



Σχολή Γεωπονικών Επιστημών
Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος

Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος

Πτυχιακή Διατριβή
«Επαναχρησιμοποίηση απορροών υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας σε υδροπονική καλλιέργεια δυόσμου»



Χαραχούσος – Πατσίκας Θεόδωρος

Επιβλέπων καθηγητής: Κατσούλας Νικόλαος

Βόλος 2022

Επαναχρησιμοποίηση απορροών υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας σε υδροπονική
καλλιέργεια δυόσμου

Reuse of drainage solution in hydroponic crop tomato for hydroponic crop of spearmint

Τριμελής εξεταστική Επιτροπή

Νικόλαος Κατσούλας, Καθηγητής, Γεωργικές Κατασκευές-Θερμοκήπια

Σπύρος Πετρόπουλος, Αν. Καθηγητής, Λαχανοκομία

Ευθυμία Λεβίζου, Επ. Καθηγήτρια, Φυσιολογία Φυτών

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε σύμφωνα με τον Κανονισμό Εκπόνησης Πτυχιακής Εργασίας του ΤΓΦΠΑΠ

Ευχαριστίες

Με την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όλα τα άτομα που συνέβαλαν ώστε να υλοποιηθεί.

Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα και μέλος της τριμελούς επιτροπής, Καθηγητή κ. Νικόλαο Κατσούλα για την ανάθεση του θέματος της παρούσας εργασίας, καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές που μου προσέφερε καθ' όλη την διάρκεια της.

Επίσης θα ήθελα 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 την συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή.

Αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω την Ελένη Καρατσίβου για την αμέριστη βοήθεια της, τόσο στο πειραματικό μέρος, όσο και στη συγγραφή, μέσω των διορθώσεων και των πολύτιμων συμβουλών της.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, για την πολύτιμη υποστήριξη που μου προσέφεραν.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια και τους φίλους μου, που με στήριξαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	7
1.1 Υδροπονία	8
1.1.1 Πλεονεκτήματα χρήσης υδροπονικού συστήματος.....	8
1.1.2 Μειονεκτήματα χρήσης υδροπονικού συστήματος.....	9
1.1.3 Θρεπτικό διάλυμα.....	10
1.1.4 Χαρακτηριστικά θρεπτικού διαλύματος.....	11
1.2 Κατηγοριοποίηση υδροπονικών συστημάτων.....	13
1.2.1 Ανοιχτό κλειστό υδροπονικό σύστημα.....	13
1.2.2 Ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα.....	14
1.3 Υποστρώματα.....	15
1.3.1 Καλλιέργεια σε πετροβάμβακα	16
1.3.2 Καλλιέργεια σε περλίτη.....	17
1.4 Επίδραση της αλατότητας στη φωτοσύνθεση και τη διαπνοή	18
1.5 Δείκτης αποδοτικότητας χρήσης νερού (WUE).....	19
1.6 Ανοιχτό υδροπονικό σύστημα επάλληλων καλλιεργειών	20
1.7 Καλλιέργειες.....	21
1.7.1 Τομάτα.....	21
1.7.2 Δυόσμος.....	22
1.8 Σκοπός της εργασίας	23
2. Υλικά και Μέθοδοι.....	24
2.1 Εγκαταστάσεις και καλλιέργειες	24
2.2 Πειραματικός σχεδιασμός	27
2.3 Μεταχειρίσεις	28
2.4 Μετρήσεις.....	31
2.4.1 Ύψος.....	31
2.4.2 Συγκέντρωση χλωροφύλλης.....	31
2.4.3 Ρυθμός φωτοσύνθεσης και διαπνοής.....	32
2.4.4 Καταστροφικές συγκομιδές.....	34
2.5 Στατιστική ανάλυση	35
3. Αποτελέσματα	36
3.1 Ύψος φυτών δυόσμου	36
3.2 Χλωροφύλλη των φυτών δυόσμου	36
3.3 Φωτοσύνθεση των φυτών του δυόσμου	38
3.4 Διαπνοή των φυτών του δυόσμου	39

3.5 Δείκτης αποτελεσματικότητας νερού.....	40
3.6 Χλωρό βάρος της καλλιέργειας δυόσμου.....	42
3.7 Ξηρό βάρος της καλλιέργειας δυόσμου	43
3.8 Λόγος νωπού προς ξηρού βάρους των φυτών του δυόσμου	44
3.9 Νωπό βάρος φύλλων του δυόσμου.....	46
3.10 Ξηρό βάρος φύλλων του δυόσμου	47
3.11 Νωπό βάρος βλαστών του δυόσμου	48
3.12 Ξηρό βάρος βλαστών του δυόσμου.....	50
3.13 Λόγος νωπού βάρους των φύλλων προς νωπό βάρος βλαστών	51
3.14 Λόγος ξηρού βάρους των φύλλων προς ξηρό βάρος βλαστών	51
4. Συζήτηση	53
5. Συμπεράσματα.....	56
6. Βιβλιογραφία	58

Περίληψη

Η υψηλή αλατότητα και η έντονη λειψυδρία, αποτελούν κίνητρο για την εύρεση νέων μεθόδων παραγωγής αγροτικών προϊόντων, που θα αξιοποιούν με αειφορική και ορθολογική διαχείριση, το διαθέσιμο νερό. Το ανοιχτό υδροπονικό σύστημα επάλληλων καλλιεργειών, αποτελεί λύση των προαναφερθέντων προβλημάτων. Η αρχή λειτουργίας του είναι η αξιοποίηση του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος μιας πρωτεύουσας καλλιέργειας (τομάτας), για την κάλυψη των θρεπτικών αναγκών μιας δευτερεύουσας καλλιέργειας (δύσμου), που χαρακτηρίζεται από υψηλότερη ανθεκτικότητα στην αλατότητα. Στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασίας ήταν η αξιολόγηση των ποσοτικών χαρακτηριστικών του δύσμου (*Mentha spicata*), ως δευτερεύουσα καλλιέργεια, η οποία αρδεύεται από τις απορροές της πρωτεύουσας καλλιέργειας, τομάτας (*Solanum lycopersicum* cv. Elpida). Για την αξιολόγηση του συνδυασμού καλλιεργειών, τομάτας – δύσμου, εφαρμόστηκαν τέσσερις διαφορετικές μεταχειρίσεις με κοινό παράγοντα την τιμή της ηλεκτρο-αγωγιμότητας. Με εξαίρεση τον μάρτυρα, σε όλες τις άλλες μεταχειρίσεις γινόταν προσθήκη άλατος, NaCl, ώστε η ηλεκτρική αγωγιμότητα να φτάνει μέχρι την τιμή των 8 ds m^{-1} . Η πρώτη (T0), αποτελούνταν από τον μάρτυρα της πειραματικής μελέτης, όπου τα φυτά αρδεύονταν με πρότυπο θρεπτικό διάλυμα, ηλεκτρικής αγωγιμότητας 2.1 dS m^{-1} . Η δεύτερη μεταχείριση (T1) λάμβανε το πρότυπο διάλυμα μέντας με προσθήκη ποσότητας χλωριούχου νατρίου (NaCl). Η τρίτη μεταχείριση (T2), αποτελούνταν από ένα μείγμα πρότυπου διαλύματος και απορροών τομάτας, σε σταθερή αναλογία 1:1 και προσθήκη άλατος. Τέλος, η τελευταία μεταχείριση του πειράματος (T3), αρδεύεται εξ ολοκλήρου από τις απορροές της τομάτας, με προσθήκη ποσότητας NaCl, έως την τιμή στόχου της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, κατά την πρώτη συγκομιδή καμία μεταχείριση δε διέφερε σημαντικά στην παραγωγή βιομάζας, με τα φυτά του μάρτυρα να έχουν τη μικρότερη απόδοση. Στην δεύτερη συγκομιδή πιο παραγωγική ήταν η μεταχείριση που αρδεύονταν με ανάμιξη, 1:1 πρότυπο διάλυμα και απορροές, και προσθήκη NaCl (T1), ενώ στην τρίτη συγκομιδή δεν παρατηρήθηκαν στατιστικές διαφορές. Επιπλέον, τη μεγαλύτερη τιμή στιγμιαίας WUE παρουσίασαν, η μεταχείριση (T1) και ο μάρτυρας (T0). Με την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, διαπιστώνεται ότι, η μεταχείριση με ανάμιξη (απορροών - πρότυπο διάλυμα) και προσθήκη NaCl, (T1) προτείνεται ως η καταλληλότερη για την καλλιέργεια του δύσμου, σε σύγκριση με τις άλλες μεταχειρίσεις.

1. Εισαγωγή

Με την εκθετική αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, το 2050 θα είναι αναγκαία η κάλυψη των διατροφικών αναγκών για περίπου 9 έως 10 δισεκατομμύρια ανθρώπους (FAO, 2017). Ταυτόχρονα, έχει υπολογιστεί ότι το 50% της καλλιεργήσιμης γης σε όλο τον κόσμο θα είναι ακατάλληλο για γεωργική χρήση (Gashgari et al., 2018). Ως λύση, για να υπάρξει επισιτιστική ασφάλεια στο μέλλον, είναι η διαχείριση των φυσικών πόρων με βιώσιμο τρόπο. Με τον περιορισμό του αρδευτικού νερού και την παράλληλη υποβάθμιση των εδαφών, είναι αναγκαίο η δημιουργία νέων βιώσιμων τρόπων παραγωγής γεωργικών προϊόντων (AlShrouf, 2017).

Η αλατότητα των εδαφών και του νερού αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους αβιοτικούς περιορισμούς στην παγκόσμια παραγωγή τροφίμων και ιδιαίτερα σε ημίξηρες και άνυδρες περιοχές. Σε αυτές τις περιοχές, είναι κοινή πρακτική να χρησιμοποιούνται αλατούχα υπόγεια ύδατα για την άρδευση των καλλιεργειών (Rhoades et al., 1992). Επίσης, όλο και περισσότερο χρησιμοποιούνται και λύματα για την άρδευση των καλλιεργειών, με στόχο την εξοικονόμηση νερού (Tanji and Kielen, 2002, Qadir et al., 2010). Ωστόσο, περίπου 1 δισεκατομμύριο εκτάρια γης υπολογίζεται ότι πλήττονται από την αλατότητα (Ivushkin et al., 2019), τα οποία αυξάνονται κάθε χρόνο (Qadir et al., 2014).

