίδραση στη βιωσιμότητα και στην παραγωγικότητα των καλλιεργειών αυτών, επαναχρησιμοποιώντας το ίδιο θρεπτικό. (Pardossi et al., 2006; Massa et al., 2010).

Οι ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες σε ένα υδροπονικό θερμοκήπιο που έχει τη δυνατότητα συνεχής παραγωγής φυτών όλο το χρόνο οδηγούν σε υψηλές αποδόσεις. Οι ιδανικές αυτές συνθήκες συντελούν σε συντόμευση της καλλιεργητικής περιόδου των φυτών, δίνοντας έτσι την ευκαιρία για εφαρμογή πολλαπλών καλλιεργειών ανά έτος καθώς και την ανάπτυξη ενός συστήματος πολυκαλλιέργειας (Barbosa et al., 2015).

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, διερευνήθηκε η αντοχή φυτών βασιλικού σε 4 διαφορετικά επίπεδα αλατότητας, 2, 5, 10 και 15 dS m<sup>-1</sup>. Η απόδοση του βασιλικού στο σύστημα επάλληλων καλλιεργειών έδειξε ότι ο βασιλικός είχε καλή απόδοση ως δευτερεύουσα καλλιέργεια σε υδροπονικά συστήματα cascade με πρωτεύουσα την καλλιέργεια αγγουριού. (Avdouli et al ,2021).

## **1.7 Υδροπονική καλλιέργεια τομάτας**

Μια από τις πιο συνήθεις καλλιέργειες στην Ελλάδα είναι αυτή της τομάτας καταλαμβάνοντας εκτενείς καλλιεργήσιμες εκτάσεις τόσο στον αγρό όσο και σε

υδροπονικές εγκαταστάσεις ενώ ταυτόχρονα είναι πρώτη σε κατανάλωση μεταξύ των λαχανικών (Σάββας, 2009). Σημαντικό θα ήταν να αναφερθεί ότι ακόμα και σε βορειότερες χώρες όπως η Ολλανδία δύνανται να εγκαταστήσουν καλλιέργεια της τομάτας χάρη στην υδροπονική μέθοδο (De Krij, 1995).

Επιπλέον, οι ιδανικές θερμοκρασίες ανάπτυξης για την τομάτα κυμαίνονται από 18 έως 21°C την ημέρα και 16-18°C την νύχτα (Σάββας, 2011). Σύμφωνα με τον Σάββα (2007), ως μέσα ανάπτυξης του ριζικού συστήματος της καλλιέργειας χρησιμοποιούνται ο περλίτης, ο πετροβάμβακας, η ελαφρόπετρα αλλά και ο κόκκος, ωστόσο έχει επιτευχθεί η ανάπτυξη φυτών τομάτας και σε συστήματα επίπλευσης και αεροπονίας (Leoni et al., 1994) αλλά και σε σύστημα Nutrient Film Technique τόσο σε άλλες χώρες (Graves, 1893), όσο και στην Ελλάδα (Οικονομάκης, 2007).

Ο παράγοντας της αλατότητας φαίνεται να έχει μέτρια επίδραση στην καλλιέργεια της τομάτας. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος της καλλιέργειας έχει εύρος από 1.6 έως 5 dS m<sup>-1</sup>. Ενώ σύμφωνα με τους Dorais et al. (2001), η ανώτερη τιμή της EC στη ριζόσφαιρα φυτών τομάτας είναι 12 mmol για τα ιόντα νατρίου και 12 mmol για τα ιόντα χλωρίου. Μέτρια επίπεδα αλατότητας επιδρούν αρνητικά στο υπέργειο μέρος του φυτού, παρά τη ρίζα (Mavrogiannopoulos et al., 2002).

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, όταν η καλλιέργεια τομάτας εκτεθεί σε μέτρια επίπεδα αλατότητας, τότε παρατηρείται μείωση του βάρους των καρπών της (Cuartero and Munoz, 1999). Ωστόσο, αυτή η παρατήρηση έρχεται σε αντιδιαστολή με τα αποτελέσματα των Ehret and Ho (1986), οι οποίοι παρατήρησαν αύξηση στην ξηρά ουσία των φυτών τομάτας, έπειτα από έκθεση σε αντίστοιχα επίπεδα αλατότητας, ενώ σε άλλο πείραμα αναφέρθηκε ότι παρουσιάστηκε βελτίωση της ποιότητας των καρπών (Krauss et al., 2006).

Πιο συγκεκριμένα, καταγράφηκε αύξηση της περιεκτικότητας σε βιταμίνης C αλλά και καροτενοειδών (Petersen et al., 1988; Savvas et al., 2011). Τέλος, καταγράφηκε μείωση της βλαστικής ικανότητας των σπόρων τομάτας αλλά και αύξηση του χρόνου βλάστησης και έκπτυξης (Ayers, 1951).

Η καλλιέργεια της τομάτας σύμφωνα με τους Incrocci et al. (2003), δύναται να αναπτυχθεί σε κλειστό σύστημα πολυκαλλιέργειας αποτελώντας την πρωτεύουσα καλλιέργεια, της οποίας οι απορροές θα χρησιμοποιηθούν με στόχο την άρδευση δευτερευουσών καλλιεργειών, που είναι περισσότερο ανθεκτικές στην αλατότητα.

Τέλος, σε αντίστοιχη έρευνα των Munoz et al. (2012) με ανάπτυξη υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας, όπου οι απορροές της χρησιμοποιήθηκαν για την τροφοδοσία υπαίθριας καλλιέργειας τομάτας, καταγράφηκε περιορισμός στο μισό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ανά kg καρπού.

## 1.8 Υδροπονική καλλιέργεια μαρουλιού

Μια από τις πιο συνηθισμένες θερμοκηπιακές καλλιέργειες είναι αυτή του μαρουλιού. Αυτή, επιλέγεται, εξαιτίας της ποιότητας των λαχανικών εφόσον κατέχουν υψηλή θρεπτική αξία γεγονός που οφείλεται στην αυξημένη συγκέντρωση πληθώρας αντιοξειδωτικών ουσιών όπως το ασκορβικό οξύ αλλά και τα καροτενοειδή (Escobar-Gutierrez et al., 2002).

Σημαντικό θα ήταν να αναφερθεί ότι υπάρχει μεγάλος όγκος βιβλιογραφίας από την επιστημονική κοινότητα σχετικά με την καλλιέργεια του μαρουλιού. Μια ενδιαφέρουσα έρευνα, σχετικά με την καλλιέργεια του μαρουλιού εκτός εδάφους παρουσίασε ενδιαφέροντα αποτελέσματα συγκριτικά με την αντίστοιχη υπαίθρια καλλιέργεια. Η απόδοση της πρώτης ήταν δεκαπλάσια της δεύτερης ενώ παράλληλα σημειώθηκε μείωση των αναγκών των φυτών σε νερό (Barbosa et al., 2015).

Όσον αφορά την ανάπτυξή του σε συνθήκες αλατότητας, χαρακτηρίζεται από μέτρια αντοχή σε αυτόν τον παράγοντα ενώ η απόδοση της καλλιέργειας παρουσιάζει μείωση της τάξης του 13% για κάθε μονάδα αύξησης της αλατότητας (Ayers et al., 1951). Επιπλέον, σύμφωνα με τους De Pascale & Barbieri (1995), το εύρος αλατότητας του νερού δε θα πρέπει να ξεπερνά τα 2.6 dS m<sup>-1</sup> διότι παρατηρήθηκε, μείωση τόσο στην ανάπτυξη όσο και στην απόδοση φυτών μαρουλιού. Σημαντικό θα ήταν να αναφερθεί ότι, οι Bartha et al. (2015), κατέγραψαν σημαντική μείωση του νωπού βάρους πέντε ποικιλιών μαρουλιού έπειτα από την έκθεση τους σε καταπόνηση, λόγω αλατότητας.

Ωστόσο, οι κλιματικοί παράγοντες, όπως η θερμοκρασία αλλά και η ένταση του φωτός, που λαμβάνουν χώρα κατά την έκθεση των φυτών σε στρες αλατότητας συμβάλουν σημαντικά στην επίδραση στα μορφολογικά και ανατομικά χαρακτηριστικά του μαρουλιού (Fernández et al., 2016). Επίσης αξίζει να σημειωθεί πως η βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης του φυτού είναι 15°C. (Dale, 1965) Πράγματι, η υδατική καταπόνηση των φυτών συσχετίζεται έμμεσα με την αύξηση της

θερμοκρασίας (He et al., 2001), ενώ η αλατότητα επηρεάζει τη διαφορά δυναμικού δυσχεραίνοντας την πρόσληψη νερού από το ριζικό σύστημα (Grewal, 2010).

## **2. Σκοπός**

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η μελέτη της επίδρασης διαφορετικών στρατηγικών εφαρμογής θρεπτικού διαλύματος απορροής από την καλλιέργεια τομάτας (κύρια καλλιέργεια) για την κάλυψη των αναγκών μίας καλλιέργειας μαρουλιού (δευτερεύουσα καλλιέργεια). Μελετήθηκαν μορφολογικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά των φυτών μαρουλιού, καθώς και η απόδοση της καλλιέργειας κάτω από διαφορετικές στρατηγικές άρδευσης. Οι διαφορετικές στρατηγικές αφορούσαν τη μίξη του διαλύματος αποστράγγισης και νερού σε σταθερή αναλογία ή μόνο ποσότητα απορροών, με σκοπό την άρδευση της καλλιέργειας μαρουλιού. Επιπροσθέτως, εκτιμήθηκε η στιγμιαία αποτελεσματικότητα χρήσης νερού (WUE), η οποία εκφράστηκε μέσω του λόγου, ρυθμού φωτοσύνθεσης προς διαπνοής.



### 3. Υλικά και Μέθοδοι

#### 3.1 Περιγραφή πειράματος

Το παρόν πείραμα διεξήχθη σε θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις του εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην περιοχή του Βελεστίνου (39° 22', 22° 44', 85 m). Όσον αφορά τη διάρκεια του πειράματος, ξεκίνησε τον Μάρτιο και ολοκληρώθηκε τον Μάιο του έτους 2019. Ωστόσο, πραγματοποιήθηκε και μια επαναληπτική εφαρμογή του πειράματος από τον Ιούλιο έως και τον Αύγουστο του ίδιου έτους.

Η εγκατάσταση του πειράματος πραγματοποιήθηκε σε θερμοκήπιο γοθτικού τύπου με υλικό κάλυψης το πολυαιθυλένιο, το οποίο είχε 6 θαλάμους διαστάσεων 25m μήκος, 9.6m πλάτος και 7.4m ύψος έκαστος. Σημαντικό θα ήταν να αναφερθεί ότι κάθε θάλαμος ήταν εξοπλισμένος με αυτοματοποιημένο σύστημα δροσισμού, που περιελάμβανε άνοιγμα παραθύρων οροφής, υγρή παρειά και ανεμιστήρα ενώ, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα ελέγχονταν αυτόματα με αισθητήρες ελέγχου κλίματος, θερμοκρασίας σε °C, σχετικής υγρασίας σε % (Sercom, The Netherlands) (Εικόνα 3). Επιπλέον, στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις υπήρχε μετεωρολογικός σταθμός για την μέτρηση εξωτερικών περιβαλλοντικών παραγόντων, θερμοκρασίας (°C), σχετικής υγρασίας (%) και συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας ημέρας ( $J\ cm^{-2}\ day^{-1}$ ). Τα δεδομένα τόσο των αισθητήρων όσο και του σταθμού καταγράφονταν ανα 15min καθ' όλη τη διάρκεια ημέρας – νύχτας.



**Εικόνα 3.** Θάλαμος εγκατάστασης πειράματος.

Η παρούσα έρευνα αφορούσε την ταυτόχρονη υδροπονική καλλιέργεια φυτών τομάτας, μαρουλιού και σπανακιού οι οποίες ήταν κατανεμημένες σε 4 θαλάμους του θερμοκηπίου που αναφέρθηκε συνολικής έκτασης 960 m<sup>2</sup>. Πιο συγκεκριμένα, στους δυο πρώτους θαλάμους εγκαταστάθηκε η πρωτεύουσα καλλιέργεια φυτών τομάτας ενώ οι άλλοι δυο χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των δευτερευουσών καλλιεργειών, μαρουλιού και σπανακιού αντίστοιχα. Κύριος στόχος του πειράματος ήταν η αξιοποίηση του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος της πρωτεύουσας καλλιέργειας (τομάτας) από τις δευτερεύοντες. Τέλος, σημαντικό θα ήταν να αναφερθεί ότι η παρούσα διατριβή διερεύνησε το συνδυασμό τομάτας-μαρουλιού, σ' ένα ανοιχτό υδροπονικό σύστημα διαδοχικών καλλιεργειών.

Στον Πίνακα 1, παρουσιάζονται η μέση τιμή της θερμοκρασίας  $T$  (°C), της σχετικής υγρασίας RH (%) και της ημερήσιας συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας ( $J\ cm^{-2}\ d^{-1}$ ) του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια των δυο καλλιεργητικών περιόδων.

**Πίνακας 1.** Μέση τιμή της θερμοκρασίας (°C), της σχετικής υγρασίας (%) και της ημερήσιας συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας ( $J\ cm^{-2}\ d^{-1}$ ) του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου.

Κλιματικοί παράγοντες	Θερμοκρασία (°C)	Σχετική Υγρασία (%)	Ημερήσια συνολική ηλιακή ακτινοβολία ( $J\ cm^{-2}\ d^{-1}$ )	Θερμοκρασία (°C)	Σχετική Υγρασία (%)	Θερμοκρασία (°C)	Σχετική Υγρασία (%)
	Εξωτερική	Εξωτερική	Εξωτερική	Πρωτεύουσα καλλιέργεια	Πρωτεύουσα καλλιέργεια	Δευτερεύουσα καλλιέργεια	Δευτερεύουσα καλλιέργεια
<b>1η Καλλιεργητική περίοδος</b>							
Μέση τιμή ημέρας	20	54	2042	21	63	22	55
Μέση τιμή νύχτας	13	75		15	77	15	72
<b>2η Καλλιεργητική περίοδος</b>							
Μέση τιμή ημέρας	32	43	1907	24	83	26	63
Μέση τιμή νύχτας	24	63		22	82	24	65

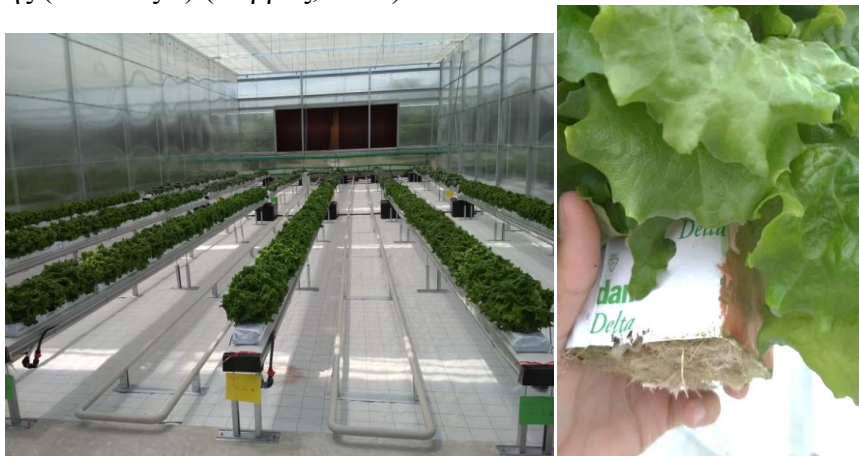
### 3.2 Καλλιέργειες

Στους πρώτους θαλάμους του θερμοκηπίου όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αναπτύχθηκαν φυτά τομάτας (*Solanum lycopersicum*, cv. Elpida) είτε σε κύβους πετροβάμβακα (Grodan Plantop, NL) οι οποίοι τοποθετήθηκαν πάνω σε σάκους του ίδιου υποστρώματος (Grodan Classic MY, NL), είτε απευθείας σε σάκους περλίτη (Hydroperl 33L, NORDIAAGRO, Athens, Greece). Στον καθένα από τους δύο θαλάμους της πρωτεύουσας καλλιέργειας υπήρχαν 6 κανάλια των 20m το καθένα, ενώ πάνω τους τοποθετήθηκαν κατ' εναλλαγή 19 σάκοι από το κάθε υπόστρωμα

(πετροβάμβακα, περλίτη). Κάθε σάκος έφερε 3 φυτά τομάτας με τον συνολικό αριθμό φυτών στους δύο θαλάμους να ανέρχεται στα 684 (3 φυτά ανά m<sup>2</sup>). Η τροφοδοσία του θρεπτικού διαλύματος πραγματοποιήθηκε με στάγδην άρδευση χρησιμοποιώντας 1111 σταλάκτες και για τους δύο τύπους υποστρώματος.

Στους υπόλοιπους θαλάμους, αναπτύχθηκαν οι δυο δευτερεύουσες καλλιέργειες με μέσο ανάπτυξης τον πετροβάμβακα. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά το μαρούλι (*Lactuca sativa*) και το σπανάκι (*Spinacia oleracea*), αναπτύχθηκαν κατά την διάρκεια και των δύο πειραματικών επαναλήψεων σε κύβους πετροβάμβακα (Grodan Delta, NL), οι οποίοι βρισκόταν πάνω σε σάκους του ίδιου υποστρώματος (Grodan Classic MY, NL) (Εικόνα 4).

Οι σάκοι αυτοί τοποθετήθηκαν στα υδροπονικά κανάλια τα οποία είχαν χωριστεί στη μέση με σκοπό να γίνει δυνατή η στέγαση και των δυο καλλιεργειών στον ίδιο θάλαμο. Έτσι, για κάθε δευτερεύουσα καλλιέργεια δημιουργήθηκαν 6 κανάλια των 10 m αντίστοιχα σε κάθε θάλαμο. Επιπλέον, κάθε υδροπονικό κανάλι αποτελούνταν από 9 σάκους πετροβάμβακα, ενώ σε κάθε υπόστρωμα αντιστοιχούσαν 4 φυτά, αξιοποιώντας συνολικά 864 φυτά μαρουλιού και σπανακιού (Εικόνα 4). Το θρεπτικό διάλυμα παρέχονταν στα φυτά και των δυο καλλιεργειών με στάγδην άρδευση χρησιμοποιώντας 1083 σταλάκτες, στο σύνολο των δυο θαλάμων. Σημαντικό θα ήταν να αναφερθεί ότι, πριν την έναρξη του πειράματος, τόσο στην πρωτεύουσα καλλιέργεια όσο και στις δευτερεύουσες, πραγματοποιήθηκε διαβροχή των υποστρωμάτων με θρεπτικό διάλυμα, σύμφωνα με την συνταγή που επιλέχθηκε για την κάθε καλλιέργεια έως και το σημείο κορεσμού, ενώ συνεχίστηκε η παρατήρηση του για τυχόν συμπλήρωση θρεπτικού διαλύματος σε περίπτωση εξάτμισης (Πίνακας 2) (Σάββας, 2011).



**Εικόνα 4.** Εγκατάσταση καλλιέργειας μαρουλιού και σπανακιού σε υδροπονικό σύστημα στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις του Βελεστίνου.

**Πίνακας 2.** Ποσοτική και ποιοτική χημική ανάλυση του νερού της γεώτρησης στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου. Χημική σύσταση του διαλύματος τροφοδοσίας για την καλλιέργεια τομάτας και μαρουλιού. Οι συγκεντρώσεις των μακροστοιχείων εκφράζονται σε mmol L<sup>-1</sup> και των ιχνοστοιχείων σε μmol L<sup>-1</sup>. Η EC εκφράζεται σε dS m<sup>-1</sup> και το pH του διαλύματος σε σταθερή τιμή, 5.6.

Συγκεντρώσεις στοιχείων	Χημική ανάλυση νερού	Συνταγή τομάτας	Συνταγή μαρουλιού
<b>mmol L<sup>-1</sup></b>			
[K <sup>+</sup> ]	0	7.0	8.0
[Ca <sup>2+</sup> ]	1.4	3.3	4.8
[Mg <sup>2+</sup> ]	1.6	1.4	1.9
[Na <sup>+</sup> ]	1.1	1.1	1.1
[NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ]	0	1.1	1.4
[NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	0.1	12.2	12.9
[H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ]	0	1.5	1.1
<b>μmol L<sup>-1</sup></b>			
[Fe]	0	15	15
[Mn]	1.3	8.7	2.9
[Zn]	1.2	3.8	2.8
[Cu]	0	0.8	0.8
[B]	0	30	30
[Mo]	0	0.5	0.5
EC	<b>0.7</b>	<b>1.9</b>	<b>2.4</b>
pH	<b>5.6</b>	<b>5.6</b>	<b>5.6</b>

### 3.3 Σύστημα υδρολίπανσης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κύριος στόχος της παρούσας έρευνας ήταν η επαναχρησιμοποίηση των απορροών της πρωτεύουσας καλλιέργειας (καλλιέργεια τομάτας) για την τροφοδοσία δευτερευουσών καλλιεργειών (καλλιέργεια μαρουλιού και σπανακιού). Αυτό επιτεύχθηκε με τη χρήση ενός αυτοματοποιημένου συστήματος υδρολίπανσης το οποίο αποτελούταν από το σύστημα ανάμειξης, άρδευσης, επαναχρησιμοποίησης και απολύμανσης του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος.

Προκειμένου να προετοιμαστεί το θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας απαιτήθηκαν η άντληση των πυκνών διαλυμάτων, με χρήση σε σειρά ηλεκτρομαγνητικών δοσομετρικών αντλιών συνεχούς ροής, για τη δοσομέτρηση των πυκνών διαλυμάτων και τη ρύθμιση της παροχής του πυκνού διαλύματος. Επιπρόσθετα, περιλαμβάνονταν και η ανάμιξη με νερό άρδευσης από συστήματα με απευθείας παροχή.

Ο έλεγχος και η ορθή λειτουργία του υδροπονικού συστήματος γινόταν μέσω αυτόματου συστήματος ελέγχου (κεφαλή υδροπονίας). Η λειτουργία της κεφαλής ήταν α) να ελέγχει την σύσταση του (pH, EC), β) να διορθώνει την σύστασή του σε περιπτώσεις εκτροπών και γ) να πραγματοποιεί τις αρδεύσεις στους επιλεγμένους χρόνους κατά την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος.

Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα ανάμειξης των λιπασμάτων απαρτίζονταν από πέντε δεξαμενές μητρικών διαλυμάτων, αλλά και μια δεξαμενή όπου θα αποθηκεύεται το νιτρικό οξύ που χρησιμοποιήθηκε για τη ρύθμιση του pH. Η αναλογία νερού και πυκνών διαλυμάτων ήταν προκαθορισμένη στο δοχείο αναμείξεως ενώ η αναλογία αραιώσεως των πυκνών διαλυμάτων ήταν σταθερή 1:100.

Η κάθε μία από τις δεξαμενές αυτές βρίσκονταν σε σύνδεση με μία από τις πέντε αντλίες έγχυσης στην κεφαλή υδρολίπανσης, το δοσομετρητή νερού, το σύστημα απολύμανσης μέσω φίλτρων UV (υπεριώδους ακτινοβολίας). Το σύστημα UV λάμπας υπεριώδους ακτινοβολίας από ανοξείδωτο χάλυβα απολύμανε και μείωνε τον πληθυσμό των παθογόνων βακτηρίων.

Επιπλέον, το υδροπονικό σύστημα περιελάμβανε όργανα, όπως αισθητήρες pH και ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), οι οποίοι με την σειρά τους συνδεόταν με τη δεξαμενή ανάδευσης, με βαθμονόμηση τους, με γνωστά ρυθμικά διαλύματα, πριν τη λειτουργία τους.

Ωστόσο, το σημαντικότερο ρόλο του συστήματος παίζει η κεφαλή υδρολίπανσης (500L) που είναι υπεύθυνη για την παραγωγή και την ανάμιξη του θρεπτικού διαλύματος με στόχο την τροφοδοσία των φυτών με θρεπτικά συστατικά και νερό. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν πυκνά διαλύματα που αποθηκεύτηκαν σε τέσσερις διαφορετικές δεξαμενές (100L), από τις οποίες δύο προορίζονταν για κάθε καλλιέργεια, καθώς και μια δεξαμενή αποθήκευσης του πυκνού διαλύματος με νιτρικό οξύ, απαραίτητου για τη ρύθμιση του pH του θρεπτικού διαλύματος.

Η πρώτη δεξαμενή περιλάμβανε τα λιπάσματα που περιέχουν  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$  και το χηλικό σίδηρο, ενώ η δεύτερη δεξαμενή τα λιπάσματα που περιέχουν θειικά και φωσφορικά άλατα για αποφυγή σχηματισμού ιζήματος, λόγω της χαμηλής διαλυτότητας του  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  και  $\text{CaSO}_4$ . Το τελικό θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας παρασκευαζόταν μετά από ανάμιξη ίσης ποσότητας θρεπτικών διαλυμάτων από κάθε δεξαμενή με οξέα και νερό.

Έπειτα από την παρασκευή του διαλύματος τροφοδοσίας, αυτό μεταφερόταν μέσω σωλήνων στον αντίστοιχο θάλαμο για τον οποίο προοριζόταν όπου και συνδεόταν με σταλακτηφόρο σωλήνα (φ20). Εκεί, μέσω των σταλακτών, οι οποίοι συνδέονται με σωλήνες, (φ7) (σπαγγέτι) και λόγγες, κατέληγε στο εσωτερικό του υποστρώματος όπου αναπτυσσόταν το ριζικό σύστημα του φυτού με παροχή  $4\text{L h}^{-1}$ .

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η ποσότητα και η συχνότητα της άρδευσης καθοριζότανε με βάση το ποσοστό απορροής της κάθε μεταχείρισης, μεγαλύτερο ή ίσο του 25-30%. Κάθε κύκλος άρδευσης παρείχε την απαραίτητη ποσότητα θρεπτικού διαλύματος μαζί με μια επιπλέον ποσότητα (20-30%), για την αποφυγή υπερβολικής συγκέντρωσης αλάτων.

Επιπρόσθετα, προκειμένου να αποθηκευτεί το θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας έγινε χρήση 8 δεξαμενών πολυαιθυλενίου χωρητικότητας 500L η κάθε μία. Ακόμη, χρησιμοποιήθηκαν 4 δεξαμενές (300L) όπου γινόταν η συλλογή των απορροών της κύριας καλλιέργειας (2 για τις απορροές των φυτών που καλλιεργούνταν στο υπόστρωμα του πετροβάμβακα και 2 για το υπόστρωμα του περλίτη). Επίσης, 4 δεξαμενές των 300L, μία για κάθε μεταχείριση, χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή των απορροών της δευτερεύουσας καλλιέργειας.

Η όλη διαδικασία της υδρολίπανσης πραγματοποιούνταν αυτομάτως αξιοποιώντας τους αισθητήρες παρακολούθησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και του pH, του απορρέοντος διαλύματος άρδευσης. Όταν το θρεπτικό διάλυμα έφερε τιμές EC και pH, εντός του προκαθορισμένου εύρους, πού είχε οριστεί από τον χειρίστη, αποθηκεύονταν προσωρινά, ανάλογα την καλλιέργεια για την οποία προοριζόταν, σε μία εκ των 8 δεξαμενών θρεπτικού διαλύματος έως ότου προκύψει η ανάγκη για άρδευση-λίπανση. Η άρδευση πραγματοποιούνταν αυτόματα ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες από 10-13 φορές την ημέρα, από τις 7:00 μέχρι τις 17:00.

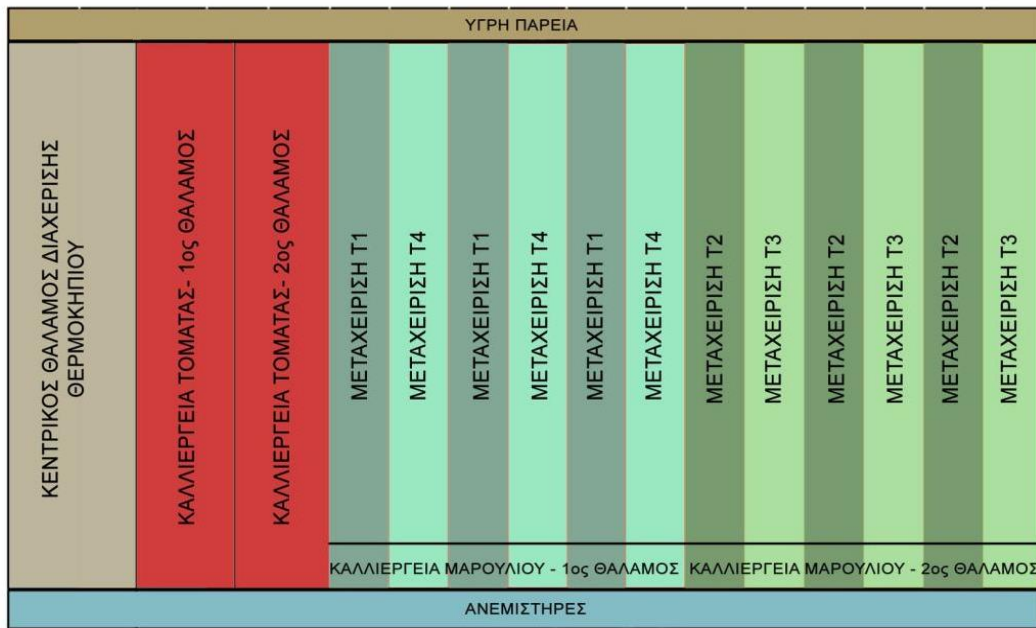
### 3.4 Μεταχειρίσεις

Για την εφαρμογή του ανοιχτού υδροπονικού συστήματος με στατική ανακυκλοφορία των απορροών της πρωτεύουσας καλλιέργειας για τις αρδευτικές ανάγκες της δευτερεύουσας, πραγματοποιήθηκαν 4 μεταχειρίσεις με 3 επαναλήψεις. Συνολικά 12 γραμμές φύτευσης μαρουλιού. Τα φυτά της πρώτης μεταχείρισης που αποτελούσαν το μάρτυρα του πειράματος αρδεύονταν με πρότυπο διάλυμα τροφοδοσίας μαρουλιού βάση της συνταγής που παρουσιάζεται από τον (Πίνακας 1).

Οι τρεις μεταχειρίσεις υδρολίπανσης που εφαρμόστηκαν στη δευτερεύουσα καλλιέργεια πραγματοποιούνταν με ανάμιξη σταθερής αναλογίας ποσοστού απορροών (D) και νερού (W) ή μόνο καθαρές απορροές. Η απολύμανση της επανακυκλοφορίας, για την αποφυγή μολύνσεων του ριζικού συστήματος ήταν αναγκαία και συνεπώς, η ποσότητα των απορροών μεταφερόταν μέσω δικτύου στο σύστημα απολύμανσης. Παρακάτω περιγράφονται οι 4 μεταχειρίσεις:

- T1:0% D: Πρότυπο διάλυμα τροφοδοσίας καλλιέργειας μαρουλιού
- T2:50%D: Ανάμιξη 50% διαλύματος απορροής της κύριας καλλιέργειας με 50% W
- T3:75%D: Ανάμιξη 75% διαλύματος απορροής της κύριας καλλιέργειας με 25% W
- T4:100%D: 100% διάλυμα απορροών της κύριας καλλιέργειας χωρίς προσθήκη νερού





**Εικόνα 5.** Κάτοψη θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων και θέσης καλλιεργειών εντός του θερμοκηπίου. Διάταξη στο χώρο των μεταχειρίσεων και επαναλήψεων της καλλιέργειας μαρουλιού. Σύστημα δροσισμού, θέση πάνελ υγρής παρειάς- ανεμιστήρων.

### 3.5 Μετρήσεις

#### 3.5.1 Αριθμός φύλλων Εμβαδό Επιφάνειας φυτών Ύψος

Καθ' όλη την εκπόνηση και των δύο πειραμάτων, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αριθμού φύλλων, εμβαδού επιφάνειας και ύψους ανά τακτά χρονικά διαστήματα της τάξεως των 1-2 φορές την εβδομάδα για την καλλιέργεια του μαρουλιού. Οι μετρήσεις του εμβαδού επιφάνειας και του ύψους των φυτών πραγματοποιούνταν με μία μεζούρα (σε cm) ενώ ο αριθμός των φύλλων με απλό μέτρημα, χειρωνακτικά. Η μέτρηση του ύψους γινόταν με χαρτοταινία του 1 μέτρου για αποφυγή τραυμάτων στα φυτά από μεταλλική μεζούρα. Σαν ύψος ορίστηκε το σημείο έκπτυξης του φυτού από το υπόστρωμα μέχρι το ανώτερο σημείο του κορυφαίου βλαστού. Οι μετρήσεις λαμβανόταν από 10 φυτά ανά επανάληψη. Συνολικά, 30 μετρήσεις για κάθε μεταχείριση.