Τα υδροπονικά συστήματα θεωρούνται επί του παρόντος, τα πιο αποδοτικά στην παραγωγή αγροτικών προϊόντων. Συγκριτικά με τη συμβατική γεωργία στο έδαφος καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο (Huo et al., 2020). Αν και αυτά τα συστήματα παράγουν υψηλής ποιότητας φρούτα και λαχανικά, με σχετικά μικρότερη χρήση εντομοκτόνων και φυτοφαρμάκων, η απόρριψη των απορροών από το ανοικτό σύστημα υδροπονίας, αποτελεί το μεγαλύτερο μειονέκτημα τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές ποσότητες νερού και λιπασμάτων να καταλήγουν στο περιβάλλον (Hultberg et al., 2013).

Επιβάλλεται λοιπόν, η δημιουργία βελτιωμένων υδροπονικών συστημάτων που θα μειώνουν τις εκροές λιπασμάτων και χημικών ουσιών στο περιβάλλον. Αναγκαία είναι και η αύξηση της αποδοτικότητας χρήσης του νερού (WUE), ειδικά σε περιοχές με παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας, όπως είναι οι παραμεσόγειες περιοχές. Μια λύση, μπορεί να αποτελέσει το ανοικτό σύστημα επάλληλων καλλιεργειών, όπου

επιλύει τα προβλήματα του κλειστού συστήματος, που θα αναφερθούν σε επόμενη παράγραφο.

Στο σύστημα αυτό επαναχρησιμοποιείται το απορρέον θρεπτικό διάλυμα μιας καλλιέργειας με χαμηλή αντοχή στην αλατότητα, όπως είναι η τομάτα, σε μια δευτερεύουσα καλλιέργεια που είναι πιο ανεκτική στην αλατότητα, όπως είναι τα αρωματικά φυτά (Avdouli et al., 2021).

1.1 Υδροπονία

Η υδροπονία ή η καλλιέργεια εκτός εδάφους είναι η τεχνική με την οποία καλλιεργούνται φυτά εντός θρεπτικών διαλυμάτων. Παρέχονται έτσι, όλα τα θρεπτικά στοιχεία που χρειάζονται για τη βέλτιστη ανάπτυξη των φυτών με ή χωρίς τη χρήση υποστρωμάτων όπως ο βερμικουλίτης, ο πετροβάμβακας, η τύρφη κ.λπ. που προσφέρουν μηχανική υποστήριξη. Ο όρος υδροπονία σύμφωνα με τους Trefitz και Omaye (2016) προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις «ύδωρ» που σημαίνει νερό και «πόνος» που σημαίνει εργασία. Αν και ο όρος της υδροπονίας και της καλλιέργειας εκτός εδάφους ταυτίζονται τα τελευταία χρόνια, ωστόσο θα θεωρούνταν πιο σωστή η χρήση της υδροπονίας μόνο σε καλλιέργειες που δεν χρησιμοποιούν κάποιο υπόστρωμα ανάπτυξης, ενώ ο όρος της καλλιέργειας εκτός εδάφους (soiless) στις καλλιέργειες με υπόστρωμα.

1.1.1 Πλεονεκτήματα χρήσης υδροπονικού συστήματος

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση ενός συστήματος υδροπονίας. Αυτά τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν την εξοικονόμηση του νερού, την περιορισμένη εφαρμογή φυτοφάρμακων, τον πλήρη έλεγχο των θρεπτικών συστατικών που παρέχονται στα φυτά και την αυξημένη παραγωγικότητα αυτών (Barbosa et al., 2015).

Πιο συγκεκριμένα όταν εφαρμόζονται σε ελεγχόμενο περιβάλλον, τα υδροπονικά συστήματα μπορούν να σχεδιαστούν για να υποστηρίξουν συνεχή παραγωγή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους (Brechner et al., 2013).

Επιπλέον, με την απουσία του εδάφους περιορίζονται αρκετά οι προσβολές των φυτών από παθογόνους οργανισμούς, που έχουν σαν αποτέλεσμα την μείωση της παραγωγής στις συμβατικές καλλιέργειες (Vallance et al., 2011).

Άξιο αναφοράς είναι και η δυνατότητα που παρέχουν αυτά τα συστήματα στην ενσωμάτωση συστημάτων αυτοματισμού, βελτιστοποιώντας την αποδοτικότητα του συστήματος, μειώνοντας την πιθανότητα ανθρώπινου λάθους και παράλληλα μειώνοντας το κόστος των απαιτούμενων εργασιών (Modu et al., 2020).

Από περιβαλλοντικής άποψης, το υδροπονικό σύστημα μπορεί να εφαρμοστεί σε μη καλλιεργήσιμες εκτάσεις του κόσμου, όπως ξηρές ή αστικές περιοχές. Υπολογίζεται ότι έως και το 65% της επιφάνειας της γης ταξινομείται ως άνυδρη και ο αριθμός των ανθρώπων που ζουν σε αστικές περιοχές είναι σήμερα 54% και αναμένεται να αυξηθεί έως και 66% έως το 2050 (FAO, 2013).

Επιπλέον, με την εφαρμογή κατάλληλων τεχνικών είναι εφικτή πέρα από την αύξηση της αποδοτικότητας χρήσης νερού (WUE), να μειωθεί και η σπατάλη των λιπασμάτων τα οποία ρυπαίνουν το περιβάλλον και τα υδάτινα οικοσυστήματα, αυξάνοντας και την αποδοτικότητα στην χρήση τους (NUE) (Massa et al., 2020).

1.1.2 Μειονεκτήματα χρήσης υδροπονικού συστήματος

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση ενός υδροπονικού συστήματος, όπως και με όλα τα συστήματα παραγωγής αγροτικών προϊόντων, υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα.

Αρχικά, το κόστος αυτών των συστημάτων μπορεί να είναι χαμηλό αλλά και εξαιρετικά υψηλό. Αυτό εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως είναι το επίπεδο παραγωγής που είναι επιθυμητό, η τοποθεσία του υδροπονικού συστήματος, ο σχεδιασμός του και η χρήση νέων τεχνολογιών που επιτρέπουν την αυτοματοποίηση κάποιων εργασιών. Το κόστος κυρίως, εξαρτάται από το επιθυμητό ύψος της αρχικής επένδυσης (Mohammed 2018).

Μειονέκτημα της υδροπονίας είναι η αναγκαιότητα εκπαιδευμένου προσωπικού με βασικές γνώσεις χημείας - γεωπονίας. Η προετοιμασία του θρεπτικού διαλύματος είναι από τις πιο σημαντικές και απαιτητικές εργασίες. Η ανάμειξη των θρεπτικών συστατικών πρέπει να γίνεται με μεγάλη ακρίβεια, ενώ παράλληλα πρέπει να παίρνονται μετρήσεις του pH και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του διαλύματος (Richa et al., 2020).

Στα κλειστά υδροπονικά συστήματα, εγκυμονεί ο κίνδυνος εξάπλωσης φυτοπαθολόγων μικροοργανισμών μέσω της εφαρμογής του θρεπτικού διαλύματος.

Ωστόσο ο κίνδυνος περιορίζεται σε ικανοποιητικό βαθμό στα ανοιχτά υδροπονικά συστήματα (Olympios & Choukr-Allah 1999).

Τέλος, δεν θα μπορούσαμε να παραβλέψουμε και το πρόβλημα των κλειστών συστημάτων με την συσσώρευση αλάτων στο θρεπτικό διάλυμα, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει δυσμενείς επιπτώσεις για την καλλιέργεια (Kempren et al., 2016).

1.1.3 Θρεπτικό διάλυμα

Στην υδροπονία τα φυτά καλλιεργούνται χωρίς έδαφος και απορροφούν τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά, μέσω της άρδευσης τους. Θρεπτικό διάλυμα λοιπόν, είναι το υδατικό διάλυμα που μέσω της διάλυσης λιπασμάτων περιέχει όλα τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία για την καλλιέργεια σε κατάλληλες αναλογίες (Savvas et al., 2013). Τα χημικά στοιχεία που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών είναι συνολικά δεκαέξι. Μεταξύ των απαραίτητων στοιχείων ο C, το H και το O προσροφώνται από τα φυτά μέσω του αέρα και του νερού. Τα υπόλοιπα στοιχεία χωρίζονται σε μακροθρεπτικά, όπως το N, P, K, Ca, Mg, S, και σε ιχνοστοιχεία, όπως το Mn, Fe, B, Zn, Cu, Mo, Ni, Cl (Domingues et al., 2012).

Στις υδροπονικές καλλιέργειες, η απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων είναι συνήθως ανάλογη με τη συγκέντρωσή τους στο διάλυμα κοντά στην ριζόσφαιρα. Επηρεάζεται δε από πολλούς περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως είναι η αλατότητα, η οξυγόνωση, η θερμοκρασία, το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος, η ένταση του φωτός, η φωτοπερίοδος και η υγρασία του αέρα (Genuncio et al., 2012). Καθένα από τα θρεπτικά συστατικά έχει τουλάχιστον μία λειτουργία μέσα στο φυτό και η περίσσεια ή η έλλειψή του οδηγεί σε συμπτώματα τροφопενίας ή τοξικότητας.

Η διαχείριση του pH του θρεπτικού διαλύματος είναι μια σημαντική πρόκληση στα υδροπονικά συστήματα. Το βέλτιστο pH στη ριζόσφαιρα των περισσότερων καλλιεργειών που καλλιεργούνται υδροπονικά κυμαίνεται από 5.5 έως 6.5. Τιμές λίγο χαμηλότερες ή υψηλότερες από αυτό το εύρος δεν προκαλούν προβλήματα στις περισσότερες καλλιέργειες. Ωστόσο, όταν διατηρούνται οριακές τιμές του βέλτιστου εύρους pH, ο κίνδυνος υπέρβασης ή πτώσης κάτω από τα όρια αυτά για κάποιο χρονικό διάστημα αυξάνεται λόγω του περιορισμένου όγκου θρεπτικού διαλύματος που είναι διαθέσιμο για κάθε φυτό. Τέλος, έκθεση των φυτών σε pH μεγαλύτερο από

7 ή μικρότερο από 5, έχει ως επίπτωση τον περιορισμό της ανάπτυξης τους (Putra & Yuliando, 2015).

1.1.4 Χαρακτηριστικά θρεπτικού διαλύματος

Η αλατότητα είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ανάπτυξη των καλλιεργειών και πρέπει να παρακολουθείται στενά στα υδροπονικά συστήματα. Μπορεί να βλάψει το φυτό μέσω της οσμωτικής καταπόνησης, των τοξικών επιδράσεων των ιόντων που μετατοπίζονται στα φωτοσυνθετικά ενεργά φύλλα και των διαταραχών στην απορρόφηση κάποιων θρεπτικών στοιχείων (Munns, 2002). Πρόσφατα ευρήματα υποδεικνύουν ότι η εγγενής ανοχή στην αυξημένη αλατότητα ενός φυτικού είδους καθορίζεται εν μέρει, από την ικανότητά του να αντιμετωπίζει την ανεπάρκεια θρεπτικών στοιχείων υπό αυτές τις συνθήκες (Orsini et al., 2013).

Αρχικά, η ικανότητα απορρόφησης νερού από το ριζικό σύστημα των φυτών μειώνεται και η απώλεια νερού από τα φύλλα επιταχύνεται λόγω της οσμωτικής καταπόνησης (Munns, 2005). Το οσμωτικό στρες προκαλεί διάφορες φυσιολογικές μεταβολές, όπως είναι η καταστροφή των κυτταρικών μεμβρανών, τροφοπενίας, μείωση της ικανότητας αποτοξίνωσης των κυττάρων από τις δραστικές μορφές οξυγόνου, μείωση της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας και η μείωση στο άνοιγμα των στομάτων (Munns & Tester 2008, Rahnama et al., 2010).

Μία από τις πιο επιζήμιες επιπτώσεις της αλατότητας είναι η συσσώρευση ιόντων Na^+ και Cl^- στους ιστούς των φυτών. Η είσοδος τόσο του Na^+ όσο και του Cl^- στα κύτταρα προκαλεί διατάραξη της ιοντικής ισορροπίας και η υπερβολική πρόσληψη μπορεί να προκαλέσει σημαντικές φυσιολογικές διαταραχές. Επίσης η υψηλή συγκέντρωση Na^+ αναστέλλει την πρόσληψη των ιόντων K^+ που είναι βασικό θρεπτικό στοιχείο για την αύξηση και ανάπτυξη των φυτών, με αποτέλεσμα την μείωση της παραγωγής (Lopez and Satti, 1996).

Σαν απόκριση στην αυξημένη αλατότητα, η παραγωγή των ROS μέσα στα κύτταρα όπως είναι το οξυγόνο, το υπεροξείδιο, η ρίζα υδροξυλίου και το υπεροξείδιο του υδρογόνου ενισχύεται, με αποτέλεσμα την δημιουργία οξειδωτικών βλαβών σε διάφορα κυτταρικά συστατικά όπως είναι οι πρωτεΐνες, τα λιπίδια και το DNA, διακόπτοντας έτσι τις βασικές κυτταρικές λειτουργίες των φυτών (Mahajan & Tuteja, 2005, Ahmad 2010).

Οι Neocleous και Savvas (2016) διεξήγαγαν μια μελέτη για τη δημιουργία εμπειρικών σχέσεων μεταξύ των αναλογιών πρόσληψης Na^+ /νερού και Cl^- /νερού και των συγκεντρώσεων Na^+ και Cl^- στη ριζόσφαιρα φυτών πεπονιού που καλλιεργούνται σε κλειστό υδροπονικό σύστημα. Αυτό το μοντέλο, καθώς και άλλα παρόμοια, θα μπορούσε να βοηθήσει στην ανάπτυξη ενός εργαλείου για τη σωστή διαχείριση των θρεπτικών συστατικών και στην ανάπτυξη πρακτικών διαχείρισης της αλατότητας, ειδικά για τις θερμοκηπιακές καλλιέργειες σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από κακής ποιότητας αρδευτικό νερό.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των θρεπτικών διαλυμάτων είναι ότι πρέπει να περιέχουν ιόντα και χημικές μορφές, που μπορούν να απορροφηθούν από τα φυτά. Έτσι στα υδροπονικά συστήματα η παραγωγικότητα των φυτών σχετίζεται στενά με την πρόσληψη θρεπτικών συστατικών και τη ρύθμιση του pH (Trejo-Téllez et al., 2012). Κάθε θρεπτικό συστατικό παρουσιάζει διαφορετικές αποκρίσεις στις αλλαγές του pH του θρεπτικού διαλύματος.

Οι Tyson et al. (2007) σε μια μελέτη για τον προσδιορισμό του ρυθμού νιτροποίησης σε ένα βιοφίλτρο περλίτη που ερχόταν σε επαφή με υδροπονικό θρεπτικό διάλυμα, χρησιμοποίησαν διαφορετικές συγκεντρώσεις NO_3^- και δύο επίπεδα pH (6.5 και 8.5). Διαπιστώθηκε ότι η νιτροποίηση επηρεάστηκε σημαντικά από το pH. Ο αυξημένος ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας σε σύγκριση με τον ρυθμό οξείδωσης των νιτροδών σε pH 8.5 είχε ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση NO_2^- σε επίπεδα κοντά σε εκείνα που είναι επιβλαβή για τα φυτά. Η πιθανότητα αύξησης των επιπέδων μη ιονισμένης αμμωνίας, η οποία μείωσε την πρόσληψη θρεπτικών συστατικών στα φυτά από την καθίζηση μικροθρεπτικών συστατικών, είναι ένα επιπλέον προβλήματα που σχετίζεται με το υψηλό pH.

Ο φώσφορος είναι ένα στοιχείο που εμφανίζεται σε μορφές που εξαρτώνται έντονα από το pH του περιβάλλοντος. Στη ζώνη της ρίζας αυτό το στοιχείο μπορεί να βρεθεί ως ιόντα PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} και H_2PO_4^- . Τα δύο τελευταία ιόντα είναι οι κύριες μορφές του P που λαμβάνονται από τα φυτά. Σε αδρανή υποστρώματα, η μεγαλύτερη ποσότητα P που είναι διαθέσιμη σε ένα θρεπτικό διάλυμα παρουσιάζεται όταν το pH του είναι ελαφρώς όξινο (pH 5.0). Σε αλκαλικά και πολύ όξινα διαλύματα η συγκέντρωση του P μειώνεται σημαντικά (Dysko et al., 2008).

Το κάλιο υπάρχει σχεδόν πάντα ως ελεύθερο ιόν σε ένα θρεπτικό διάλυμα με τιμές pH από 2.0 έως 9.0. Μόνο μικρές ποσότητες K^+ μπορούν να σχηματίσουν ένα διαλυτό σύμπλοκο με SO_4^{2-} ή μπορούν να ενωθούν με Cl^- (De Rijck & Schrevens,

1998). Τέλος, ο σίδηρος, ο χαλκός, ο ψευδάργυρος, το βόριο και το μαγγάνιο δεν είναι διαθέσιμα σε pH υψηλότερο από 6.5 (Tyson, 2007).

1.2 Κατηγοριοποίηση υδροπονικών συστημάτων

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι ταξινόμησης των υδροπονικών συστημάτων. Μια συνήθης κατάταξη είναι αυτή με κριτήριο την διαχείριση των απορροών του θρεπτικού διαλύματος. Δημιουργούνται δύο βασικές κατηγορίες, τα ανοιχτά όπου το απορρέων θρεπτικό διάλυμα απορρίπτεται στο περιβάλλον και δεν επαναχρησιμοποιείται, και τα κλειστά, στα οποία το θρεπτικό διάλυμα συλλέγεται και επαναχρησιμοποιείται στην ίδια καλλιέργεια. Στα κλειστά κατατάσσονται και τα ημίκλειστα υδροπονικά συστήματα όπου και αυτά επαναχρησιμοποιούν τις απορροές των καλλιεργειών, αλλά παράλληλα μια ποσότητα αυτών καταλήγει στο περιβάλλον.

1.2.1 Ανοιχτό κλειστό υδροπονικό σύστημα

Τα υδροπονικά συστήματα, που χρησιμοποιούν στερεά υποστρώματα είναι γνωστά ως ανοιχτά και όπως έχει προαναφερθεί η περίσσεια των απορροών καταλήγει στο έδαφος. Οι απορροές περιέχουν υψηλές ποσότητες ιόντων, όπως NO_3^- , PO_4^- , K^+ , Ca^{++} και Mg^{++} , με αποτέλεσμα να προκαλούν σημαντική μόλυνση του εδάφους και του υδροφόρου ορίζοντα (Rodríguez-Jurado et al., 2020). Αυτά τα συστήματα έχουν το μειονέκτημα ότι απαιτούν υψηλές εισροές νερού και λιπασμάτων, καθώς και ότι προκαλούν ρύπανση στο περιβάλλον (Kempen et al., 2016). Παρόλα αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως, ειδικά στις μεσογειακές χώρες, με πλεονέκτημα έναντι των κλειστών συστημάτων, την εύκολη διαχείριση της λίπανσης, καθώς δεν απαιτείται εξειδικευμένη γνώση (Incrocci et al., 2006).

Αντίθετα, τα κλειστά υδροπονικά συστήματα έχουν το σημαντικό πλεονέκτημα της επαναχρησιμοποίησης των απορροών μετά την αποστράγγιση τους από το υπόστρωμα, αποτρέποντας έτσι τις απώλειες των θρεπτικών στοιχείων και του νερού. Μειώνεται έτσι, ο κίνδυνος της ρύπανσης του εδάφους και των υπόγειων υδάτων (Komosa et al., 2011).

Στο κλειστό σύστημα, το θρεπτικό διάλυμα εφαρμόζεται στις ρίζες των φυτών, συλλέγεται σε δεξαμενές και αφού απολυμανθεί επιστρέφεται περιοδικά ξανά στην καλλιέργεια (Lee and Lee, 2015).

Εκτός από τα περιβαλλοντικά οφέλη, τα κλειστά υδροπονικά συστήματα μπορούν να προσφέρουν υψηλότερα οικονομικά κέρδη, καθώς μειώνουν την ποσότητα του νερού και των λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγή (Moreno-Pérez et al., 2015). Ωστόσο, ο κύριος λόγος που περιορίζει την επαναχρησιμοποίηση των απορροών και επομένως την αποδοτικότητα χρήσης νερού και λιπασμάτων, είναι η συσσώρευση αλάτων που μπορεί να προκαλέσει άνιση πρόσληψη και ανταγωνισμό μεταξύ των θρεπτικών συστατικών των φυτών (Herrero et al., 2014; Kempen et al., 2016).