Στο πρώτο πείραμα οι μετρήσεις ξεκίνησαν στις 23 Απριλίου και ολοκληρώθηκαν στις 20 Μαΐου με συχνότητα περίπου 5 ημέρες για το ύψος. Σε αυτό το διάστημα πραγματοποιήθηκαν συνολικά 5 σετ μετρήσεων. Οι μετρήσεις φύλλων

ξεκίνησαν στις 23 Απριλίου και ολοκληρώθηκαν στις 6 Μαΐου με συνολικά 3 σετ μετρήσεων. Αυτό έγινε για αποφυγή τραυματισμού του φυτού κατά την μέτρηση λόγω έντονου φυλλώματος. Έπειτα, καταγράφηκαν τιμές εμβαδού επιφάνειας στις 16 και 20 Μαΐου. Οι μετρήσεις του δεύτερου πειράματος ξεκίνησαν στις 22 Ιουλίου και σταμάτησαν στις 12 Αυγούστου με συνολικά 7 σετ μετρήσεων για το ύψος και τον αριθμό φύλλων. Οι μετρήσεις του εμβαδού επιφάνειας ξεκίνησαν από τις 29 Ιουλίου και ολοκληρώθηκαν στις 12 Αυγούστου με 5 σετ μετρήσεων.

### 3.5.2 Χλωροφύλλη

Για την ολική χλωροφύλλη ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) χρησιμοποιήθηκε το όργανο τύπου SPAD (502-PLUS, Konica Minolta, Japan) με την κάθε καταγεγραμμένη τιμή να αποτελεί το μέσο όρο τριών μετρήσεων στο ίδιο φυτό προς αποφυγή λήψης αναξιόπιστων αποτελεσμάτων. Η βαθμονόμηση του οργάνου γινόταν κάθε φορά πριν την έναρξη λήψεων των μετρήσεων, σύμφωνα με οδηγίες εγχειριδίου του κατασκευαστή, και οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν κατά τις πρωινές ώρες.

Οι μετρήσεις, λαμβανόταν από 5 σημεία του φυτού, αλλά σταθερά φυτά και όχι από όλα τα φυτά της εκάστοτε μεταχείρισης, με αποτέλεσμα να έχουμε 30 μετρήσεις για κάθε μεταχείριση. Ο αισθητήρας ερχόταν σε επαφή με τα φύλλα χωρίς να προκαλείται κάποια φθορά. Στη συνέχεια γινόταν η εξαγωγή του μέσου όρου των 5 μετρήσεων του κάθε φυτού κατευθείαν από το όργανο τύπου SPAD, για την απόκτηση τιμής συγκέντρωσης χλωροφύλλης μειωμένου σφάλματος. Τα φύλλα που επιλέχθηκαν ήταν μεγάλα, όσο το δυνατόν πιο υγιή και ώριμα. Τα φυτά που επιλέχθηκαν για την μέτρηση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης είχαν μαρκαριστεί με κόκκινη κορδέλα για να ξεχωρίζουν, αφού χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια για όλες τις μετρήσεις.

Στο πρώτο πείραμα οι μετρήσεις ξεκίνησαν στις 23 Απριλίου και ολοκληρώθηκαν στις 21 Μαΐου με συχνότητα περίπου 4 ημέρες. Σε αυτό το διάστημα πραγματοποιήθηκαν συνολικά 7 σετ μετρήσεων. Οι μετρήσεις του δεύτερου πειράματος ξεκίνησαν στις 22 Ιουλίου και σταμάτησαν στις 12 Αυγούστου με συνολικά 7 σετ μετρήσεων, αντίστοιχα.

### 3.5.3 Ρυθμός Φωτοσύνθεσης και Διαπνοής

Για τις μετρήσεις του ρυθμού φωτοσύνθεσης και διαπνοής χρησιμοποιήθηκε το όργανο LCpro+ 1.0 ADC, Bioscientific Ltd., Hoddesdon, Hertfordshire, UK. Ο ρυθμός φωτοσύνθεσης ο οποίος μετριέται σε A ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), είναι ο ρυθμός ανταλλαγής  $\text{CO}_2$  του φύλλου και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$A=U_s*\Delta_c$$

- $U_s$  η συνολική ροή αέρα για κάθε  $\text{m}^2$  φυλλικής επιφάνειας σε  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- $\Delta_c$  η διαφορά συγκέντρωσης του  $\text{CO}_2$ .

Η διαπνοή (E) σε  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , είναι μια φυσιολογική διεργασία των φυτών, όπου το νερό που βρίσκεται στους ιστούς και αποβάλλεται υπό μορφή υδρατμών. Οι μετρήσεις λαμβανόταν από 5 τυχαία φύλλα του φυτού σε κάθε επανάληψη, 15 μετρήσεις για κάθε μεταχείριση. Πραγματοποιήθηκαν σχετικά λιγότερες σε αριθμό μετρήσεις της φωτοσύνθεσης συγκριτικά με τις υπόλοιπες μετρήσεις και αυτό οφείλεται στις νεφελώδεις κλιματικές συνθήκες, που επικρατούσαν τις ημέρες που είχαν οριστεί να λαμβάνονται οι μετρήσεις.

Η αποδοτικότητα χρήσης νερού εκφράστηκε με το δείκτη water use efficiency (WUE) και υπολογίστηκε ως το πηλίκο του ρυθμού φωτοσύνθεσης προς το ρυθμό διαπνοής σε  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}/\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

Στο πρώτο πείραμα οι μετρήσεις ξεκίνησαν στις 3 Μαΐου και ολοκληρώθηκαν στις 24 Μαΐου με συχνότητα περίπου 4 ημέρες. Σε αυτό το διάστημα πραγματοποιήθηκαν συνολικά 7 σετ μετρήσεων.

Οι μετρήσεις του δεύτερου πειράματος ξεκίνησαν στις 25 Ιουλίου και σταμάτησαν στις 12 Αυγούστου με συνολικά 6 σετ μετρήσεων, αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν, όταν η συνολική ημερήσια εξωτερική ηλιακή ακτινοβολία ήταν στην τιμή  $77 \text{ J cm}^{-2}$ , σύμφωνα με δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού.

Τα δεδομένα των παραμέτρων φωτοσύνθεσης, όπως καταγραφόταν από το όργανο LCpro + 1.0 ADC, αποθηκεύονταν σε δισκέτα, ως αρχείο CSV.

### 3.5.4 Νωπό – Ξηρό Βάρος

Και στις δύο καλλιεργητικές περιόδους πραγματοποιήθηκαν δύο συγκομιδές φυτών για την μελέτη ανάπτυξης της καλλιέργειας. Στις συγκομιδές αυτές επιλέχθηκαν τυχαία 9 φυτά ανά μεταχείριση, δηλαδή 36 φυτά συνολικά, χωρίς την επιλογή των φυτών του πρώτου και τελευταίου σάκου. Κατά την πρώτη καλλιεργητική περίοδο αυτές οι συγκομιδές συνέβησαν 15 και 29 ημέρες μετά τη μεταφύτευση (Days After Transplantation, DAT) αντίστοιχα, ενώ για την δεύτερη καλλιεργητική περίοδο, 18 και 25 ημέρες μετά τη μεταφύτευση τους στους θαλάμους. Τα φυτά, αμέσως μετά την συλλογή τους, τοποθετήθηκαν άμεσα σε χάρτινες σακούλες, για υπολογισμό του χλωρού βάρους ανά φυτού χωρίς να υπάρξουν απώλειες υγρασίας. Όλες αυτές οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση ψηφιακής ζυγαριάς ανώτατου βάρους 45 κιλών και με υποδιαίρεση, 1 γραμμαρίου. Στην συνέχεια μεταφέρθηκαν σε φούρνο ξήρανσης (Raypa®) στους 70°C για τρεις ημέρες έως τη σταθεροποίηση του ξηρού βάρους τους. Έπειτα, μετρήθηκε το ξηρό βάρος των φυτών και πάλι σε ζυγαριά ακριβείας (Kern PCB), με ικανότητα ζύγισης 0.1 - 500gr και με ακρίβεια 0.001g.

### 3.6 Στατιστική ανάλυση

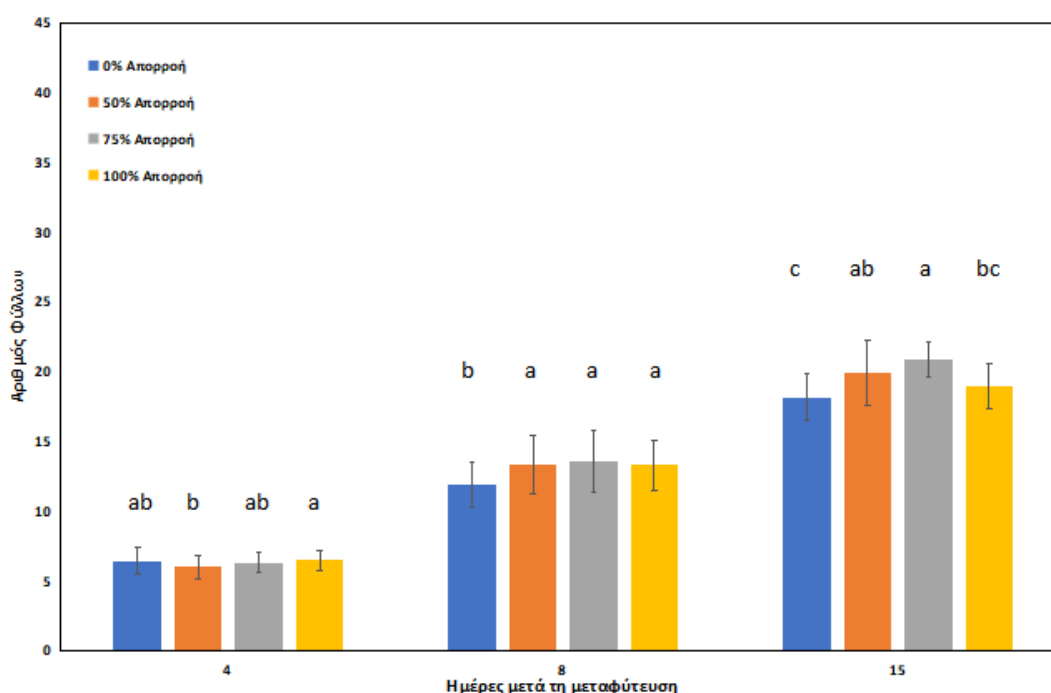
Η στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων που καταγράφηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν με χρήση του προγράμματος SPSS (Statistical Package for the Social Sciences, IBM, USA). Πιο συγκεκριμένα έγινε εφαρμογή της one-way ANOVA σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ( $p < 0.05$ ), και για τον εντοπισμό των διαφορών εφαρμόστηκε το κριτήριο Duncan σε επίπεδο σημαντικότητας 5%. ενώ ταυτόχρονα για τον προσδιορισμό της μεταβλητότητας των ληφθέντων μετρήσεων υπολογίστηκε το τυπικό σφάλμα ή η τυπική απόκλιση των τιμών.

## 4. Αποτελέσματα

### 4.1 Αριθμός φύλλων

#### 4.1.1 Πρώτη καλλιεργητική περίοδος

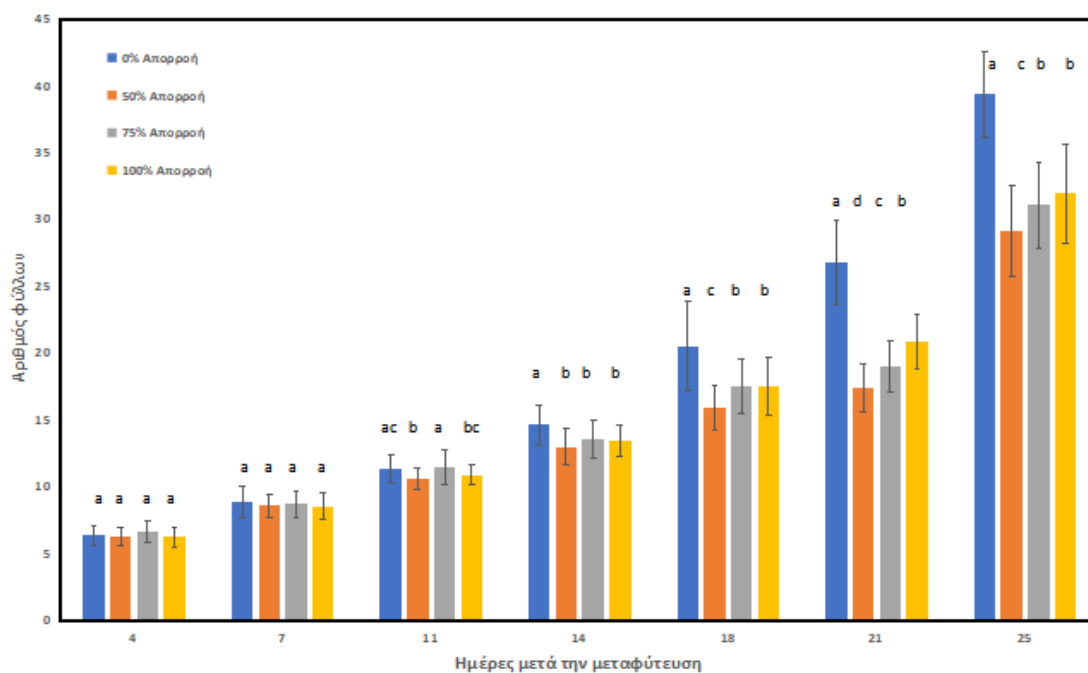
Στο Γράφημα 1, παρουσιάζεται η μεταβολή του μέσου όρου, του αριθμού φύλλων και για τις τρεις ημερομηνίες δειγματοληψιών και πως αυτό επηρεάζεται από τα διαφοροποιημένα θρεπτικά διαλύματα. Παρατηρείται σταδιακή αύξηση του αριθμού των φύλλων με στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε κάθε δειγματοληψία. Ωστόσο με το πέρας των ημερών, (8 DAT), παρατηρείται ότι ο μάρτυρας παρουσίασε το μικρότερο αριθμό φύλλων (18) σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Η μεταχείριση ανάμιξης 75% απορροή και 25% νερό, παρουσίασε μεγαλύτερο αριθμό φύλλων (21) σε σύγκριση με τις υπόλοιπες, κατά την 15<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος. Δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στις τιμές του μάρτυρα και των ολικών απορροών.



**Γράφημα 1.** Αριθμός φύλλων (Μέσος Όρος ± STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου. Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (για sig<0.05). Με a εκφράζεται η μεγαλύτερη τιμή.

#### 4.1.2 Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος

Όπως παρατηρείται στο Γράφημα 2, ο αριθμός των φύλλων της καλλιέργειας μαρουλιού στην δεύτερη επανάληψη του πειράματος αυξήθηκε με σταθερό ρυθμό κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας. Ωστόσο, δεν παρουσίασε παρόμοια εικόνα με αυτή της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου μεταξύ των μεταχειρίσεων. Πιο συγκεκριμένα, κατά τις δύο πρώτες μετρήσεις δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά, ενώ από την αμέσως επόμενη μέχρι και τη συγκομιδή, καταγράφηκε μια αύξηση στον αριθμό των φύλλων ανά φυτό του μάρτυρα συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Στο Γράφημα 2 διακρίνουμε την εξέλιξη των μέσων όρων του αριθμού των φύλλων στην μεταχείριση του προτύπου θρεπτικού διαλύματος να διαφέρει διέφερε στατιστικά σημαντικά από τις άλλες μεταχειρίσεις, κατά την χρονική περίοδο, 14 DAT έως 25 DAT. Στο τέλος της συγκομιδής, 25 DAT, ο μέγιστος αριθμός φύλλων (39) παρατηρήθηκε στη μεταχείριση του μάρτυρα. Η μέγιστη μεταβολή υπολογίστηκε 26%, μεταξύ του μάρτυρα και της μεταχείρισης των ολικών απορροών από την τομάτα. Συμπερασματικά, ο μέγιστος αριθμός φύλλων ανά φυτό εκπύχθηκε στη μεταχείριση του μάρτυρα, όπου υπερέχει έναντι των δύο άλλων μεταχειρίσεων ανάμιξης. Στη συνέχεια, ακολουθεί η μεταχείριση των καθαρών απορροών, (100% απορροή), με την ανάπτυξη 29 υγιών φύλλων μαρουλιού, που προκύπτει ως μέση τιμή των 9 φυτών δειγμάτων.