Άνιση πρόσληψη μεταξύ των στοιχείων δημιουργούνται όταν το θρεπτικό διάλυμα περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις χλωριούχου νατρίου (NaCl), διττανθρακικών (HCO_3^-), ιόντων ασβεστίου (Ca^{++}) και μαγνησίου (Mg^{++}) (Dasgan & Ekici 2004). Επιπλέον το νερό άρδευσης στις μεσογειακές χώρες χαρακτηρίζεται από υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων, συμπεριλαμβανομένων όχι μόνο Na^+ και Cl^- αλλά και Ca^{++} , Mg^{++} και SO_4^- , δημιουργώντας ένα επιπλέον εμπόδιο στην υιοθέτηση ενός κλειστού υδροπονικού συστήματος (Sonneveld and Voogt, 2009).

Ως εκ τούτου, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και η συγκέντρωση Na χρησιμοποιούνται ως δείκτες, για να προσδιοριστεί, εάν είναι κατάλληλο το απορρέον διάλυμα για επαναχρησιμοποίηση στην καλλιέργεια (Katsoulas et al., 2015). Σε αρκετές περιπτώσεις η επαναχρησιμοποίηση των απορροών στην ίδια καλλιέργεια εγείρει αρκετούς προβληματισμούς που σχετίζονται με την διασφάλιση της υγείας της καλλιέργειας (Rodríguez-Jurado et al., 2020). Τέλος, με την εφαρμογή ενός ανοιχτού συστήματος, ο κίνδυνος εξάπλωσης φυτοπαθογόνων μικροοργανισμών είναι πολύ περιορισμένος (Cifuentes-Torres et al, 2021).

1.2.2 Ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα

Όπως προαναφέρθηκε, σε πολλές περιοχές το νερό άρδευσης χαρακτηρίζεται από υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα, αποτελώντας τροχοπέδη, ως προς την υιοθέτηση των κλειστών υδροπονικών συστημάτων. Υπό αυτές τις συνθήκες, μια εναλλακτική λύση είναι εφαρμογή ενός ημίκλειστου υδροπονικού συστήματος. Σε αυτό γίνεται επαναχρησιμοποίηση του θρεπτικού διαλύματος, μέχρι να αυξηθεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα του σε μη επιτρεπτά για την καλλιέργεια επίπεδα, και στη συνέχεια γίνεται η ολική αντικατάσταση του ή ένα μέρος αυτού (Massa et al, 2020).

Σύμφωνα με τους Stanghellini et al. (2005) η κακής ποιότητας αρδευτικού νερού μπορεί να είναι οικονομικά επιζήμιο, για τα κλειστά υδροπονικά συστήματα. Σε συνδυασμό με την εφαρμογή των περιβαλλοντικών κανόνων, όπου επιβάλλουν τον περιορισμό των απορρεόντων λιπασμάτων, η μονή λύση είναι η βελτίωση της ποιότητας του νερού μέσω της αφαλάτωσης ή της αξιοποίησης του βρόχινου νερού.

Η χρήση του ημίκλειστου συστήματος αποτελεί μια λύση για την διαχείριση της αλατότητας που συσσωρεύεται στο θρεπτικό διάλυμα. Για να αποφευχθεί μια ανεπιθύμητη αύξηση στην συγκέντρωση επιβλαβών ιόντων στη ριζόσφαιρα, δίνεται η δυνατότητα της περιοδικής απομάκρυνσης του θρεπτικού διαλύματος, ώστε να επιτραπεί η έκπλυση των αλάτων (Carmassi et al., 2007). Η διαδικασία αυτή έχει ως αντίκτυπο να χάνεται μέρος των θρεπτικών συστατικών που παρέχονται στην καλλιέργεια. Έτσι μειώνεται η αποτελεσματικότητα της επαναχρησιμοποίησης των απορροών με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης νερού και λιπασμάτων, αλλά και για την πρόληψη της ρύπανσης του περιβάλλοντος (Varlagas et al., 2010).

Μια επιπλέον εναλλακτική για να αξιοποιηθεί το απορρέον διάλυμα, είναι η συλλογή του και μετά από την εφαρμογή απαραίτητων χειρισμών (απολύμανση, ανάμειξη με νερό ή με άλλο θρεπτικό διάλυμα, ο έλεγχος της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και του pH), να εφαρμοστεί σε μια δευτερεύουσα καλλιέργεια που θα έχει λιγότερες απαιτήσεις σε θρεπτικά συστατικά και θα είναι ανεκτική στην υψηλή αλατότητα, μειώνοντας έτσι περαιτέρω την περιεκτικότητα σε λιπάσματα των απορροών, που θα καταλήξουν στο περιβάλλον (Rodríguez-Jurado et al., 2020).

1.3 Υποστρώματα

Η καλλιέργεια εκτός εδάφους (soilless culture) χρησιμοποιεί ως μέσο ανάπτυξης των ριζών και στήριξης των φυτών, κάποιο στερεό υπόστρωμα. Ως υπόστρωμα ορίζεται από τον Rodríguez-Delfín (2011), κάθε στερεό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο του εδάφους και χρησιμεύει ως μέσο ανάπτυξης των φυτών. Η κύρια λειτουργία του είναι να επιτρέπει στις ρίζες να αναπτυχθούν και να παρέχει μηχανική στήριξη στα φυτά. Η ανάπτυξη της ρίζας στο υπόστρωμα είναι ταχύτερη απ' ό,τι στο έδαφος. Υπάρχουν πολλοί τύποι υποστρωμάτων για υδροπονικά συστήματα και χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες: τα χημικά αδρανή που είναι κυρίως ανόργανα, και τα χημικά ενεργά που είναι οργανικά.

Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά σ' ένα υπόστρωμα σύμφωνα με τον Keith (2003) είναι η ικανότητα συγκράτησης νερού, η αεροπερατότητα και η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων. Η αναλογία της συγκράτησης του νερού και του αέρα, εξαρτάται από τους ενδιάμεσους χώρους που υπάρχουν εντός των κόκκων ή των ινών και τους χώρους που δημιουργούνται μεταξύ των κόκκων ή των ινών. Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (IAK) είναι η ικανότητα του υποστρώματος να προσροφά ή να απελευθερώνει ανταλλάξιμα κατιόντα που απαιτούνται για την ανάπτυξη των καλλιεργειών (Maher et al., 2008).

Δεν υπάρχει ιδανικό υπόστρωμα, διότι κανένα υπόστρωμα δεν έχει όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά, όπως είναι η χημική αδράνεια, να είναι δομικά σταθερό (ασυμπίεστο), η ικανότητα να διατηρεί αρκετή υγρασία για να παρέχει νερό και θρεπτικά συστατικά στα φυτά, να μην έχει μεγάλη εναλλακτική ικανότητα, να είναι εύκολα διαθέσιμο και φθινό (Ravin et al., 2002, Rodríguez-Delfín 2011).

Υπάρχουν αρκετά υποστρώματα που χρησιμοποιούνται στην υδροπονική καλλιέργεια, όπως είναι οι ίνες καρύδας, η διογκωμένη άργιλος, η τύρφη, πλάκες πετροβάμβακα, οι ελαφρόπετρες κ.λπ. Ένα καλό υπόστρωμα πρέπει να έχει επιπλέον, εκτός από τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν, pH μεταξύ 5.0 και 6.5, και να είναι αποστειρωμένο, ώστε να μην υπάρχουν προσβολές στην καλλιέργεια από μικροοργανισμούς (Yeager et al., 2007). Το κάθε υπόστρωμα έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά και διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Η επιλογή ενός συγκεκριμένου υποστρώματος καθορίζεται από πολλές μεταβλητές, όπως είναι το είδος του φυτού, το σύστημα που χρησιμοποιείται για την καλλιέργεια, την τιμή του υποστρώματος, το κόστος μεταφοράς, αλλά και την διαθεσιμότητα αυτού του υποστρώματος σε μια δεδομένη περιοχή (Domeño et al., 2011).

1.3.1 Καλλιέργεια σε πετροβάμβακα

Ο πετροβάμβακας κατασκευάζεται κυρίως από βασάλτη και ασβεστόλιθο μέσω της τήξης σε υψηλή θερμοκρασία που αγγίζουν τους 1600°C. Αυτό το υλικό είναι γενικά κατάλληλο για καλλιέργειες λόγω της σταθερής δομής, της υψηλής ικανότητας συγκράτησης νερού και του μέτριου πορώδους του (Sonneveld, 1991).

Οι υψηλές θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του πετροβάμβακα διασφαλίζουν ότι το υλικό καθίσταται ουσιαστικά χημικά και

βιολογικά αδρανές, καθιστώντας το απαλλαγμένο από τυχόν επιβλαβή έντομα, παθογόνους μικροοργανισμούς και σπόρους ζιζανίων. Αυτό είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα του πετροβάμβακα έναντι ορισμένων εναλλακτικών υποστρωμάτων που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή θερμοκηπιακών καλλιεργειών (Bussell & Mckennie, 2004).

Επιπλέον πλεονεκτήματα που έχει ο πετροβάμβακας είναι το υψηλό συνολικό πορώδες (Olymrios, 1992), καθώς και ότι μπορεί να αρδεύεται με μεγάλη συχνότητα αφού συγκρατεί το νερό με μικρότερες δυνάμεις συνάφειας, παρέχοντας τη βέλτιστη αναλογία αέρα και νερού για τη φυτική παραγωγή καθ' όλη τη καλλιεργητική περίοδο.

Ο πετροβάμβακας δεν αποικοδομείται και ούτε περιορίζει τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών, καθώς περισσότερο από το 98% του νερού και των λιπασμάτων που εφαρμόζονται είναι άμεσα διαθέσιμα για πρόσληψη από την καλλιέργεια και μπορούν γρήγορα να ανταποκριθούν σε αλλαγές του θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσία, όπως είναι η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) και του pH (Bussell & Mckennie, 2004).

1.3.2 Καλλιέργεια σε περλίτη

Ο περλίτης είναι ένα υαλώδες ηφαιστειακό πέτρωμα το οποίο περιέχει μικρή ποσότητα νερού, που αποτελεί το 2 με 5% της συνολικής σύστασής του. Το εμπορικό προϊόν παράγεται με θέρμανση του υλικού στους 760–1100°C. Το περιεχόμενο νερό, εσωτερικά του περλίτη, μετατρέπεται σε αέριο λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν. Ο όγκος του να αυξάνεται κατά 4-20 φορές συγκριτικά με τον αρχικό του όγκο, δημιουργώντας έτσι ένα ελαφρύ υλικό υψηλού πορώδους (Papadopoulos et.al., 2008).