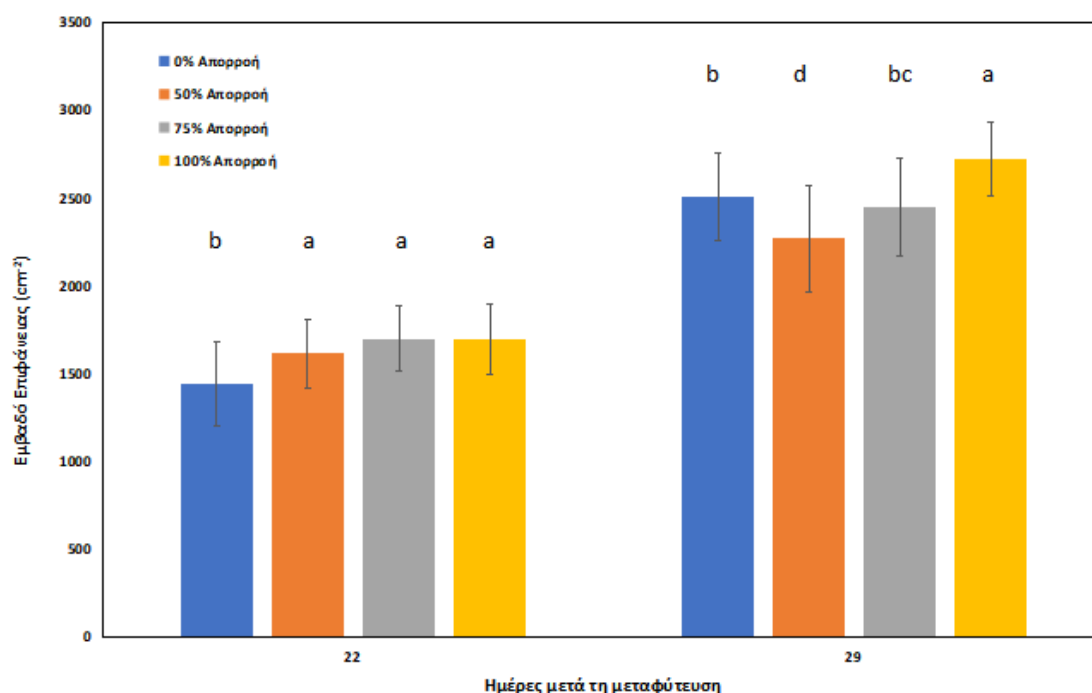
**Γράφημα 2.** Αριθμός φύλλων (Μέσος Όρος ± STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου. Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (για sig<0.05). Με a εκφράζεται η μεγαλύτερη τιμή.

## 4.2 Εμβαδό επιφάνειας

### 4.2.1 Πρώτη καλλιεργητική περίοδος

Στο παρακάτω Γράφημα 3 παρουσιάζεται το εμβαδό επιφάνειας των φυτών όλων των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου του μαρουλιού. Σημαντικό θα ήταν να αναφερθεί ότι στην πρώτη καλλιεργητική περίοδο μετρήθηκαν δύο μετρήσεις, κατά την 22<sup>η</sup> και 29<sup>η</sup> ημέρα μετά την μεταφύτευση. Το βάρος της κεφαλής του μαρουλιού είχε αποκτήσει εμπορικό μέγεθος, 500g και επιπλέον, μακροσκοπικά δεν ήταν εμφανής η τραχύτητα των φύλλων.

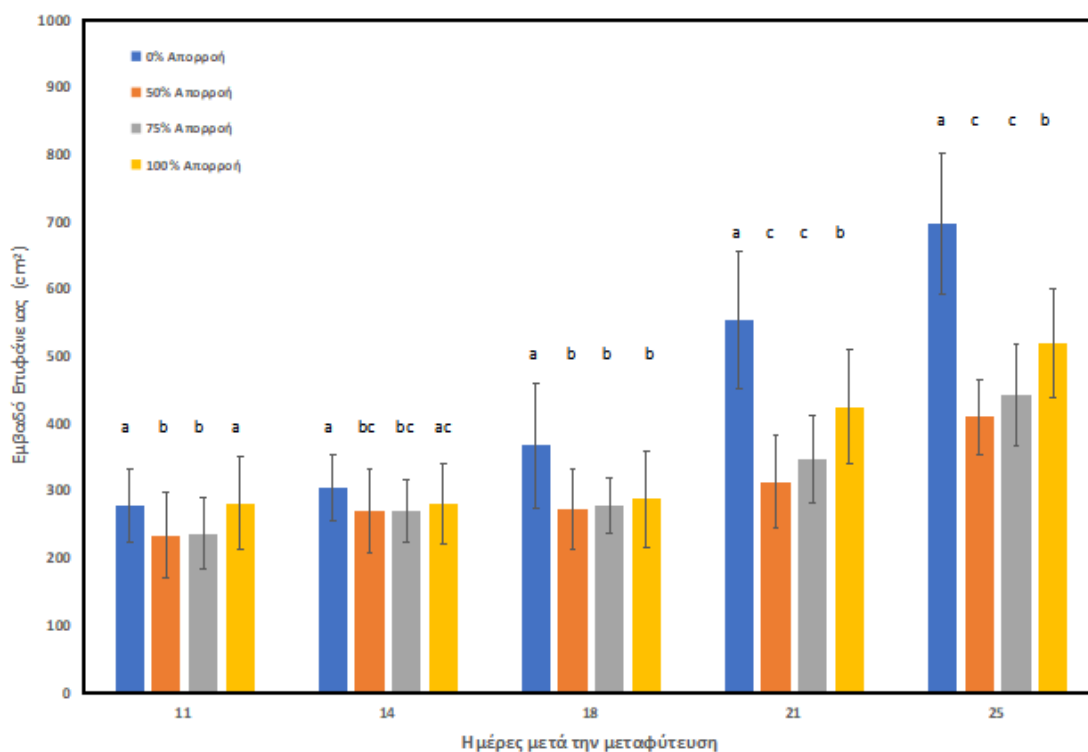
Σύμφωνα με το Γράφημα 3, παρατηρήθηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Ιδιαίτερα, τα φυτά του μάρτυρα κατά την πρώτη μέτρηση να παρουσιάζουν μικρότερο εμβαδόν επιφάνειας συγκριτικά με τις άλλες μεταχειρίσεις. Στην επόμενη μέτρηση, τα φυτά που αρδεύονταν με 100% απορροή από την πρωτεύουσα καλλιέργεια είχαν μεγαλύτερο εμβαδό φύλλων κατά 8% από εκείνα του μάρτυρα.



**Γράφημα 3.** Εμβαδό επιφάνειας (Μέσος Όρος ± STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου. Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (για sig<0.05). Με a εκφράζεται η μεγαλύτερη τιμή.

#### 4.2.2 Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος

Αρχικά θα πρέπει να αναφερθεί ότι, στη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν πιο νωρίς, από 11 DAT έως ημέρα συγκομιδής, συγκριτικά της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου. Σύμφωνα με τα δεδομένα που παρουσιάζονται στο παρακάτω Γράφημα 4, παρατηρείται μια συνεχής αυξητική τάση του εμβαδού επιφάνειας του μάρτυρα από την πρώτη μέτρηση μέχρι και τη συγκομιδή. Στατιστικά σημαντικές διαφορές παρατηρείται από την 18 DAT έως τέλος καλλιεργητικής περιόδου, μεταξύ των φυτών του μάρτυρα και των υπολοίπων μεταχειρίσεων. Ενώ, κατά τη διάρκεια του πειράματος, οι μεταχειρίσεις ανάμιξης απορροών – νερού, 50%D και 75%D, δεν εμφανίζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές. Συνολικά, τη μεγαλύτερη τιμή του εμβαδού επιφάνειας, κατείχε η μεταχείριση του μάρτυρα, ακολουθεί η μεταχείριση των ολικών απορροών, και τέλος οι αραιωμένες μεταχειρίσεις, 50%D και 75%D.



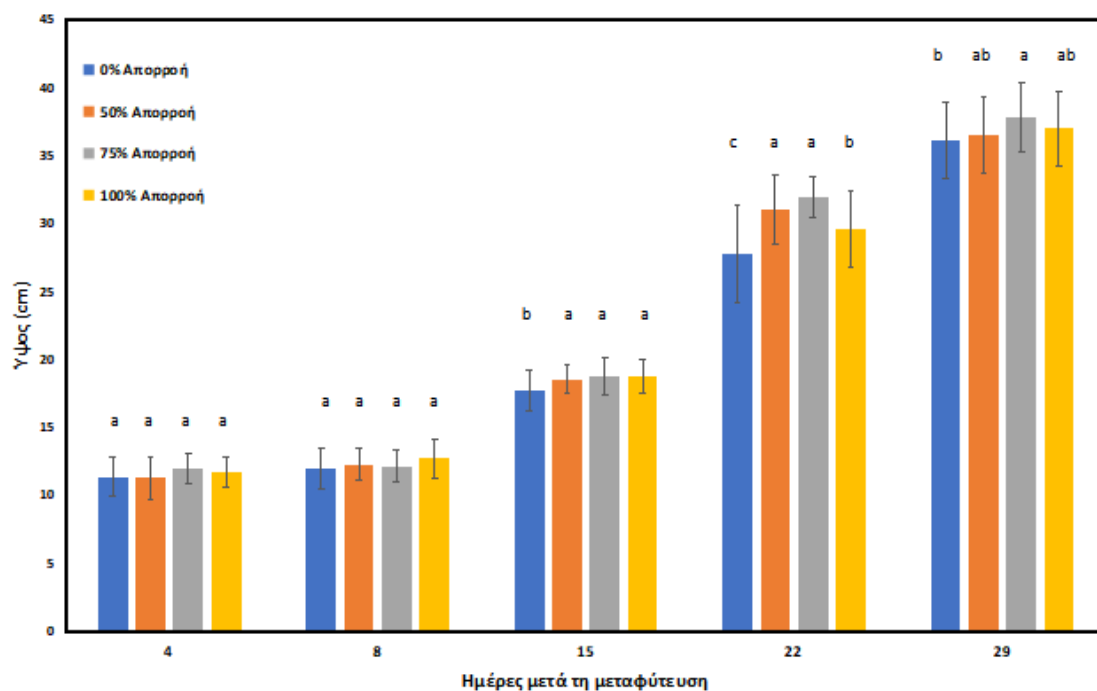
**Γράφημα 4.** Φυλλική επιφάνεια (Μέσος Όρος  $\pm$  STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου. Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (για  $\text{sig} < 0.05$ ). Με a εκφράζεται η μεγαλύτερη τιμή.



## 4.3 Ύψος φυτών

### 4.3.1 Πρώτη καλλιεργητική περίοδος

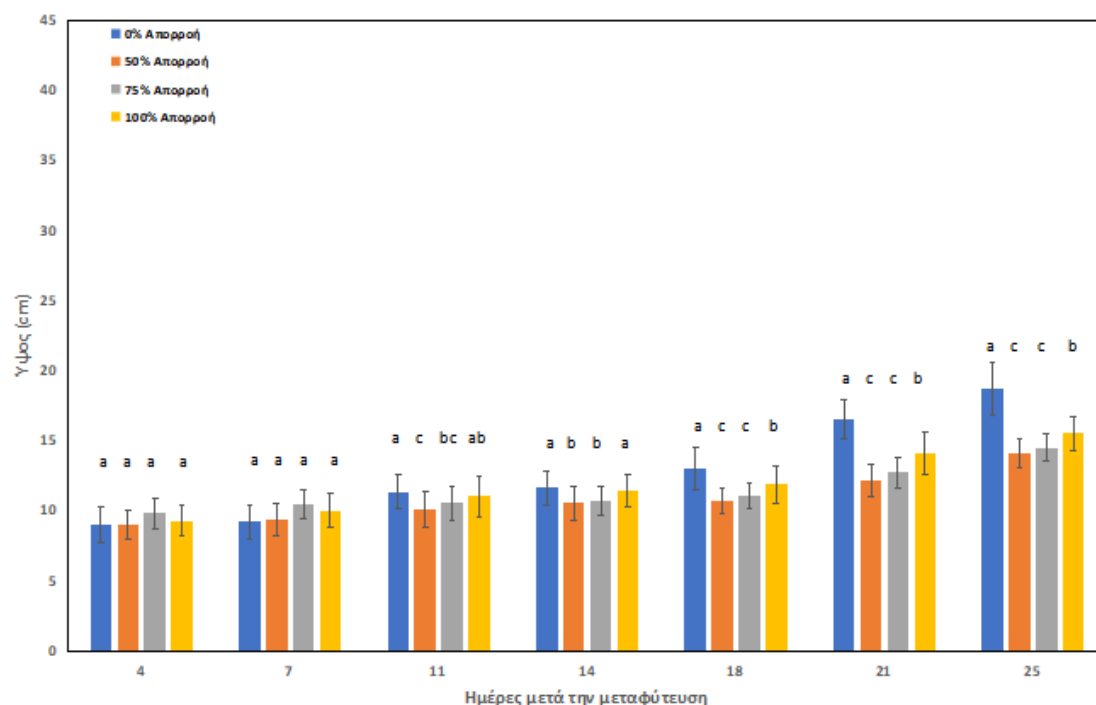
Στο παρακάτω Γράφημα 5 απεικονίζεται η μεταβολή του μέσου όρου του ύψους φυτών μαρουλιού κατά την πρώτη καλλιεργητική περίοδο. Σημαντικό θα ήταν να αναφερθεί ότι οι μετρήσεις λήφθηκαν τυχαία από 15 φυτά τα οποία είχαν μαρκαριστεί με κορδέλα μπλε χρώματος, για κάθε μεταχείριση. Τα φυτά μαρουλιού όλων των μεταχειρίσεων κατά τις δυο πρώτες μετρήσεις φαίνεται να μην ξεπέρασαν τα 15cm ενώ δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Ωστόσο από την 15<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος μετά την μεταφύτευση και μέχρι τη συγκομιδή παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων, όπου φαίνεται ότι ο μάρτυρας παρουσίασε μικρότερο ύψος και διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Αντίθετα, καλύτερη επίδοση όσον αφορά το ύψος των φυτών παρουσίασε η μεταχείριση με 75% απορροή με την μέγιστη να παρατηρείται κατά την 22<sup>η</sup> ημέρα μετά την μεταφύτευση στα 38cm. Τέλος, οι μεταχειρίσεις των αραιωμένων απορροών σε ποσοστό ανάμειξης απορροής- νερού, 75%D-25%W και 50% D-50%W, δεν φαίνεται να διέφεραν στατιστικά μεταξύ τους σε καμία μέτρηση.



**Γράφημα 5.** Ύψος φυτών (Μέσος Όρος ± STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου. Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (για sig<0.05). Με a εκφράζεται η μεγαλύτερη τιμή.

### 4.3.2 Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος

Στο Γράφημα 6 παρατίθεται η εξέλιξη του ύψους της καλλιέργειας μαρουλιού κατά τη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο. Όπως παρατηρήθηκε και στον αριθμό φύλλων των φυτών, η δεύτερη καλλιεργητική περίοδος δεν παρουσιάζει παρόμοια εικόνα με αυτή της πρώτης. Πιο συγκεκριμένα, τα φυτά της μεταχείρισης με πρότυπο διάλυμα άρδευσης αναπτύχθηκαν πιο πολύ σε ύψος σε σχέση με τα φυτά των υπόλοιπων μεταχειρίσεων σε όλη τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου. Επιπλέον, τα φυτά του μάρτυρα εμφάνισαν στατιστικά σημαντική διαφορά με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις κατά τη 18<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος έως την τελευταία ημέρα, 25<sup>η</sup>DAT, των μετρήσεων. Σημαντικό θα ήταν επίσης να αναφερθεί ότι οι αραιωμένες με νερό μεταχειρίσεις 50%D και 70%D δεν διέφεραν στατιστικά σημαντικά κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου. Τέλος, σύμφωνα με το Γράφημα 6, μειωμένη αύξηση σε ύψος παρατηρήθηκε στη μεταχείριση 50%D και ο μέσος όρος του ύψους των μαρουλιών δε ξεπέρασε τα 14cm, ενώ το τελικό ύψος του μάρτυρα κατά την 25<sup>η</sup> ημέρα μετρήθηκε 19cm.

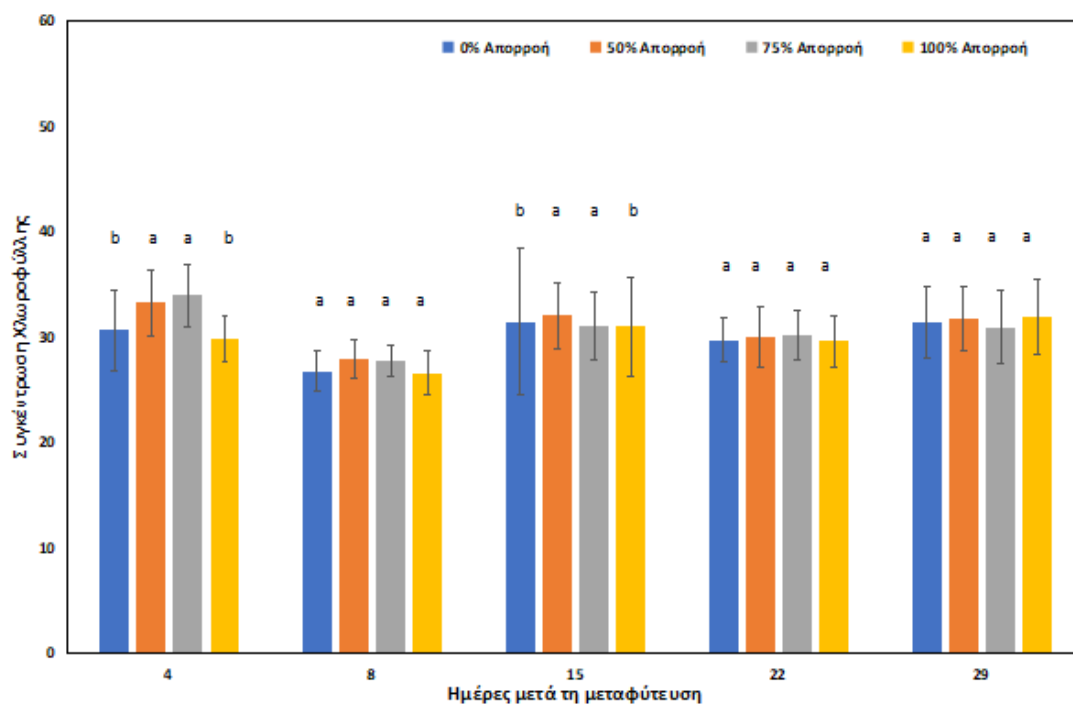


**Γράφημα 6.** Ύψος φυτών (Μέσος Όρος ± STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου. Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (για sig<0.05). Με a εκφράζεται η μεγαλύτερη τιμή.

## 4.4 Χλωροφύλλη

### 4.4.1 Πρώτη καλλιεργητική περίοδος

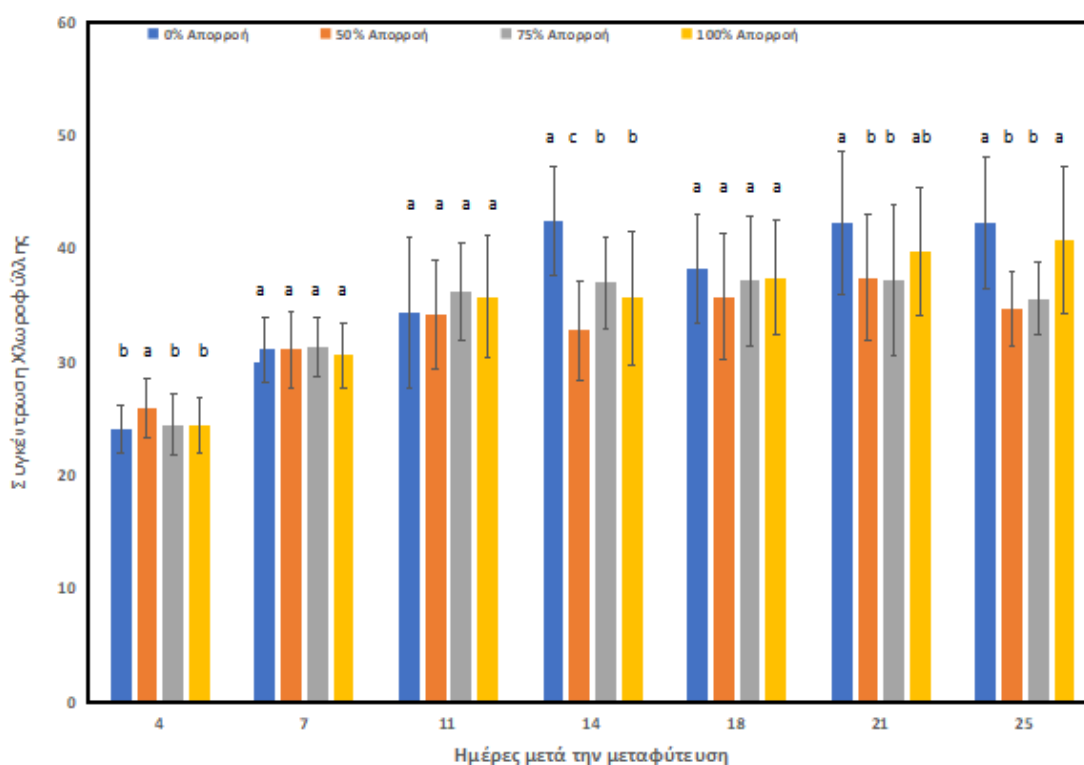
Όσον αφορά την μέτρηση της χλωροφύλλης, έγιναν 5 δειγματοληψίες στην πρώτη καλλιεργητική περίοδο κατά την 4<sup>η</sup>, 8<sup>η</sup>, 15<sup>η</sup>, 22<sup>η</sup> και 29<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος μετά τη μεταφύτευση. Αρχικά, όπως απεικονίζεται στο παρακάτω γράφημα κατά τις δυο πρώτες μετρήσεις φαίνεται ότι οι αραιωμένες μεταχειρίσεις παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές στη συγκέντρωση της ολικής χλωροφύλλης σε σχέση με τις άλλες μεταχειρίσεις, ωστόσο όμως, δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά μεταξύ τους. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η δεύτερη μέτρηση κατά την οποία παρατηρείται μείωση της περιεχόμενης χλωροφύλλης σε όλες τις μεταχειρίσεις. Παρ' όλα αυτά, κατά τις υπόλοιπες μετρήσεις μέχρι και τη συγκομιδή φαίνεται να μην εμφανίζονται στατικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.



**Γράφημα 7.** Τιμές SPAD (Μέσος Όρος ± STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου. Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (για sig<0.05). Με a εκφράζεται η μεγαλύτερη τιμή.

#### 4.4.2 Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος

Η μέτρηση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης συνεχίστηκε και στο 2ο πείραμα με τα αποτελέσματα των μέσων όρων να παρουσιάζονται στο Γράφημα 8. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές κατά την 4<sup>η</sup>, 14<sup>η</sup>, 21<sup>η</sup> και 25<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος, μετά τη μεταφύτευση. Ωστόσο, μόνο κατά την πρώτη μέτρηση παρατηρείται αυξημένη τιμή χλωροφύλλης στη μεταχείριση ίσης ποσότητας απορροής- νερού, η οποία διαφέρει στατιστικά σημαντικά από τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Αντίθετα, από την 14<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος μέχρι και την συγκομιδή ο μάρτυρας παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές χλωροφύλλης σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Κατά την 18<sup>η</sup> έως 25<sup>η</sup> ημέρα οι σχέσεις μεταξύ των μεταχειρίσεων άλλαξαν προς όφελος της μεταχείρισης που αρδεύονταν μόνο με απορροές. Επιπρόσθετα, η τιμή της ολικής συγκέντρωσης χλωροφύλλης των επιλεγμένων φυτών του μάρτυρα και των φυτών της μεταχείρισης που αρδεύονταν μόνο με ποσότητα απορροών από την τομάτα, δεν παρουσίασε στατιστικώς σημαντικό ενδιαφέρον.

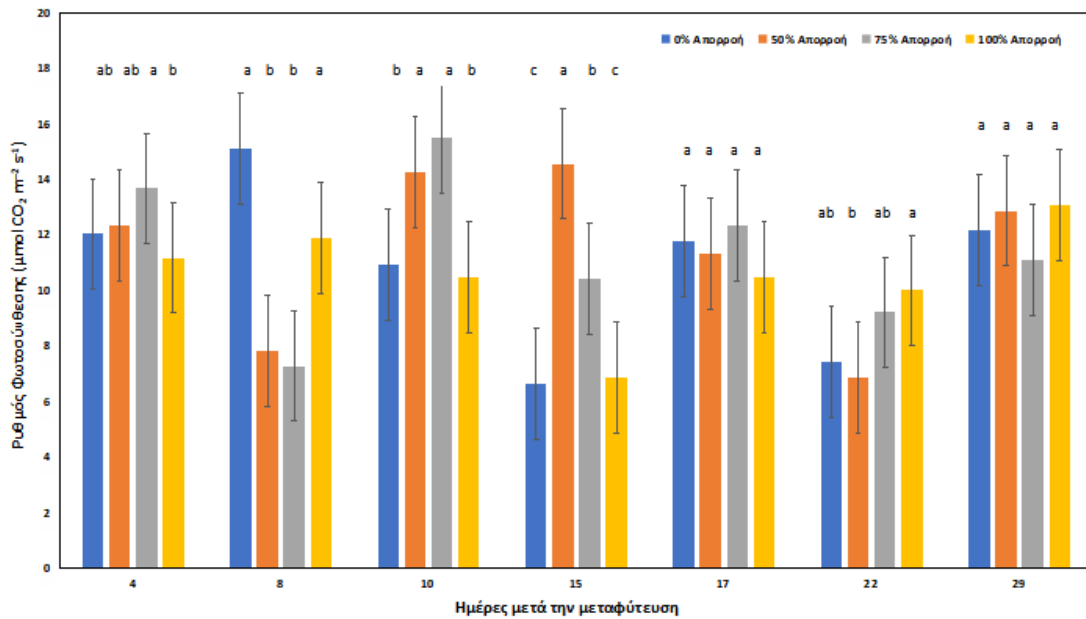


**Γράφημα 8.** Τιμές SPAD (Μέσος Όρος ± STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου. Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (για sig<0.05). Με a εκφράζεται η μεγαλύτερη τιμή.

## 4.5 Φωτοσύνθεση

### 4.5.1 Πρώτη καλλιεργητική περίοδος

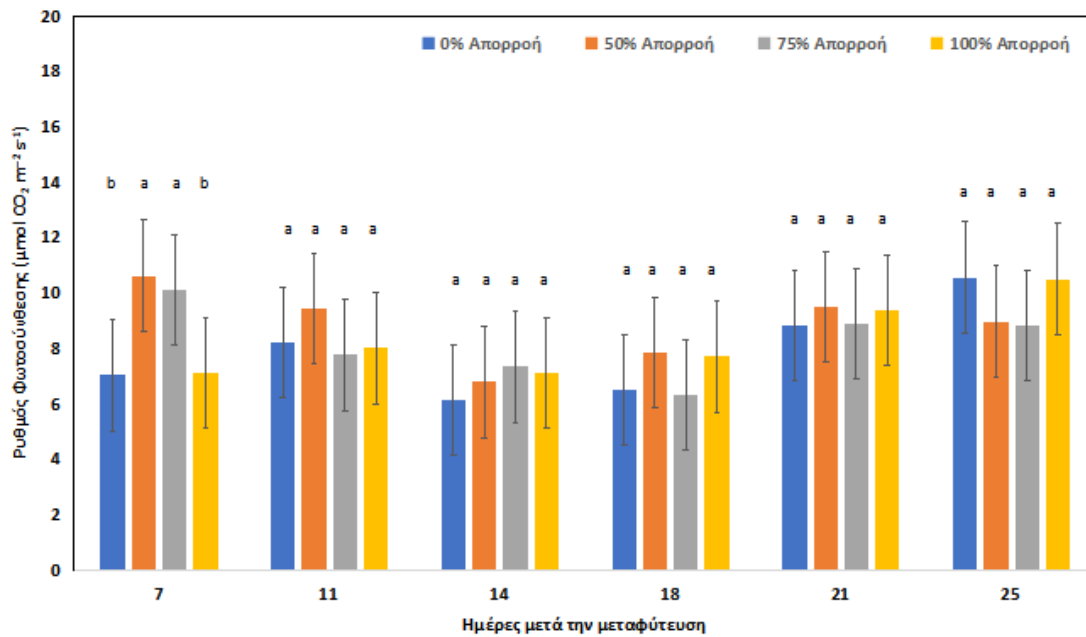
Στο παρακάτω Γράφημα 9 παρουσιάζεται ο ρυθμός φωτοσύνθεσης ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) των επιλεγμένων φυτών μαρουλιού κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου. Στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων παρατηρούνται την 4<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος μετά τη μεταφύτευση, όπου φαίνεται ότι η μεταχείριση με 75%D υπερέχει από τις υπόλοιπες και διαφέρει στατιστικά σημαντικά με την μεταχείριση, 100%D. Ωστόσο, διαφορετική εικόνα παρουσιάζουν τα φυτά μαρουλιού ως προς τον ρυθμό φωτοσύνθεσης κατά την δεύτερη μέτρηση, (DAT 8), δεδομένου ότι, τόσο τα φυτά του μάρτυρα όσο και τα φυτά της μεταχείρισης με 100%D εμφανίζουν αυξημένη φωτοσυνθετική ικανότητα. Αντίθετα, κατά την Τρίτη (DAT 10) και την τέταρτη (15 DAT) μέτρηση παρατηρείται μειωμένη φωτοσυνθετική ικανότητα στη μεταχείριση του μάρτυρα. Τέλος, κατά την 22<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος μετά τη μεταφύτευση, εμφανίζεται μείωση στο ρυθμό φωτοσύνθεσης σε όλες τις μεταχειρίσεις με τα φυτά της μεταχείρισης με άρδευση μόνο με απορροές από την τομάτα, 100%D, να κατέχουν τη μεγαλύτερη τιμή ( $10 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Στατιστικά σημαντικά διαφέρουν τα φυτά της μεταχείρισης των αραιωμένων απορροών, 50%D που εμφανίζουν τη μικρότερη φωτοσυνθετική ικανότητα ( $7 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) με τα φυτά της μεταχείρισης 100%D. Τέλος, κατά την τελευταία μέτρηση πριν τη συγκομιδή δε παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων, ενώ για όλη την καλλιεργητική περίοδο υφίστανται σημαντικές διακυμάνσεις στο ρυθμό της φωτοσύνθεσης σε συνάρτηση με το χρόνο, Γράφημα 9.



**Γράφημα 9.** Ρυθμός φωτοσύνθεσης ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) (Μέσος Όρος  $\pm$  STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου. Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (για  $\text{sig} < 0.05$ ). Με a εκφράζεται η μεγαλύτερη τιμή.

#### 4.5.2 Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος

Κατά τη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο, όπως φαίνεται και στο παρακάτω Γράφημα 10, στατιστικές διαφορές ως προς τον ρυθμό φωτοσύνθεσης σε  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  μεταξύ των μεταχειρίσεων, παρατηρήθηκαν μόνο κατά την 7<sup>η</sup> μέρα του πειράματος μετά τη μεταφύτευση. Μεγαλύτερες τιμές καταγράφηκαν σε φυτά των μεταχειρίσεων με απορροή 50%D ( $10.5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) και με 75%D ( $10 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), αντίστοιχα. Στις υπόλοιπες μετρήσεις μέχρι και πριν την συγκομιδή δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές, ωστόσο κατά την τελευταία μέτρηση φαίνεται οι μεταχειρίσεις 0% και 100% απορροή να έχουν τις μεγαλύτερες τιμές.