Οι υψηλές θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του περλίτη διασφαλίζουν ότι το υλικό καθίσταται χημικά και βιολογικά αδρανές, απαλλαγμένο από επιβλαβή έντομα και παθογόνους μικροοργανισμούς. Ως αδρανές υλικό, η ανακύκλωση του περλίτη δεν δημιουργεί περιβαλλοντικά προβλήματα. Ωστόσο η επαναχρησιμοποίηση του περλίτη στην ανάπτυξη διαδοχικών καλλιεργειών χωρίς την σωστή επεξεργασία του, είναι δυνητικά επικίνδυνη λόγω της συμπίεσης του υλικού, της συσσώρευσης αλάτων και της μόλυνσης από μικροοργανισμούς (Hanna 2010).

Ο περλίτης έχει pH 7–7.5, χωρίς ρυθμιστική ικανότητα και δεν περιέχει θρεπτικά συστατικά. Όταν το pH είναι χαμηλό, υπάρχει κίνδυνος απελευθέρωσης Al στο διάλυμα (Olymrios, 1992). Η ισχυρή τριχοειδής του έλξη μετακινεί το διάλυμα από τον πυθμένα της σακούλας ή του δοχείου του υποστρώματος προς τις ρίζες, με τον ίδιο ρυθμό που τα φυτά προσλαμβάνουν νερό και θρεπτικά συστατικά, διατηρώντας την περίσσεια του διαλύματος μακριά από τις ρίζες. Ως εκ τούτου, επιτρέπει τις βέλτιστες συνθήκες υγρασίας κοντά στη ρίζα, σε αντίθεση με τον πετροβάμβακα, που είναι δύσκολο να διατηρηθούν τα βέλτιστα επίπεδα υγρασίας λόγω της κακής τριχοειδούς δράσης του (Asaduzzaman et.al., 2013).

1.4 Επίδραση της αλατότητας στη φωτοσύνθεση και τη διαπνοή

Η μειωμένη παραγωγικότητα που παρατηρείται σε πολλά φυτικά είδη που υπόκεινται σε υψηλά επίπεδα αλατότητας, συχνά συνδέεται με τη μείωση της φωτοσυνθετικής τους ικανότητας (Steduto et. al., 2000). Η μείωση μπορεί να οφείλεται στον περιορισμό της λειτουργίας των στομάτων, όπως είναι το κλείσιμο τους, μειώνοντας την στοματική αγωγιμότητα του φυτού (Rahnama et. al., 2010).

Άλλοι παράγοντες που ευθύνονται για την μείωση της φωτοσυνθετικής ικανότητας των φυτών, είναι η αποδόμηση των χλωροφυλλών (García et. al., 2002), η καταστροφή της δομής των χλωροπλαστών (Shu et. al., 2013), καθώς και η αποδόμηση των ενζυματικών πρωτεϊνών με λειτουργικό ρόλο στην φωτοσύνθεση (Munns & Tester 2008).

Πέρα από τις κυτταρικές αλλαγές που παρατηρούνται κατά την ωσμωτική καταπόνηση, έχει αναφερθεί ότι τα φυτά επηρεάζονται σε μορφολογικό και ανατομικό επίπεδο. Η αλατότητα αυξάνει την πυκνότητα των τριχιδίων και μειώνει το ύψος του φυτού, την φυλλική επιφάνεια, το μέγεθος των φύλλων, και την πυκνότητα των στομάτων (Wei et. al., 2016). Στο πείραμα των Khorasaninejad et. al. (2010) τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν έδειξαν ότι η αυξημένη αλατότητα επηρέασε αρνητικά την ανάπτυξη φυτών μέντας.

Σημειώθηκε σημαντική μείωση στο μήκος του στελέχους, στο νωπό βάρος των βλαστών, στο νωπό βάρος των ρίζας. Επίσης παρατηρήθηκε μείωση και στο ξηρό βάρος των βλαστών, στο ξηρό βάρος των ριζών, στο μήκος των μεσογονάτιων διαστημάτων, στη παραγόμενη βιομάζα, και στο ποσοστό αιθέριου ελαίου. άξιο

αναφοράς είναι ότι η μέντα δεν κατάφερε να ανταπεξέλθει στην μεταχείριση με τα 150 mmol NaCl.

1.5 Δείκτης αποδοτικότητας χρήσης νερού (WUE)

Η αποδοτικότητα χρήσης νερού, water use efficiency, (WUE), είναι ένα από τα σημαντικότερα θέματα για τη γεωργία σε ημίξηρες περιοχές, λόγω των αυξανόμενων αρδευόμενων περιοχών και των υψηλών υδατικών αναγκών των καλλιεργειών, οι οποίες καταναλώνουν περίπου το 70% του διαθέσιμου νερού στον άνθρωπο.

Ο δείκτης αποτελεσματικότητας μπορεί να μετρηθεί σε διαφορετικά επίπεδα, που κυμαίνονται από τις στιγμιαίες μετρήσεις σε επίπεδο φύλλου, σε επίπεδο φυτού, καθώς και σε επίπεδο καλλιέργειας, με την κάθε μέθοδο να έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα (Medrano et al., 2015).

Οι περισσότερες μελέτες σχετικά με την αποδοτικότητα νερού χρησιμοποιούν τις στιγμιαίες μετρήσεις της φωτοσύνθεσης και της διαπνοής των φύλλων, με την υπόθεση ότι είναι αντιπροσωπευτικές της WUE ολόκληρου του φυτού (McCarthy et al., 2011). Ο λόγος του ρυθμού φωτοσύνθεσης προς το ρυθμό διαπνοής των φύλλων ονομάζεται στιγμιαία αποδοτικότητα χρήσης νερού και εκφράζει τα μmol του διοξειδίου του άνθρακα που δεσμεύονται από το φύλλο ανά mmol νερού που χρησιμοποιείται για τη διαπνοή (Medrano et al., 2010).

Μια λύση, ώστε να αυξηθεί ο δείκτης αποτελεσματικότητας νερού στα υδροπονικά συστήματα θα μπορούσε να είναι η υιοθέτηση του κλειστού ή ημίκλειστου υδροπονικού συστήματος, όταν πρόκειται για μονοκαλλιέργεια. Με την επαναχρησιμοποίηση του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος, εκτός από την αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου νερού, παρατηρείται και καλύτερη αξιοποίηση των λιπασμάτων (Massa et al, 2020). Τα αποτελέσματα αυτά συνάδουν με την επιστημονική μελέτη των Katsoulas et al., 2015, όπου σε καλλιέργεια τομάτας, με την εφαρμογή του κλειστού υδροπονικού συστήματος, αποδείχθηκε ότι βελτιώνεται η αποτελεσματικότητα πρόσληψης νερού και λιπασμάτων.

Θα ήταν παράβλεψη να μην αναφερθεί η απώλεια του νερού, μέσω της εξατμισοδιαπνοής. Οι Zaragoza & Buchholz (2008) ανέδειξαν τη δυνατότητα ενός κλειστού θερμοκηπίου να ανακτά ένα μέρος της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση του νερού κατά περίπου 80%. Η μεγαλύτερη

δυσκολία ήταν η διατήρηση ιδανικών θερμοκρασιών, μέσω του παθητικού συστήματος ψύξης.

Επιπλέον, σε ημίκλειστο θερμοκήπιο, με την χρήση ψυκτικής μονάδας, δίνεται η δυνατότητα περιορισμού του αερισμού, με επακόλουθη τη μείωση των απωλειών νερού. Επιπροσθέτως, παρατηρήθηκε αύξηση της παραγωγής λόγω βελτιωμένων συνθηκών του περιβάλλοντος και χαμηλότερη χρήση νερού, λόγω της συλλογής και αξιοποίησης των υδρατμών, μέσω συμπύκνωσης στον εναλλάκτη θερμότητας. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί και η χαμηλότερη διαπνοή της καλλιέργειας κατόπιν εφαρμογής του προαναφερθέντος συστήματος (Katsoulas et al, 2015).

1.6 Ανοιχτό υδροπονικό σύστημα επάλληλων καλλιεργειών

Ένα από τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι παραμεσόγειες περιοχές είναι η υψηλή αλατότητα του αρδευτικού νερού, αποτελώντας τροχοπέδη στην υιοθέτηση και εφαρμογή των κλειστών συστημάτων υδροπονίας. Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, ένας από τους κύριους λόγους που εμποδίζει την επαναχρησιμοποίηση των απορροών στην ίδια καλλιέργεια, από την οποία προέρχεται είναι ότι περιέχει υψηλή συγκέντρωση Na, που μπορεί να δημιουργήσει αρκετά προβλήματα στη καλλιέργεια (Dasgan & Ekici 2005).

Μια άλλη τεχνική υδροπονίας μπορεί να περιορίσει τα προβλήματα που έχουν αναφερθεί παραπάνω. Ο λόγος γίνεται για το ανοιχτό υδροπονικό σύστημα επάλληλων καλλιεργειών όπου αποτελεί μια λύση συμβατή ακόμα και για τα θερμοκήπια χαμηλής τεχνολογίας (Elvanidi et al, 2020). Η αρχή του συστήματος αυτού είναι η καλλιέργεια ενός φυτικού είδους που θα χρησιμοποιούνταν και σε μονοκαλλιέργεια, με σχετικά υψηλές απαιτήσεις σε θρεπτικά στοιχεία. Αυτήν θα αποτελέσει την πρωτεύουσα καλλιέργεια του συστήματος. Ακολουθεί η δευτερεύουσα καλλιέργεια όπου θα αρδεύεται με τις απορροές της πρωτεύουσας, καθώς υπάρχει και η δυνατότητα αξιοποίησης διαδοχικά και άλλων καλλιεργειών.

Τα καλλιεργούμενα είδη που θα επιλεγθούν θα πρέπει να χαρακτηρίζονται ως ανεκτικά σε υψηλά επίπεδα αλατότητας, καθώς το θρεπτικό διάλυμα, που εφαρμόζεται ενδέχεται να έχει τα συσσωρευμένα άλατα από την προηγούμενη καλλιέργεια, όπως είναι το NaCl, CaCl₂, KNO₃ και το NaHCO₃ (Grattan et al., 2012). Ενδεικτικά παραδείγματα φυτών που δοκιμάστηκαν ως δευτερεύουσες καλλιέργειες

είναι το δενδρολίβανο, ο βασιλικός και η μέντα (García-Caparrós et al, 2018, Elvanidi et al, 2020).