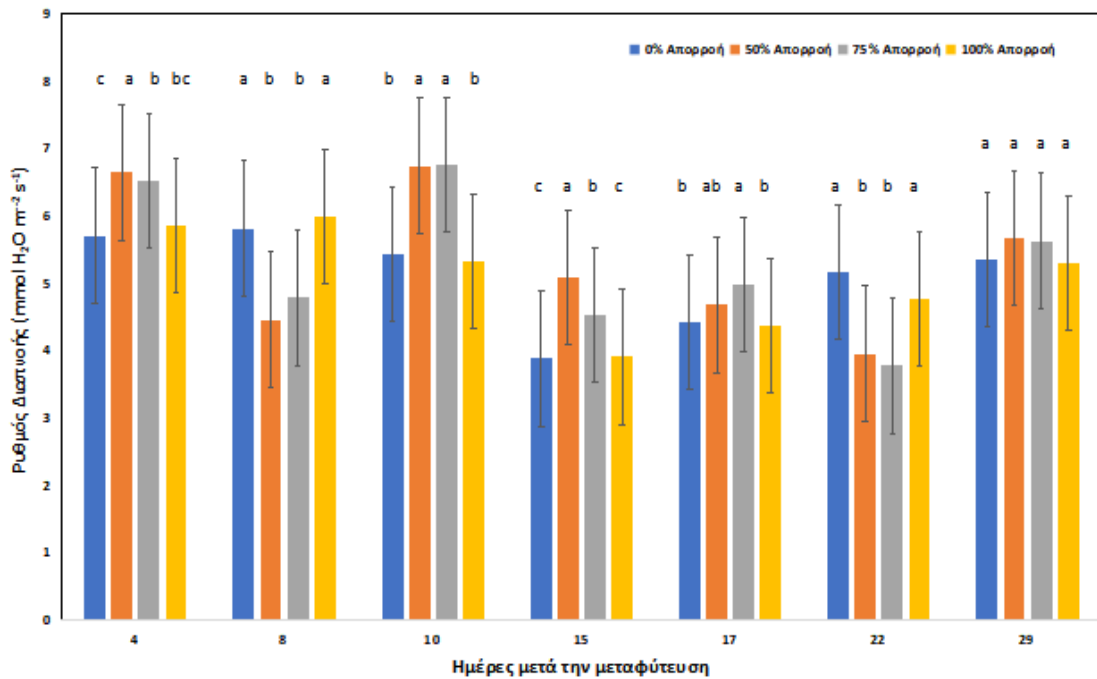


**Γράφημα 10.** Ρυθμός φωτοσύνθεσης ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) (Μέσος Όρος  $\pm$  STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου. Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (για  $\text{sig} < 0.05$ ). Με a εκφράζεται η μεγαλύτερη τιμή.

## 4.6 Διαπνοή

### 4.6.1 Πρώτη καλλιεργητική περίοδος

Στο Γράφημα 11, παρουσιάζεται ο ρυθμός διαπνοής της καλλιέργειας του μαρουλιού σε όλη τη διάρκεια του πειράματος κατά την πρώτη καλλιεργητική περίοδο. Γενικά, διακρίνεται μια συνεχής μεταβολή του ρυθμού διαπνοής σε όλες τις μεταχειρίσεις. Από την τέταρτη μέτρηση, 15 DAT, και έπειτα παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές συγκριτικά με τις προηγούμενες μετρήσεις. Γενικότερα, υφίστανται στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μετρήσεων, ωστόσο η μεταχείριση του μάρτυρα, (0%D) και των καθαρών απορροών (100%D) δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

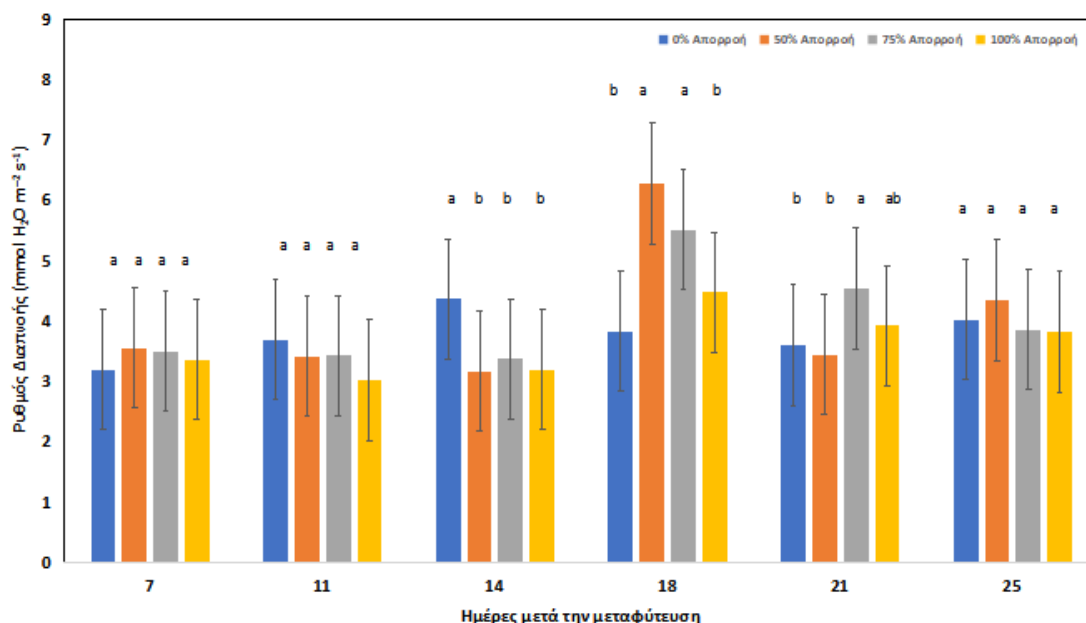


**Γράφημα 11.** Ρυθμός διαπνοής ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) (Μέσος Όρος  $\pm$  STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου. Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (για  $\text{sig} < 0.05$ ). Με a εκφράζεται η μεγαλύτερη τιμή.

#### 4.6.2 Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος

Στο Γράφημα 12, απεικονίζεται ο ρυθμός διαπνοής των φυτών μαρουλιού κατά τη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων εμφανίζονται την 14<sup>η</sup>, 18<sup>η</sup> και 21<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος μετά τη μεταφύτευση. Στην τρίτη μέτρηση, (14 DAT), ο μάρτυρας παρουσιάζει το μέγιστο ρυθμό διαπνοής με  $4 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ενώ διαφέρει σημαντικά από τις άλλες μεταχειρίσεις. Σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, η μεταχείριση του μάρτυρα δε διαφέρει στατιστικά από μεταχείριση του θρεπτικού διαλύματος μόνο με απορροές από την καλλιέργεια της τομάτας. Τέλος, στη μέτρηση πριν τη συγκομιδή δεν παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.



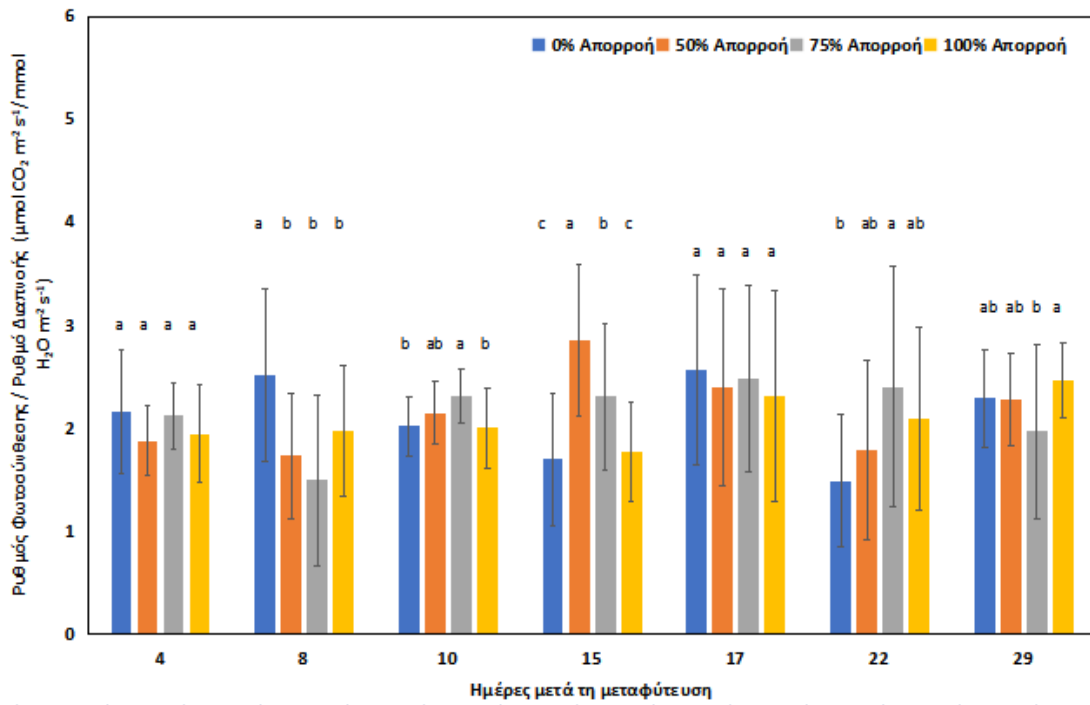


**Γράφημα 12.** Ρυθμός διαπνοής ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) (Μέσος Όρος  $\pm$  STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου. Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (για  $\text{sig} < 0.05$ ). Με a εκφράζεται η μεγαλύτερη τιμή.

## 4.7 Στιγμιαία αποδοτικότητα χρήσης νερού (WUE)

### 4.7.1 Πρώτη καλλιεργητική περίοδος

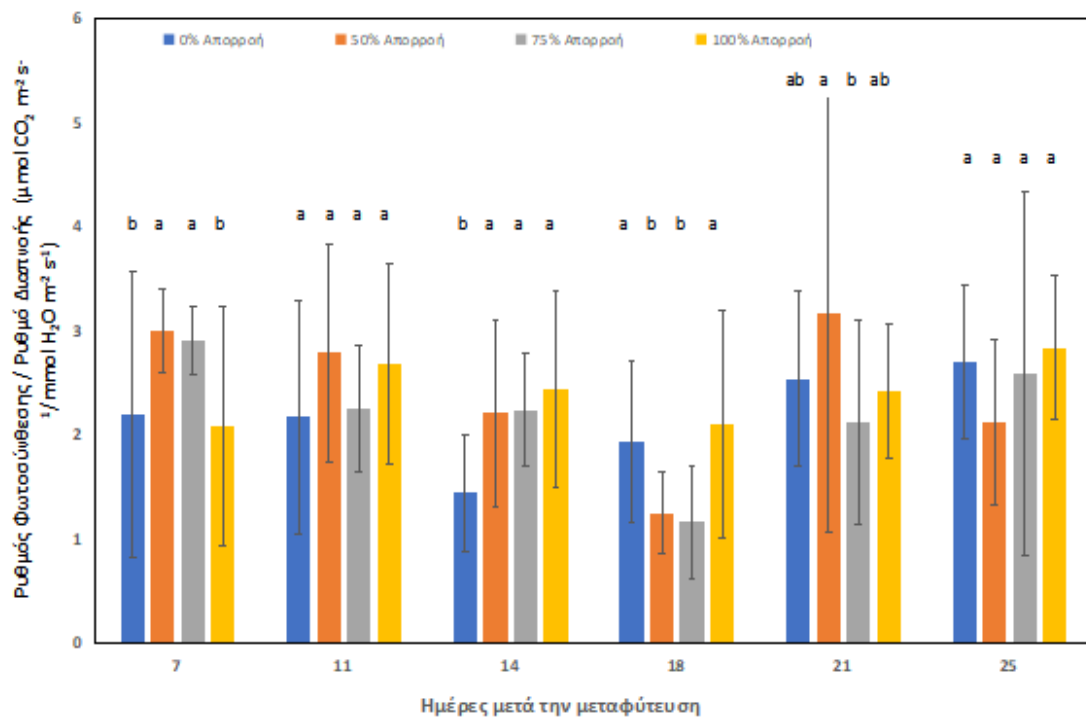
Στο Γράφημα 13, παρουσιάζεται η μεταβολή της στιγμιαίας αποδοτικότητας χρήσης νερού καθ'όλη τη διάρκεια του πειράματος της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου. Την 8<sup>η</sup> ημέρα μετά τη μεταφύτευση ο μάρτυρας εμφανίζει τη μέγιστη εξοικονόμηση νερού, ( $2.5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) και διαφέρει στατιστικά σημαντικά από τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, η μεταχείριση του μάρτυρα δε διαφέρει στατιστικά από μεταχείριση του θρεπτικού διαλύματος μόνο με απορροές από την καλλιέργεια της τομάτας. Τέλος, κατά την τελευταία μέτρηση, 29DAT, η μεταχείριση 75%D, παρουσιάζει τη μικρότερη εξοικονόμηση νερού, ( $1.96 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) και διαφέρει σημαντικά από τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις.



**Γράφημα 13.** Μεταβολή της στιγμιαίας WUE ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) (Μέσος Όρος  $\pm$  STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου. Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (για  $\text{sig} < 0.05$ ). Με a εκφράζεται η μεγαλύτερη τιμή.

#### 4.7.2 Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η μεταβολή της WUE κατά τη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο του πειράματος. Σε μερικές μετρήσεις εμφανίστηκαν στατιστικές σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ωστόσο στις περισσότερες από αυτές, τα φυτά που αρδεύονταν με 50% απορροή φαίνεται να είχαν μεγαλύτερη στιγμιαία αποδοτικότητα χρήσης νερού.



**Γράφημα 14.** Μεταβολή της στιγμιαίας WUE ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) (Μέσος Όρος  $\pm$  STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου. Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (για  $\text{sig} < 0.05$ ). Με a εκφράζεται η μεγαλύτερη τιμή.

## 4.8 Νωπό-Ξηρό Βάρος

### 4.8.1 Πρώτη καλλιεργητική περίοδος

Στον Πίνακα 3 φαίνεται η διαφοροποίηση του νωπού και ξηρού βάρους ( $\text{g m}^{-2}$ ) των φυτών μαρουλιού των τεσσάρων μεταχειρίσεων του 1ου πειράματος μετά τη 1η καταστροφική συγκομιδή και πως αυτά επηρεάζονται από τις διαφορετικές συνταγές άρδευσης. Η μεγαλύτερη τιμή του μέσου όρου του ολικού χλωρού βάρους ανά φυτό είναι 2101g και ανήκει στη μεταχείριση των ανάμεικτων απορροών, σε ποσοστό 75% απορροή και 25% νερό. Η μικρότερη τιμή χλωρού βάρους ανήκει στη μεταχείριση του μάρτυρα, με μέσο όρο των δειγμάτων χλωρής βιομάζας, 1789g φυτό<sup>-1</sup>.

Στατιστικά σημαντική διαφορά εμφανίζεται μεταξύ του μάρτυρα και της μεταχείρισης 75% απορροών. Το ξηρό βάρος δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων, ωστόσο το μεγαλύτερο βάρος το είχαν τα φυτά που αρδεύονταν μόνο με απορροές, με βάρος 87.72g ανά φυτό ενώ το μικρότερο τα φυτά του μάρτυρα 78.46g ανά φυτό. Η εκατοστιαία περιεχόμενη υγρασία στο δείγμα υπολογίστηκε 95 -96% του νωπού βάρους, σε όλες τις μεταχειρίσεις.

**Πίνακας 3.** Νωπό και ξηρό βάρος (Μέσος Όρος  $\pm$  STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου. Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (για  $\text{sig}<0,05$ ). Με a εκφράζεται η μεγαλύτερη τιμή.

Μεταχειρίσεις	Νωπό Βάρος ( $\text{g m}^{-2}$ )	Ξηρό Βάρος ( $\text{g m}^{-2}$ )
0%	1789.51 $\pm$ 199.55b	78.46 $\pm$ 9.37
50%	1872.89 $\pm$ 262.99ab	86.04 $\pm$ 16.15
75%	2101.02 $\pm$ 260.89a	87.72 $\pm$ 14.89
100%	1938.80 $\pm$ 292.71ab	86.28 $\pm$ 13.69

#### 4.8.2. Δεύτερη καλλιεργητική περίοδος

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μέτρησης του νωπού και ξηρού βάρους σε  $\text{g m}^{-2}$  της καλλιέργειας του μαρουλιού, κατά τη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο. Η μεταχείριση του μάρτυρα παρουσίασε τη μέγιστη μέση τιμή νωπού βάρους ( $1120\text{g m}^{-2}$ ), ενώ η μεταχείριση με αναλογία ανάμειξης 1:1, απορροών –νερού, την ελάχιστη τιμή βάρους ( $380\text{g m}^{-2}$ ). Πιο συγκεκριμένα, η μέση τιμή του χλωρού βάρους του μαρουλιού του μάρτυρα ήταν στατιστικά σημαντικά μεγαλύτερη από τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Επιπλέον, οι μεταχειρίσεις αραιωμένων απορροών, 50%D και 75%D παρουσίασαν μια στατιστικά σημαντική μείωση συγκριτικά με τη μεταχείριση των αμιγώς καθαρών απορροών, 100%D σε ποσοστό 44.6% και 29.4%, αντίστοιχα.