Στο πείραμα του García-Caparrós και των συνεργατών του χρησιμοποιήθηκαν οι απορροές καλλιέργειας πεπονιού για την άρδευση μιας δευτερεύουσας καλλιέργειας δενδρολίβανου. Στα τελικά αποτελέσματα του πειράματος, διαπιστώθηκε μείωση του φρέσκου βάρους των φύλλων των φυτών δενδρολίβανου και εξοικονόμηση νερού και θρεπτικών στοιχείων, σε σύγκριση με τον μάρτυρα.

Άξιο αναφοράς αποτελεί και το πείραμα των Elvanidi et al, (2020), στο οποίο αξιολογήθηκε ο συνδυασμός της καλλιέργειας αγγουριού ως πρωτεύουσα, με το βασιλικό, το δενδρολίβανο και τη μέντα ως δευτερεύουσες καλλιέργειες. Επίσης, εξετάστηκε ο συνδυασμός της καλλιέργειας τομάτας για την άρδευση δευτερευόντων καλλιεργειών δυόσμου, άνηθου, σέλινου και μαϊντανού. Τα αποτελέσματα παρουσίασαν μείωση στα νιτρικά ιόντα που απομακρύνονταν στο περιβάλλον κατά 40% συγκριτικά με μια συμβατική μονοκαλλιέργεια. Επιπλέον η μέση κατανάλωση νερού των δευτερογενών καλλιεργειών μειώθηκε κατά 30% σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Συμπερασματικά επιτεύχθηκε σημαντική εξοικονόμηση λιπασμάτων και νερού.

Στόχος της πολυκαλλιέργειας πέρα από την αύξηση της αποδοτικότητας χρήσης νερού (WUE), και την αποδοτικότητα στην χρήση των λιπασμάτων (NUE), είναι και η αύξηση της παραγωγής ανά κυβικό μέτρο χρησιμοποιούμενου νερού, δηλαδή την εξοικονόμηση του. Έτσι ελαχιστοποιείται η μόλυνση του περιβάλλοντος (Rodríguez-Jurado et al., 2020).

Όσο αναφορά στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της συγκεκριμένης διατριβής, εξετάστηκε η συγκαλλιέργεια της τομάτας (πρωτεύουσα καλλιέργεια) με τον δυόσμο (δευτερεύουσα καλλιέργεια). Παράλληλα με προσθήκη άλατος πραγματοποιήθηκε αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητάς των διαλυμάτων άρδευσης στα 8 dS m⁻¹, ώστε να παρατηρηθεί η επίδραση της λίπανσης στην καλλιέργεια του δυόσμου.

1.7 Καλλιέργειες

1.7.1 Τομάτα

Η τομάτα (*Solanum lycopersicum L.*) ανήκει στη βοτανική οικογένεια των Solanaceae, που περιλαμβάνει περίπου 4000 είδη που παρουσιάζουν υψηλή

μορφολογική ποικιλομορφία. Είναι πολυετές ποώδες φυτό, αν και σε εύκρατα κλίματα καλλιεργείται ως μονοετές. Το ριζικό σύστημα είναι πασσαλώδες και μπορεί να φτάσει σε βάθος 1.5 m, αν και οι περισσότερες ρίζες βρίσκονται στα πρώτα 0.6–0.7 m. Τα φύλλα είναι σύνθετα με 7–11 φυλλάρια. Τόσο τα φύλλα όσο και το στέλεχος είναι καλυμμένα από τρίχες. Τα άνθη είναι κίτρινα, έχουν πλάτος 1–3 cm κατά την πλήρη άνθηση και εμφανίζονται σε ταξιανθίες. Η μορφολογία των ανθέων ευνοεί την αυτογονιμοποίηση, αλλά είναι και ανεμόφιλα. Ο καρπός βοτανικά είναι ράγα που αποτελείται από σπόρους μέσα σε ένα σαρκώδες περικάρπιο που αναπτύχθηκε από την ωοθήκη, ενώ το σχήμα και το μέγεθος ποικίλλει (Pavan et al., 2009).

Η τομάτα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στη θερμική καταπόνηση, με βέλτιστες μέσες θερμοκρασίες ημέρας και νύχτας, που κυμαίνονται από 21 °C έως 29.5 °C και 18.5 °C έως 21 °C, αντίστοιχα. Μικρή αύξηση πάνω από μια μέση θερμοκρασία των 25 °C, μπορεί να βλάψει σημαντικά τα αναπαραγωγικά όργανα του φυτού (Ayenan et al., 2019). Οι περισσότερες εμπορικές ποικιλίες τομάτας είναι ευαίσθητες σε μέτρια επίπεδα αλατότητας έως 2.5 dS m⁻¹, χωρίς ωστόσο να παρατηρείται σημαντική μείωση των αποδόσεων (Singh et al., 2012). Τέλος το ιδανικό pH του θρεπτικού διαλύματος κυμαίνεται από 5.5 έως 6.5 (Akl et al., 2003).

1.7.2 Δυόσμος

Ο δυόσμος (*Mentha spicata L.*) ανήκει στην οικογένεια Lamiaceae, μια οικογένεια που αποτελείται από 260 γένη και 7000 είδη που αναπτύσσονται κάτω από ένα ευρύ φάσμα αγροκλιματικών συνθηκών (Brahmi et al., 2017). Το γένος *Mentha L.* περιλαμβάνει 42 είδη και εκατοντάδες υποείδη (Salehi et al., 2018, Silva, 2020).

Ο δυόσμος είναι ένα πολυετές βότανο με εκτεταμένο ριζικό σύστημα, που φτάνει τα 30–100 cm σε ύψος. Οι βλαστοί έχουν όρθια ανάπτυξη, έχουν τετράγωνη διατομή, ενώ είναι λείοι ή φέρουν λίγες τρίχες. Τα φύλλα είναι ωοειδή έως λογχοειδή, μήκους 2–7 cm με οδοντωτά περιθώρια. Οι ταξιανθίες είναι πυκνές, μήκους 3–12 cm και πλάτους 5–10 mm. Τα άνθη έχουν ιώδες χρώμα, ενώ τα πέταλα είναι ενωμένα στην βάση τους και καταλήγουν σε λοβούς με σχισμή στο άκρο τους (Mahendran et al., 2021).

Ο δυόσμος έχει οικονομική σημασία και χρησιμοποιείται σε τρόφιμα, στην αρωματοποιία, στην φαρμακευτική βιομηχανία, αλλά και για την παραγωγή αιθέριου ελαίου, που συγκαταλέγεται στα 10 πιο εμπορεύσιμα στον κόσμο (Chrysargyris et al., 2017).

Οι κατάλληλες θερμοκρασίες κατά την περίοδο βλάστησης, κυμαίνονται μεταξύ 18 - 22 °C, ενώ το ιδανικό pH του θρεπτικού διαλύματος κυμαίνεται από 6 έως 7 (Vimolmangkang et al., 2010). Ο δυόσμος έχει ως βέλτιστη τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας τα 2.1 dS m⁻¹, ωστόσο κάποια πειράματα (Li Zhe et al., 2015, Zeljković et al., 2022) έχουν παρουσιάσει δεδομένα που δηλώνουν την πιθανή αυξημένη ανεκτικότητα στην αλατότητα ακόμα και για τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας που αγγίζουν τα 15 ds m⁻¹.

1.8 Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός του συγκεκριμένου πειράματος είναι η αξιολόγηση της επαναχρησιμοποίησης του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος της καλλιέργειας τομάτας (πρωτεύουσας καλλιέργειας), για την κάλυψη των αρδευτικών και θρεπτικών αναγκών της καλλιέργειας του δυόσμου (δευτερεύουσα καλλιέργεια), σε ανοικτό υδροπονικό σύστημα επάλληλων καλλιεργειών.

Η αξιολόγηση της καλλιέργειας του δυόσμου, έγινε με βάση τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της, τις λειτουργίες του φυτού, καθώς και την απόδοση της, κάτω από διαφορετικές στρατηγικές υδρολίπανσης. Με τις μεταχειρίσεις που πραγματοποιήθηκαν εξετάστηκε η επίδραση της λίπανσης με προσθήκη NaCl, έως την τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των 8 dS m⁻¹. Η τιμή της ηλεκτροαγωγιμότητας αποτέλεσε κοινό παράγοντα στις 3 μεταχειρίσεις, αλλά με διαφορετικές αναλογίες ανάμιξης απορροών και συνταγής θρέψης δυόσμου.

Απώτερος σκοπός, η αξιολόγηση του δείκτη αποτελεσματικότητας νερού που εκφράστηκε από τη σχέση του πηλίκου, ρυθμού φωτοσύνθεσης προς ρυθμού διαπνοής (Bacon, 2004).

2. Υλικά και Μέθοδοι

2.1 Εγκαταστάσεις και καλλιέργειες

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε ένα από τα καινοτόμα θερμοκήπια, με συστήματα αυτοματισμού, του τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας που ανήκει στο Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος. Το θερμοκήπιο εδρεύει στην περιοχή του Βελεστίνου, κοντά στο Βόλο (γεωγραφικό πλάτος $39^{\circ} 23'$, γεωγραφικό μήκος $22^{\circ} 45'$, υψόμετρο 76 m).

Η εφαρμογή του ανοιχτού υδροπονικού συστήματος πολυκαλλιέργειας με σκοπό την πραγματοποίηση του συγκεκριμένου πειράματος, έλαβε χώρο σε θερμοκήπιο γοτθικού τύπου, ύψους 7.4 m, εκτάσεως 1.440 m² του οποίου η οροφή ήταν καλυμμένη με φύλλα πολυαιθυλενίου, ενώ τα τοιχώματα με πολυκαρβονικά κυψελωτά φύλλα, διαπερατότητας 70%. Το θερμοκήπιο χωρίζεται εσωτερικά σε έξι θαλάμους των 240 m² (25 X 9,6 m) με τα 200 m² να είναι διαθέσιμα για τις καλλιέργειες και για το συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν πέντε συνολικά θάλαμοι, από του οποίους οι δύο ήταν για τις δευτερεύουσες καλλιέργειες και άλλοι δύο, ίσης έκτασης, για την εγκατάσταση της πρωτεύουσας καλλιέργειας και ένας για τον μηχανολογικό εξοπλισμό.

Οι συνθήκες περιβάλλοντος, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό του κάθε θαλάμου ελεγχόταν, μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, ο οποίος χρησιμοποιούσε ειδικό λογισμικό. Επιπλέον, υπήρχε η δυνατότητα αυτοματισμού για τον αερισμό των θαλάμων, είτε με το άνοιγμα των παράθυρων της οροφής, είτε με την χρήση της υγρής παρειάς, είτε με ανεμιστήρες, μειώνοντας παράλληλα, τη σχετική υγρασία και τη θερμοκρασία του θαλάμου.

Η ημέρα έναρξης εφαρμογής των μεταχειρίσεων σηματοδότησε την αρχή του πειράματος, που ήταν στις 31 Οκτωβρίου του 2019 αφού είχε προηγηθεί μεταφύτευση των φυτών λίγες μέρες πριν (από τις 25 Οκτωβρίου). Το πείραμα έληξε στις 17 Ιανουαρίου 2020, κατά την τρίτη συγκομιδή της καλλιέργειας δυόσμου και με την απομάκρυνση της από τους θαλάμους του θερμοκηπίου. Η συνολική διάρκεια, ξεκινώντας από την ημέρα της μεταφύτευσης, ήταν 79 ημέρες κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκαν εβδομαδιαίες μετρήσεις και 3 συγκομιδές της καλλιέργειας. Ως κύρια καλλιέργεια, χρησιμοποιήθηκε η τομάτα (*Solanum lycopersicum cv. Elpida*), ένα φυτό με αρκετές απαιτήσεις σε θρεπτικά συστατικά. Ως δευτερεύουσες

καλλιέργειες επιλέχθηκαν ο δυόσμος (*Mentha spicata*) και η μέντα (*Mentha piperita*), αρωματικά φυτά με μεγαλύτερη αντοχή στις υψηλές συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων και αλάτων.

Οι δυο καλλιέργειες αναπτύσσονταν στο ίδιο θερμοκήπιο, σε ξεχωριστούς θαλάμους, δίνοντας έτσι την δυνατότητα να επικρατούν διαφορετικές κλιματικές συνθήκες σε κάθε καλλιέργεια. Το υδροπονικό σύστημα στο οποίο αναπτύσσονταν οι καλλιέργειες είναι ανοιχτό, καθώς οι απορροές της πρωτεύουσας καλλιέργειας χρησιμοποιούνταν ως εισροές στην δευτερεύουσα καλλιέργεια και εν συνεχεία, οι απορροές της δευτερεύουσας κατέληγαν στο περιβάλλον.

Οι απορροές συσσωρεύονταν σε μαύρες λεκάνες συλλογής ανοιχτού τύπου, μέγιστης χωρητικότητας 100 L, με σκοπό να ληφθούν μετρήσεις όπως το pH και η EC των απορροών. Μετά τη πλήρωση των λεκανών, ο όγκος των απορροών συσσωρευόταν σε δεξαμενή χωρητικότητας 300 L και έπειτα απομακρυνόταν στο περιβάλλον με την χρήση ηλεκτρικής αντλίας.

Το υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη των φυτών του δυόσμου ήταν πετροβάμβακας, ενώ η τροφοδοσία του θρεπτικού διαλύματος πραγματοποιούνταν μέσω στάγδην άρδευσης. Για τον σκοπό αυτό είχαν τοποθετηθεί σταλάκτες στο εσωτερικό του υποστρώματος σε κοντινή απόσταση με το ριζικό σύστημα, με παροχή 2L h^{-1} , καθώς και ένας σταλάκτης ανά φυτό.

Το σύστημα άρδευσης λειτουργούσε αυτοματοποιημένα μέσω ηλεκτρονικού συστήματος και παρείχε άρδευση στα φυτά του δυόσμου 3 φορές την ημέρα. Σε κάθε άρδευση όλων των καλλιεργειών παρεχόταν ποσότητα θρεπτικού διαλύματος, με στόχο να απορρέει περίπου το 30%. Με τις απορροές αποφεύγεται η υπερβολική συγκέντρωση αλάτων στη ριζόσφαιρα των φυτών, χωρίς να γίνεται μεγάλη σπατάλη νερού και λιπασμάτων.

Για την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος και τη ρύθμιση του pH και της EC του, χρησιμοποιήθηκε λογισμικό διαχείρισης υδρολίπανσης. Για την προετοιμασία του τελικού θρεπτικού διαλύματος απαιτούνταν η χρήση πέντε δοσομετρητών αντλιών και η έγχυση των λιπασμάτων στην κεφαλή υδρολίπανσης, ώστε στην συνέχεια να πραγματοποιηθεί η ανάμειξη με νερό άρδευσης. Το θρεπτικό διάλυμα που δημιουργούταν στη δεξαμενή ανάμειξης, ελεγχόταν με αισθητήρες pH και EC ώστε να μη παρεκκλίνουν οι τιμές αυτές από τις επιθυμητές. Ο έλεγχος της ορθής λειτουργίας του συστήματος υδρολίπανσης γινόταν μέσω της κεφαλής υδρολίπανσης (Εικόνα 1).

Η κεφαλή ουσιαστικά είχε τον ρόλο της μίξης των λιπασμάτων με τις σωστές αναλογίες για το καθένα και την προσθήκη νερού, ώστε να παραχθεί αραιό θρεπτικό διάλυμα στα φυτά. Όταν το θρεπτικό διάλυμα είχε αποκτήσει την επιθυμητή σύσταση που είχε οριστεί εξ αρχής, διοχετευόταν αυτόματα σε μια από τις 8 δεξαμενές χωρητικότητας 500 L, όπου αποθηκευόταν προσωρινά μέχρι να ξεκινήσει η άρδευση, διαφορετικά παρέμενε στην κεφαλή και επιδεχόταν περαιτέρω βελτίωση. Η εισαγωγή των πυκνών διαλυμάτων και νερού στη δεξαμενή αναμείξεως είχε προκαθορισμένη αναλογία και η αραιώση των πυκνών διαλυμάτων ήταν πάντα σε αναλογία 1:100.

Οι δεξαμενές των πυκνών μητρικών διαλυμάτων και του οξέος ήταν πέντε. Δύο δεξαμενές προορίζονταν για το πρότυπο διάλυμα της τομάτας, δύο για το πρότυπο διάλυμα του δυόσμου, ενώ η πέμπτη περιείχε το οξύ, περιεκτικότητας 68% ο/ο HNO_3 , για τη διόρθωση του pH του τελικού διαλύματος.

Και στις δύο καλλιέργειες γινόταν διαχωρισμός των λιπασμάτων σε 2 δεξαμενές,



Εικόνα 1. Απεικόνιση του συστήματος υδρολίπανσης του υδροπονικού συστήματος του θερμοκηπίου

ώστε στην μία να περιέχονται τα λιπάσματα, όπως το $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, το KNO_3 , το NH_4NO_3 και ο Fe-EDTA και στην άλλη τα λιπάσματα που περιείχαν φωσφορική και θειική ρίζα, όπως το K_2SO_4 και το KH_2PO_4 . Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται, διότι όταν αναμιγνύεται το $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ με τα προαναφερθέντα, σχηματίζονται ιζήματα, λόγω της χαμηλής διαλυτότητας του $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ και του CaSO_4 , με επακόλουθη συνέπεια να φράσσονται τα αρδευτικά φίλτρα.

Για της ανάγκες του πειράματος, ήταν απαραίτητη και η προσθήκη πυκνού διαλύματος NaCl, όπου αντλούταν μαζί με τα άλλα πυκνά διαλύματα, ώστε να παραχθεί το τελικό διάλυμα με την επιθυμητή αγωγιμότητα. Επίσης, πριν την παραγωγή θρεπτικού διαλύματος, που απαιτούσε την προσθήκη των απορροών της τομάτας, αυτές πρώτα απολυμαίνονταν με υπεριώδη ακτινοβολία (UV). Στόχος, η αποφυγή του πολλαπλασιασμού και της μετάδοσης παθογόνων μικροοργανισμών, μέσω του συστήματος άρδευσης, στη ριζόσφαιρα της καλλιέργειας. Εν συνεχεία, υπήρχε φίλτρο για τη συγκράτηση και αποφυγή μεταφοράς φερτών υλικών που θα προκαλούσε φραγή των σταλακτών στο σύστημα άρδευσης.

2.2 Πειραματικός σχεδιασμός

Αρχικά, η καλλιέργεια της τομάτας είχε εγκατασταθεί σε προηγούμενο χρονικό διάστημα (29 Μαρτίου 2019) στους δύο από τους συνολικά 4 θαλάμους που χρειάστηκαν για το πείραμα. Ο κάθε θάλαμος, είχε 6 κανάλια των 22 m, όπου εναλλασσόταν το υπόστρωμα μεταξύ των καναλιών, με αποτέλεσμα τα 3 κανάλια να έχουν σαν υπόστρωμα τον πετροβάμβακα και τα άλλα 3 περλίτη. Έτσι, και στους δύο θαλάμους με την πρωτεύουσα καλλιέργεια, ίσχυε η ίδια πειραματική διάταξη.

Σχετικά με τις δευτερεύουσες καλλιέργειες, τα κανάλια είχαν χωριστεί στην μέση ώστε να τοποθετηθούν στον μισό θάλαμο τα φυτά του δυόσμου και στον υπόλοιπο τα φυτά της μέντας, με την εφαρμογή ίδιων μεταχειρίσεων και για τις δυο καλλιέργειες. Στην δευτερεύουσα καλλιέργεια χρησιμοποιήθηκαν μόνο σάκοι υποστρώματος με πετροβάμβακα διαστάσεων (100 x 20 x 7.5 cm) (Grodan Classic MY) πάνω στα 12 παράλληλα τοποθετημένα κανάλια υδροπονίας. Το πείραμα αποτελούνταν από 3 επαναλήψεις των καλλιεργειών, αξιοποιώντας και τους δυο θαλάμους του θερμοκηπίου, με κάθε μεταχείριση να έχει στη διάθεση της 3 κανάλια.

Επίσης, να σημειωθεί ότι τα κανάλια είχαν κατάλληλη κλίση, ώστε η περίσσεια ποσότητα του θρεπτικού διαλύματος να καταλήγει στις λεκάνες συλλογής απορροών,

οι οποίες είχαν τοποθετηθεί στο τέλος, των καναλιών της κάθε επανάληψης, του δυόσμου και της μέντας.