Το ξηρό βάρος της καλλιέργειας παρουσίασε όμοια αποτελέσματα με αυτά του νωπού βάρους. Η μέση τιμή του ξηρού βάρους της καλλιέργειας του μάρτυρα ήταν σχεδόν η τριπλάσια ποσότητα βάρους σε σχέση με αυτή των 50%D και 75%D μεταχειρίσεων, δεδομένων των τιμών που καταγράφηκαν στα 35 και 44 g m<sup>-2</sup> , αντίστοιχα. Η εκατοστιαία περιεχόμενη υγρασία στο δείγμα υπολογίστηκε 91 -92% του νωπού βάρους, σε όλες τις μεταχειρίσεις.

**Πίνακας 4.** Νωπό και ξηρό βάρος (Μέσος Όρος ± STDV) των μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου. Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (για sig<0,05). Με a εκφράζεται η μεγαλύτερη τιμή.

Μεταχειρίσεις	Νωπό Βάρος (g m <sup>-2</sup> )	Ξηρό Βάρος (g m <sup>-2</sup> )
0%	1120±148.4a	86± 10.5a
50%	328±127.8c	35±11.2c
75%	485±72.1c	44± 7.7bc
100%	687±178.9b	53± 14.1b

## 5. Συζήτηση

Η τεχνική της πολυκαλλιέργειας έρχεται να δώσει λύση στη μείωση των εισροών ενός υδροπονικού συστήματος με στόχο την βιώσιμη ανάπτυξη του. Η χρήση του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος μιας πρωτεύουσας καλλιέργειας για την άρδευση και λίπανση άλλων καλλιεργειών αποτελεί μία εναλλακτική τεχνική που συμβάλει στην αειφορική αξιοποίηση φυσικών πόρων, όπως το νερό και τα λιπάσματα. Στην πειραματική έρευνα των García-Caparrós et al. (2018), παρατηρήθηκε μείωση της χρήσης νερού και νιτρικών σε σύστημα πολυκαλλιέργειας πεπονιού (πρωτεύουσα καλλιέργεια) και τριαντάφυλλου (δευτερεύουσας).

Η περιεχόμενη ολική συγκέντρωση της χλωροφύλλης κατά την 1η καλλιεργητική περίοδο, την Άνοιξη 2019, οι τιμές κυμάνθηκαν στα ίδια επίπεδα για όλες τις μεταχειρίσεις, με μέσο όρο 30.4. Αντίθετα κατά τη 2η καλλιεργητική περίοδο, το Καλοκαίρι 2019, ο μέσος όρος των τιμών της συγκέντρωσης χλωροφύλλης αυξήθηκε κατά 12%, λόγω της περάτωσης του πειράματος σε λιγότερες ημέρες και απόδοσης ( $\text{g φυτό}^{-1}$ ), μικρότερου βάρους. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων, όπως πραγματοποιήθηκαν σε δυο διαφορετικές περιόδους, συσχετίζονται με εκείνα άλλων μελετών. Σύμφωνα με βιβλιογραφία, υπάρχει στενή σχέση μεταξύ της έντασης του χρώματος των φύλλων (έντονο πράσινο) και συγκεντρώσεων χλωροφύλλης, καθώς επίσης καθοριστικό ρόλο παίζει και ο σύντομος κύκλος της καλλιέργειας (Rodriguez I. R. & Miller G. L., 2000; Uddling et al, 2007; Sharma P., 2015; Sim et al, 2015).

Η φωτοσυνθετική δραστηριότητα των φυτών κατά την 1η καλλιεργητική περίοδο παρουσίασε μεγάλη διακύμανση μεταξύ των μεταχειρίσεων, διότι δεν εφαρμόστηκε ο συγχρονισμός της έναρξης μετρήσεων με εξωτερική ηλιακή ακτινοβολία. Κατά τη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο, η αρχή των παραμέτρων της φωτοσύνθεσης με το όργανο, άρχισε όταν συμπληρωνόταν αθροιστικά, η συνολική ηλιακή ακτινοβολία των  $77 \text{ J cm}^{-2}$ , όπως καταγράφονταν, ανά 15 min της ώρας.

Παράλληλα, παρατηρείται μείωση κατά 25% στο ρυθμό φωτοσύνθεσης και διαπνοής, λόγω διαφορετικών εσωτερικών κλιματικών παραγόντων και ιδιαίτερα, συνολικής ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας, ανά καλλιεργητική περίοδο. Σύμφωνα

με βιβλιογραφία, ο ρυθμός φωτοσύνθεσης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις κλιματικές συνθήκες ανάπτυξης των φυτών και επομένως αποτελεί κοινό κριτήριο που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό πιθανών αλλαγών σε καλλιέργειες προσαρμοσμένες σε συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες (Ashraf, 2001; El-Sharkawy, 2006).

Ο δείκτης αποδοτικότητας νερού αυξήθηκε κατά 7.8% κατά τη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο, όπου παρατηρήθηκε μειωμένη απόδοση παραγωγής ανά κεφαλή μαρουλιού, κατά 74.5%. Σύμφωνα με την έρευνα των Rodriguez et al. (2017), κατά την οποία μελετήθηκε η ανάπτυξη φυτών τομάτας που αρδεύονταν με ανακυκλωμένο διάλυμα απορροής, προέκυψε ότι το σύστημα ήταν ιδιαίτερα αποδοτικό εφόσον οδήγησε σε εξοικονόμηση νερού, ωστόσο παρατηρήθηκε μείωση της απόδοσης της καλλιέργειας.

## **6. Συμπεράσματα**

Το ανοιχτό υδροπονικό συστήματα επάλληλων καλλιεργειών με επαναχρησιμοποίηση των απορροών της πρωτεύουσας καλλιέργειας (τομάτα) για την διαδοχική άρδευση μιας δευτερεύουσας καλλιέργειας (μαρουλιού), χαρακτηρίζεται από την αύξηση της αποδοτικότητας της χρήσης νερού. Για το λόγο αυτό, βρίσκει ευρεία εφαρμογή στις περιοχές που αντιμετωπίζουν σημαντικό πρόβλημα με την έλλειψη νερού και την κακή ή υποβαθμισμένη ποιότητα νερού, για την άρδευση των καλλιεργειών. Επιπλέον, επισημαίνεται η ανάγκη για εφαρμογή υδροπονικών συστημάτων πολυκαλλιέργειας, ώστε να επιτυγχάνεται ταυτόχρονα μείωση της χρήσης νερού και λιπασμάτων.

Σημαντικό θα ήταν να αναφερθεί ότι το παρόν πείραμα διεξήχθη τον Απρίλιο και επαναλήφθηκε το μήνα Ιούλιο ώστε να παρατηρηθούν τυχόν επιδράσεις των κλιματικών συνθηκών στα φυτά. Συνεπώς, προτείνεται η μεταφύτευση κατά τους θερινούς μήνες δεδομένου των καλύτερων ποσοτικών χαρακτηριστικών που παρατηρήθηκαν στα φυτά μαρουλιού, όπως η αυξημένη συγκέντρωση ολικής χλωροφύλης. Ωστόσο, στη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο, μέγιστη απόδοση παρατηρείται στη μεταχείριση, T4 με πλήρη αξιοποίηση των απορροών (100% D) σε σύγκριση με τον μάρτυρα.

Σύμφωνα με τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα έρευνα, η καλλιέργεια μαρουλιού δύναται να χρησιμοποιηθεί σε σύστημα διαδοχικών καλλιεργειών, ως δευτερεύουσα καλλιέργεια, με επαναχρησιμοποίηση απορροών της υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας.

Συμπερασματικά, το ανοιχτό σύστημα διαδοχικών καλλιεργειών, συγκαλλιέργειας τομάτας-μαρούλι, χαρακτηρίζεται βιώσιμη λύση σε σύγκριση με την ανάπτυξη των καλλιεργειών, ως μονοκαλλιέργειες. Παράλληλα, επιτυγχάνεται μείωση των εκροών και εξοικονόμηση φυσικών πόρων.

Σε πιθανό σενάριο, επανάληψης της καλλιέργειας μαρουλιού πέραν των δυο κύκλων που εφαρμόστηκαν μέχρι την ολοκλήρωση του βιολογικού κύκλου της καλλιέργειας της τομάτας, θα επιτυχανόταν μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας νερού και λιπασμάτων (οικονομικό, περιβαλλοντικό όφελος). Η παρότρυνση των παραγωγών για υιοθέτηση του υδροπονικού συστήματος επάλληλων καλλιεργειών, θα επιφέρει σημαντικό εισόδημα και βιωσιμότητα του κλάδου της Υδροπονίας.



## 7. Βιβλιογραφία

- Abd-elmoniem, E.M., Abdrabbo, M.A., Farag, A.A., Medany, M.A. (2006). Hydroponics for food production : Comparison of open and closed systems on yield and consumption of water and nutrient. Proceedings 2nd International Conference on Water Resources and Arid Environments, Riyadh, Saudi Arabia, King Saud University.
- Afzal, A., Faisalabad, A., Farooq, M., Wien, T.U. (2006). Alleviation of salinity stress in spring wheat by hormonal priming with ABA, salicylic acid and ascorbic acid. *Int. J. Agric. Biol.*, 1560–8530.
- Ahuja, I., de Vos, R.C.H., Bones, A.M., Hall, R.D. (2010). Plant molecular stress responses face climate change. *Trends Plant Sci.* 15: 664–674.
- Ashraf M. (2001) Relationships between growth and gas exchange characteristics in some salt-tolerant amphidiploid Brassica species in relation to their diploid parents. *Environ Exp Bot* 45:155–163
- Avdouli, D., Max, J.F.J., Katsoulas, N., Levizou, E. (2021). Basil as Secondary Crop in Cascade Hydroponics: Exploring Salinity Tolerance Limits in Terms of Growth, Amino Acid Profile, and Nutrient Composition. *Sci. Hortic.*, 7: 203.
- Ayers, A. (1952). Seed Germination as Affected by Soil Moisture and Salinity. *Agron J.*, 82-84.
- Ayers, A.D., Wadleigh, C.H., Bernstein, L. (1951). Salt tolerance of six varieties of lettuce. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.*, 57: 237-242.
- Bacon, M. (2004). Water use efficiency in plant biology. M. Bacon (Ed.), *Water Use Efficiency in Plant Biology*, Blackwell Publishing, Oxford, UK, pp. 1-26.
- Barbosa, G.L., Almeida Gadelha, F.D., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G.M., Halden R.U. (2015) Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 12: 6879-6891.

- Bartha, C., Fodorpataki, L., Martinez-Ballesta, M.C., Popescu, O., Carvajal, M. (2015). Sodium accumulation contributes to salt stress tolerance in lettuce cultivars. *J. Appl. Bot. Food Qual.*, 88: 42–48.
- Bell R.W., Edwards D.G. and Asher C.J., (1989). Effects of Calcium Supply on Uptake of Calcium and Selected Mineral Nutrients by Tropical Food Legumes in Solution Culture. *Australian Journal of Agricultural Research*, 40, pp.1003-1013
- Benton, J., Jones Jr. (2005). *Hydroponics, A Practical Guide for the Soilless Grower*. CRC Press.
- Bouranis D. L., Kitsaki, C. K., Tzakosta, A. (2004). Differences in nitrate and ammonium homeostasis of reproductive and vegetative shoots of olive tree cv Kalamon during inflorescence development. *J. Plant Nutr.* 27, 797-813.
- Bouranis, D. L., Chorianopoulou, S. M., Bouranis, L. D. (2014). A power function based approach for the assessment of the sulfate deprivation impact on nutrient allocation in young maize plants. *J. Plant Nutr.* 37, 704-722.
- Briggs, L. J., and Shantz, H. L. (1913). “The water requirement of plants,” in *Bureau of Plant Industry Bulletin* (Washington, DC: US Department of Agriculture), 282–285.
- Brun R. and Chazell L., (1996). Water and nitrate absorption kinetics in the nycthemeral cycle of rose grown in the greenhouses using a recirculating solution. *Journal of Plant Nutrition*, 19:839-866
- Burrage, S.W. (2014). *Soilless Culture and Water Use Efficiency for Greenhouses in Arid, Hot Climates*.
- Carlile, W. R., Raviv, M., & Prasad, M. (2019). Organic soilless media components. In *Soilless Culture: Theory and Practice Theory and Practice* (Second Edi). Elsevier B.V.
- Clemens, S., Palmgren, M. G., Krämer, U. (2002). A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends Plant Sci.*, 7: 1360-1385.
- Cuartero, J., and Fernandez-Munoz, R., (1999). Tomato and salinity. *Scientia Horti*, 78: 83-125.
- DALE, J.E. (1965). Leaf growth in *Phaseolus vulgaris* II. Temperature effects and the light factor. *Annals of Botany* 29 (114): 293-307.

- De Kreijl, C. (1995). Latest insights into water and nutrient control in soilless cultivation. *Acta Hort.*, 408: 47-61.
- Dorais, M., Papadopoulos, A. P., & Gosselin, A. (2001). Influence of electric conductivity management on greenhouse tomato yield and fruit quality. *Agron. Afr.*, 21: 367.
- Ehret, D.L. and Ho, L.C. (1986). The Effects of Salinity on Dry Matter Partitioning and Fruit Growth in Tomatoes Grown in Nutrient Film Culture. *Hortic. Sci.*, 61: 361-367.
- El-Sharkawy MA. (2006) Utility of basic research in plant/crop physiology in relation to crop improvement: a review and a personal account. *Braz J Plant Physiol* (4):419–446
- Elvanidi, A.; Reascos, C.M.B.; Gourzoulidou, E.; Kunze, A.; Max, J.F.J.; Katsoulas, N. (2020). Implementation of the circular economy concept in greenhouse hydroponics for ultimate use of water and nutrients. *Sci. Hortic.*, 6:83.
- Escobar-Gutierrez, A., Burns, I., Lee, A., Edmondson, R. (2002). Screening lettuce cultivars for low nitrate content during summer and winter production. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.*, 77: 232–237.
- FAO-ONU. (2017). The future of food and agriculture: trends and challenges. In Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fernández, J.A., Niñirola, D., Ochoa, J., Orsini, F., Pennisi, G., Gianquinto, G., Egea-Gilabert, C. (2016). Root adaptation and ion selectivity affects the nutritional value of salt- stressed hydroponically grown baby-leaf *Nasturtium officinale* and *Lactuca sativa*. *Agric. Food Sci.*, 25: 230–239.
- Forde, B.G. and D.T. Clarkson. (1999). Nitrate and ammonium nutrition of plants: Physiological and molecular perspectives. *Adv. Bot. Res.*, 30:1–90.
- García-Caparrós, P., Llanderal, A., Maksimovic, I., Lao, M.T. (2018). Cascade Cropping System with Horticultural and Ornamental Plants under Greenhouse Conditions. *Water*. 10, 125.
- Garrido, Y., Tudela, J.A., Marín, A., Mestre, T., Martínez, V., Gil, M.I. (2014). Physiological, phytochemical and structural changes of multi-leaf lettuce caused by salt stress. *J. Sci. Food Agric.* 94: 1592–1599.

- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K., V., Jijakli, H. and Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics. *Sustainability*, 7: 4199-4224.
- Gradziel, T.M. and Gradziel, T. M. (2010) 'Horticultural Reviews, Horticultural Reviews', 38.
- Graves, C. J. (1983). The Nutrient Film Technique. In *Hort. Rev.* 5:1- 44.
- Grewal, H. S., Maheshwari, B., & Parks, S. E. (2011). 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.
- Grewal, H.S. (2010). Water uptake, water use efficiency, plant growth and ionic balance of wheat barley, canola and chickpea plants on a sodic vertosol with variable subsoil NaCl salinity. *Agric. Water Manag.*, 97: 148–156.
- Gruda, N. (2012). Current and Future Perspective of Growing Media in Europe. *Act Hort*, 960: 37-43.
- Harris, D. (1977). *Hydroponic gardening without soil*. Cape Town, South Africa: Pumell & Sons.
- He, J., Lee, S.K., Dodd, I.C. (2001). Limitations to photosynthesis of lettuce grown under tropical conditions: alleviation by root-zone cooling. *J. Exp. Bot.*, 52: 1323–1330.
- Heuvelink, E.P., Bakker, M. and Stanghellini, C. (2003). Salinity effects on fruit yield in vegetable crops: a simulation study. *Acta Hort.*, 609:133-140.
- Incrocci, L. P. (2003). Cascade Cropping System for Greenhouse Soilless Culture. *Act Hort*, 297-300.
- Incrocci, L., Pardossi, A., Malorgio, F., Maggini, R. and Campiotti, C.A. (2003). Cascade cropping system for greenhouse soilless culture. *Act Hort*. 609: 297-301.
- Jensen M. H. and Collins W.L., (1985). *Hydroponic Vegetable Production*. *Hort rev.*, 7: 483-558.
- Jones J.B. Jr. (1997). *Hydroponics a practical guide for the soil-less grower*. Boca Raton FL: CRC Press. 1-13.
- Katsoulas, N., Elvanidi, A., Ferentinos, K. P., Kacira, M., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2016). Crop reflectance monitoring as a tool for water stress detection in greenhouses: A review. *Biosyst. Eng.*, 151: 374-398.

- Katsoulas, N., Kittas, C., Bartzanas, T., & Savvas, D. (2014). Use of a Decision Support System for Management of the Drainage Solution in Semi-Closed Hydroponic Systems under Different Drainage Fractions. *Acta Hortic.*, 1037: 1067–1074.
- Katsoulas, N., Savvas, D., Tsirogiannis, I., Merkouris, O., Kittas, C. (2009). Response of an eggplant crop grown under Mediterranean summer conditions to greenhouse fog cooling. *Sci. Hort.*, 123: 90-98.
- Katsoulas, N., Sapounas, A., De Zwart, F., Dieleman, J.A., Stanghellini, C. (2015). Reducing ventilation requirements in semi-closed greenhouses increases water use efficiency. *Agric. Water Manag.*, 156: 90–99.
- Knaus, U., Palm, H. W. (2017). Effects of the fish species choice on vegetables in aquaponics under spring-summer conditions in northern Germany (Mecklenburg Western Pomerania). *Aquacult.*, 473, 62-73.
- Koech, R., Langat, P., (2018). Improving irrigation water use efficiency: A review of advances, challenges and opportunities in the Australian context. *Water* 10: 1771.
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecol. Econ.*, 143, 37–46.
- Koyro, H.W. (2006). Effect of salinity on growth, photosynthesis, water relations and solute composition of the potential cash crop halophyte *Plantago coronopus* (L.). *Environ. Exp. Bot.*, 56: 136–146.
- Krauss, S., W.H. Schnitzler, J. Grassmann, and M. Voitke. (2006). The influence of different electrical conductivity values in a simplified recirculating soilless system on inner and outer fruit quality characteristics of tomato. *J. Agr. Food Chem.* 54(2):441–448.
- Lazof, D., LaEuchli, A. (1991). The nutritional status of the apical meristem of *Lactuca sativa* as affected by NaCl salinization: an electron-probe microanalytic study. *Planta*, 184: 334-342.
- Leoni S., Pisanu B. and Grudina R. (1994). A new hydroponic system tomato greenhouse cultivation: High density aeroponics system (hdas). *Act Hort*, 361: 210-217.

- Livia, I. T. T., & Fernando, C. G. M. (2012). Nutrient Solutions for Hydroponic Systems. *Hydroponics A Standard Methodology for Plant Biological Researches*. InTech, 1-22.
- Love, D.C., Fry, J.P., Li, X., Hill, E.S., Genello, L., Semmens, K., Thompson, R.E. (2015). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquacult*, 435(11):67–74.
- Lykas, C., Katsoulas, N., Giaglaras, P., & Kittas, C. (2006). Electrical Conductivity and pH Prediction in a Recirculated Nutrient Solution of a Greenhouse Soilless Rose Crop. *Journal of Plant Nutrition*, 29: 1585- 1599..
- Majid, M., Khan, J.N., Shah, Q.M.A, et al. (2021) Evaluation of hydroponic systems for the cultivation of Lettuce (*Lactuca sativa* L., var. Longifolia) and comparison with protected soil-based cultivation. *Agric Water Manage*, 245: 106572.
- Marcelis, L.F.M., Brajeul, E., Elings, A., Garate, A., Heuvelink, E. and de Visser, P.H.B. (2005). Modelling nutrient uptake of sweet pepper. *Acta Hortic.*, 691: 285-292.
- 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.*, 971-980.
- Mavrogianopoulos, G., Savvas, D. and Vogli, V. (2002). Influence of NaCl salinity on half of the root system of hydroponically grown tomato on growth, yield and tissue mineral composition. *J. Hort. Sci. Biotech.*, 77(5):557-564.
- Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell Environ.*, 25: 239–250.
- Munns, R., James, R.A., Läuchli, A. (2006). Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *J. Exp. Bot.*, 57: 1025–1043.
- Muñoz, P., Paranjpe, A., Montero, J. I., and Antón, A. (2012). Cascade crops: an alternative solution for increasing sustainability of greenhouse tomato crops in mediterranean zone. *Acta Hortic.* 927:801–805.
- Munoz, P., Paranjpe, A., Montero, J. I., & Antón, A. (2012). Cascade crops: An alternative solution for increasing sustainability of greenhouse tomato crops in mediterranean zone. *Act. Hort.*, 927: 801–805.

- Nederhoff, E. and C. Stanghellini. (2010). Water Use Efficiency of Tomatoes in Greenhouses and Hydroponics. *Practical Hydroponics and Greenhouses*, 115: 52-59.
- Nelson, W. C. (1991). Physical Properties of and Plant Responses to Rockwool-amended Media. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 115(3):375-381.
- Nikolaou G., Neocleous D., Katsoulas N., Kittas C. (2017). Modelling transpiration of soilless greenhouse cucumber and its relationship with leaf temperature in a Mediterranean climate. *Emir. J. Food Agric*, 29 (12): 911-920.
- Nkansah G.O. and Ito T., (1995). Comparison of mineral absorption and nutrient composition of heat-tolerant and non heat-tolerant tomato plants at different rootzone temperatures. *Journal of Horticultural Science*, 70(3): 453-460
- Nukaya, A., Voogt, W., Sonneveld C. (1991). Effects of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  and Cl ratios on tomatoes grown in a recirculating system. *Acta Hortic.*, 294: 297-304.
- Panta, S. F. (2014). Halophyte agriculture: Success stories. *Environmental and Experimental Botany*, 107: 71–83.
- Pardossi, A., Malorgio, F., Incrocci, L., Tognoni, F. (2006). Hydroponic technologies for greenhouse crops. In *Crops: Quality, Growth and Biotechnology*, Dris, R., Ed., WFL Publisher: Helsinki, Finland. 360–378.
- Parida, A.K., Das, A.B. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 60: 324–349.
- Petersen, K., Willumsen, J., Kaak, K. (1998). Composition and taste of tomatoes as affected by increased salinity and different salinity sources. *J. Hort. Sci. & Biotech.*, 73: 205-215.
- Pitann, B., Schubert, S., Mühling, K.H. (2009). Decline in leaf growth under salt stress is due to an inhibition of  $\text{H}^+$ -pumping activity and increase in apoplastic pH of maize leaves. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 172: 535–543.
- Putra, P.A., Yuliando, H. (2015). Soilless culture system to support water use efficiency and product quality: A review. *Agric. Agric. Sci. Procedia*, 3: 283–288.
- Rakocy J.E., Master M.P., Losordo T.M. (2006). Recirculating aquaculture tank production system : Aquaponics – integrating fish and plant culture. SRAC publication no. 454. USDA.

- Rakocy, J.E., Bailey, D.S., Shultz, K.A., and Cole, W.M. (1997). Development of an aquaponic system for the intensive production of tilapia and hydroponic vegetables. *Aquaponics Journal*, 12-13.
- Resh, H., (2013). *Hobby Hydroponics*. 2nd Edition. CRC Press. Boca Raton.
- Rodriguez I.R., Miller G.L., (2000) - Using a chlorophyll meter to determine the chlorophyll concentration, nitrogen concentration, and visual quality of St. Augustinegrass. *Hort. Science*, 35(4): 751-754.
- Salisbury F., Ross C., (1969). *Plant Physiology*. Wadsworth Publishing Company, Inc., Belmont, California
- Santos Junior, J.A., Gheyi, H.R., Filho, D.H.G., Soares, F.A.L., Dias, N.D.S. (2013). Efficiency of water use in sunflower grown in hydroponic system under saline stress. *Eng. Agric.*, 33:718–729.
- Savvas, D. (2001). Nutritional management of vegetables and ornamental plants in hydroponics. In R. Dris, R. Niskanen & S.M. Jain, eds. *Crop Management and Postharvest Handling of Horticultural Products*, 37–87. Vol. I: Quality Management. Science Publishers, Enfield, NH, USA.
- Savvas, D. (2002). Automated replenishment of recycled greenhouse effluents with individual nutrients in hydroponics by means of two alternative models. *Biosyst. Eng.*, 83: 225-236.
- Savvas, D., Gianquinto, G., Tuzel, Y., Gruda, N. (2013). *Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops, Principles for Mediterranean Climate Areas*. 12. Soilless Culture, Paper 217, FAO, Plant Production and Protection, 303–354.
- Savvas, D., Mantzos, N., Barouchas, P.E., Tsirogiannis, I.L., Olympios, C., Passam, H.C. (2007). Modelling salt accumulation by a bean crop grown in a closed hydroponic system in relation to water uptake. *Sci. Hortic.* 111: 311–318.
- Savvas, D., Passam, H.C., Olympios, C. (2006). Effects of ammonium nitrogen on lettuce grown on pumice in a closed hydroponic system. *Hort. Science*, 41(7):1667–1673.
- Savvas, D., Savvas, A., Ntatsi, G., Ropokis, A., Karapanos, I., Krumbein, A., Olympios, C. (2011). Effects of three commercial rootstocks on mineral nutrition, fruit yield, and quality of salinized tomato. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 174:154–162.



- Shannon, M.C., Grieve, C.M., Lesch, S.M., Draper, J.H. (2000). Analysis of salt tolerance in nine leafy vegetables irrigated with saline drainage water. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 25(5):658–664.
- Sharma P., (2015) - Chlorophyll fluorescence parameters, SPAD chlorophyll and yield in brassica cultivars. *Journal of Oilseed Brassica*, 6(2): 249-256.
- Shi, H., Quintero, F. J., Pardo, J. M., Zhu, J -K. (2002). The putative plasma membrane  $\text{Na}^+ - \text{H}^+$  antiporter SOS1 controls long-distance  $\text{Na}^+$  transport in plants. *Plant Cell*, 14: 465-477.
- Silva, M.G. da, Soares, T.M., Gheyi, H.R., Oliveira, I. de S., Silva Filho, J.A. da, Carmo, F.F. (2016). Frequency of recirculation of nutrient solution in hydroponic cultivation of coriander with brackish water. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 20 (5).
- Sim C.C., Zaharah A.R., Tan M.S., Goh K.J. (2015) -Rapid determination of leaf chlorophyll concentration, photosynthetic activity and NK concentration of *Elaeis guineensis* via correlated SPAD-502 chlorophyll index. *Asian Journal of Agricultural Research*, 9(3):132-138.
- Singh, D. T. (1982). Effects of radiation, temperature and humidity on photosynthesis, transpiration and water use efficiency of oilseed rape (*Brassica campestris* L.). *Biol. Plant.* 24(2):130-135.
- Sonneveld, C. (1995). Fertigation in the greenhouse industry. In: Proc. of the Dahlia Greidinger Intern. Symp. on Fertigation. Technion - Israel Institute of Technology, Haifa, 1995: 121-140.
- Sonneveld, C. (2002). Composition of nutrient solution, in Savvas, D., Passam, H. C. (eds.): *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*. Embryo Publications, Athens, Greece, pp. 179-210.
- Sonneveld, C. and Voogt, W. (2009). *Plant nutrition of greenhouse crops*. Dordrecht : Springer, ISBN 9789048125319.
- Stanghellini, C. (2014). Horticultural production in greenhouses: Efficient use of water. *Act Hort*, 1034:15-32.
- Stanghellini, C., Kempkes, F., Pardossi, A., Incrocci, L. (2005). Closed water loop in greenhouses: effect of water quality and value of produce. *Act Hort*, 691: 233-241.

- Sverko Grdic, Z., Krstinic Nizic, M. and Rudan, E. (2020). Circular economy concept in the context of economic development in EU countries. *Sustainability*, 12 (7): 3060.
- Taiz, L., Zeiger, E. (2002) *Plant physiology*, 3 rd edn, Sinauer Associates, Inc., Sunderland, Massachusetts, U.S.A.
- Tarchoune, I., Degl’Innocenti, E., Kaddour, R., Guidi, L., Lachaâl, M., Navari-Izzo, F., Ouerghi, Z. (2012). Effects of NaCl or Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> salinity on plant growth, ion content and photosynthetic activity in *Ocimum basilicum* L. *Acta Physiol. Plant.*, 34: 607–615.
- Tyson RV, Treadwell DD, Simonne EH. (2011). Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *Hort Technol*, 21:6-13.
- Tyson, R.V., E.H. Simonne, D.D. Treadwell, J.M. White, and A. Simonne. (2008a). Reconciling pH for ammonia biofiltration and cucumber yield in a recirculating aquaponic system with perlite biofilters. *Hort Science*, 43:719–724.
- Uddling J., Gelang-Alfredsson J., Piikki K., Pleijel, H. (2007) - Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. *Photosynthesis research*, 91(1): 37-46.
- Verwer, F.L.J.A. (1978). Research and results with horticultural crops grown in rockwool and nutrient film.
- Weathers, PJ. and Zobel, RD. (1992) *Aeroponics for the culture of organisms, tissues, and cells*. *Biotechnol Adv*, 10:93-115.
- White, P. J. (1998). Calcium channels in the plasma membrane of root cells. *Ann. Bot.*, 81: 173-183.
- White, P. J., Broadley, M. R. (2003). Calcium in plants. *Ann. Bot.*, 92: 487–511.
- Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., Lee, J.W., Khanal, S.K. (2017a). Nitrogen transformations in aquaponic systems: a review. *Aquacult*, 76, 9-19.
- Yolanda, D., Hindersah, H., Hadiatna, F., Triawan, M.A. (2017). Implementation of real-time fuzzy logic control for NFT-based hydroponic system on internet of things environment. *6th Int. Conf. Syst. Eng. Technol.*, 153–159.
- Zeroni, M., Gale, J., Ben-Asher, J. (1983) Root aeration in a deep hydroponics system and its effect on growth and yield of tomato. *Sci. Hort.*, 19: 213-220.

- Zörb, C., Noll, A., Karl, S., Leib, K., Yan, F., Schubert, S. (2005). Molecular characterization of Na<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> antiporters (ZmNHX) of maize (*Zea mays* L.) and their expression under salt stress. *J. Plant Physiol.*, 162: 55–66.
- Μαυρογιαννόπουλος Ν. Γ. (2006). Υδροπονικές Εγκαταστάσεις. Εκδόσεις: Σταμούλης, Αθήνα, Ελλάδα.
- Νεοκλέους, Δ. (2017). Μελέτη της απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων από κολοκυνθοειδή καλλιεργούμενα σε κλειστά υδροπονικά συστήματα σε συνθήκες υψηλής αλατότητας. Διδακτορική διατριβή. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής, Εργαστήριο Κηπευτικών Καλλιεργειών, Αθήνα.
- Οικονομάκης, Κ. (2007). Καλλιέργεια τομάτας με το σύστημα NFT. *Γεωργία & Κτηνοτροφία*, 12/2007, σελ. 58-62.
- Σάββας, Δ. (2007). Η υδροπονική καλλιέργεια τομάτας στο θερμοκήπιο. *Γεωργία & Κτηνοτροφία*, 12/2007, σελ. 42-56.
- Σάββας, Δ. (2009). Πρόσφατες εξελίξεις και διαφαινόμενες τάσεις στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες κηπευτικών. 23ο Συνέδριο της Ελληνικής Εταιρείας Επιστήμης Οπωροκηπευτικών, Χανιά, 23-26 Οκτωβρίου 2007, τόμος 13B, σ. 741-748.
- Σάββας, Δ. (2011). Καλλιέργειες εκτός Εδάφους: Υδροπονία, Υποστρώματα. Αθήνα, Εκδόσεις ΑγροΤύπος, σ. 420.