Η εγκατάσταση των φυτών του δυόσμου πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονα με την εγκατάσταση των φυτών της μέντας και έγινε στις 25 Οκτωβρίου, με βάση πλήρους τυχαιοποιημένου σχεδίου. Μετέπειτα ξεκίνησαν και οι διαφορετικές μεταχειρίσεις του πειράματος. Οι σάκοι με τον πετροβάμβακα ήταν εγκατεστημένοι πάνω στα κανάλια και των δυο θαλάμων και υπήρχαν οι κατάλληλες οπές στους σάκους, ώστε να τοποθετηθούν τα φυτά, τα οποία αναπτύχθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος πάνω σε κύβους πετροβάμβακα (Grodan Delta, NL). Πριν την εγκατάσταση των φυτών στην τελική τους θέση, εφαρμόστηκε διαβροχή με θρεπτικό διάλυμα μέχρι σημείο κορεσμού στους σάκους του πετροβάμβακα.

Αφού ολοκληρώθηκε η μεταφύτευση, πραγματοποιήθηκε πότισμα των σάκων για να επιταχυνθεί η καλύτερη επαφή των ριζών με το υπόστρωμα. Συνολικά τοποθετήθηκαν 684 φυτά τομάτας, 432 φυτά δυόσμου και 108 πλάκες πετροβάμβακα για την καλλιέργεια του δυόσμου. Πιο συγκεκριμένα στα υδροπονικά κανάλια τοποθετήθηκαν 9 σάκοι ανά κανάλι και ο κάθε σάκος είχε 4 φυτά δυόσμου. Η ίδια ακριβώς διαρρύθμιση των φυτών εφαρμόστηκε και στον δεύτερο θάλαμο του θερμοκηπίου.

Τέλος, τοποθετήθηκαν ταμπελάκια σήμανσης σε κάθε κανάλι που υποδείκνυαν και ξεχώριζαν τις διαφορετικές μεταχειρίσεις και επαναλήψεις, αλλά και κολλητικές παγίδες κίτρινου και μπλε χρώματος για να παρακολουθείται ο πληθυσμός των αφίδων, αλευρωδών και των θριπών, αντίστοιχα.

2.3 Μεταχειρίσεις

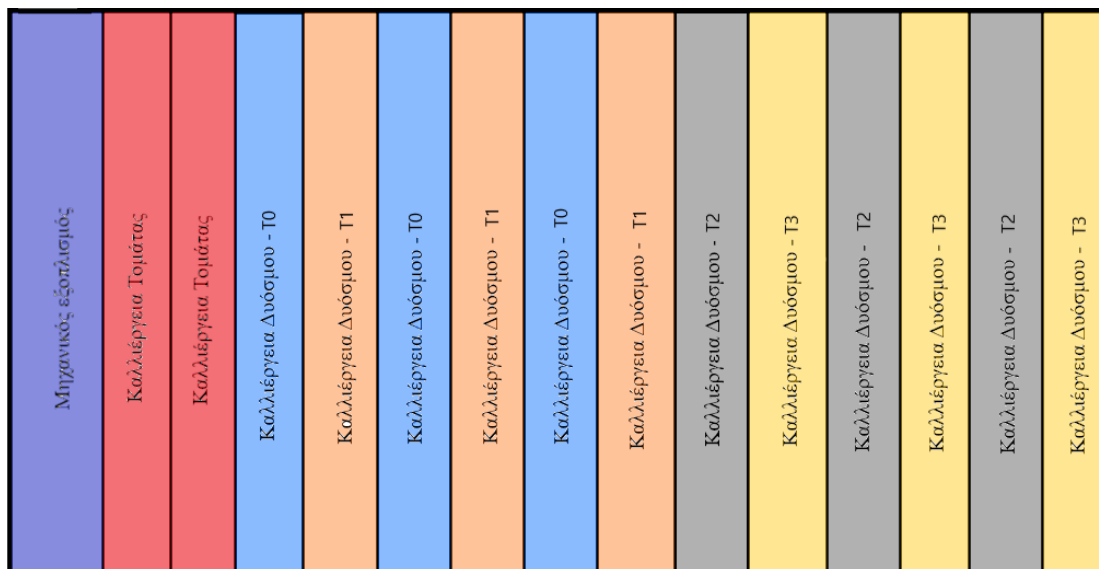
Η καλλιέργεια του δυόσμου χωρίστηκε σε 4 μεταχειρίσεις, κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχούσε σε μια διαφορετική συνταγή. Οι διαφορετικές στρατηγικές λίπανσης πραγματοποιήθηκαν με προσθήκη NaCl και ανάμιξη ή μη απορροών της τομάτας με ποσότητα πρότυπου διαλύματος, ώστε να αυξηθεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα μέχρι 8 dS m^{-1} . Οι 4 μεταχειρίσεις του δυόσμου ήταν οι ακόλουθες:

- Ο μάρτυρας (T0) που αρδεύονταν με φρέσκο διάλυμα, δηλαδή με κατάλληλη συνταγή θρέψης για τη καλλιέργεια του δυόσμου. Αποτελέσε μέτρο σύγκρισης για τις άλλες 3 μεταχειρίσεις.

- Η μεταχείριση (T1) που αρδεύονταν το πρότυπο διάλυμα, αλλά με την προσθήκη NaCl, ώστε να αυξηθεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα μέχρι 8 ds m⁻¹.
- Η μεταχείριση με 50% απορροές (T2), το θρεπτικό διάλυμα της οποίας ήταν ο συνδυασμός των απορροών τομάτας και του πρότυπου διαλύματος του δυόσμου, σε αναλογία 1:1, μαζί με την προσθήκη NaCl, ώστε να αυξηθεί η αγωγιμότητα μέχρι 8 ds m⁻¹.
- Η μεταχείριση των ολικών απορροών (T3) που αρδεύονταν αποκλειστικά από τις απορροές της τομάτας μαζί με προσθήκη NaCl, ώστε να αυξηθεί η αγωγιμότητα μέχρι 8 ds m⁻¹.

Στον Πίνακα 1, παρουσιάζεται η σύνθεση των συνταγών θρέψης, με ανάλυση διαλυμάτων, με χρήση φλογοφωτόμετρου και φασματοφωτόμετρου, του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών, ανά μεταχείριση κατά τη διάρκεια της πρώτης εβδομάδας μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων και δεύτερης συγκομιδής, 7 Νοεμβρίου 2019 και 19 Δεκεμβρίου 2019, αντίστοιχα. Η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας πραγματοποιήθηκε σταδιακά, με την αρχική τιμή 6 dS m⁻¹ για τις μεταχειρίσεις εκτός του μάρτυρα και μετά την ημερομηνία, 7 Νοεμβρίου 2019 αυξήθηκε στα 8 dS m⁻¹. Οι συνταγές θρέψης δεν τροποποιήθηκαν μέχρι την τελευταία συγκομιδή του δυόσμου, 17 Ιανουαρίου 2020. Οι αρδευτικές ανάγκες της καλλιέργειας μειώθηκαν κατά 67.3% από 1 Δεκεμβρίου 2020 έως το τέλος, του βιολογικού κύκλου της καλλιέργειας.

Όλες οι μεταχειρίσεις είχαν από 3 επαναλήψεις, με αποτέλεσμα στον πρώτο θάλαμο να υπάρχουν 3 επαναλήψεις για τον μάρτυρα και άλλες 3 για το πρότυπο διάλυμα με προσθήκη NaCl. Αντίστοιχα στον δεύτερο θάλαμο υπήρχαν 3 επαναλήψεις για τις άλλες δυο μεταχειρίσεις, αυτήν με 50% απορροές και NaCl, και την μεταχείριση των ολικών απορροών με NaCl όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Απεικόνιση της διάταξης των μεταχειρίσεων του δυόσμου εντός των θαλάμων του θερμοκηπίου.

Πίνακας 1. Σύνθεση των διαλυμάτων σε μακροστοιχεία και ιχνοστοιχεία (οι συγκεντρώσεις των μακροστοιχείων σε mmol L⁻¹ και των ιχνοστοιχείων σε μmol L⁻¹) για τη καλλιέργεια δυόσμου, ανά μεταχείριση. Δείγματα θρεπτικού διαλύματος συγκεντρώθηκαν από τις δεξαμενές άρδευσης, μια εβδομάδα μετά την αρχή των μεταχειρίσεων, 07 Νοεμβρίου 2019 και μετά τη δεύτερη συγκομιδή, 19 Δεκεμβρίου 2019.

07/11/2019			T0	T1	T2	T3
NO ₃	mmol/l		10.1	9.9	11.5	10.6
P	mmol/l		0.6	0.5	0.6	0.4
K	mmol/l		2.8	2.8	2.9	1.6
Ca	mmol/l		4.0	3.7	3.9	3.4
Na	mmol/l		6.1	48.0	46.5	49.6
Mg	mmol/l		2.1	1.9	1.9	2.1
Fe	μmol/l		2.6	5.0	5.9	11.3
Zn	μmol/l		1.9	1.4	1.6	1.6
Mn	μmol/l		0.9	0.8	1.6	2.7
Cu	μmol/l		6.1	1.4	3.0	5.3
19/12/2019			T0	T1	T2	T3
NO ₃	mmol/l		10.5	9.8	11.9	9.8
P	mmol/l		0.6	0.5	0.7	0.4
K	mmol/l		3.9	3.8	4.2	2.4
Ca	mmol/l		4.6	4.5	3.8	3.3
Na	mmol/l		1.3	63.9	62.7	66.7
Mg	mmol/l		2.2	1.9	2.1	2.1
Fe	μmol/l		5.1	3.4	6.4	7.5
Zn	μmol/l		3.3	1.8	2.6	1.9
Mn	μmol/l		1.7	0.7	1.9	2.0
Cu	μmol/l		5.2	1.0	2.4	2.7

2.4 Μετρήσεις

Καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος μετρήθηκαν: το ύψος, η συγκέντρωση χλωροφύλλης, ο αριθμός των βλαστών, ο ρυθμός φωτοσύνθεσης και διαπνοής ανά τακτικά χρονικά διαστήματα από τα φυτά της δευτερεύουσας καλλιέργειας, δηλαδή του δυόσμου. Μέσα από την επεξεργασία των δεδομένων αυτών, εκτιμήθηκε η συγκαλλιέργεια τομάτας και δυόσμου. Ο βέλτιστος συνδυασμός πρωτεύουσας και δευτερεύουσας καλλιέργειας αξιολογήθηκε, με βάση τα ποσοτικά χαρακτηριστικά του δυόσμου και το δείκτη αποτελεσματικότητας νερού.

2.4.1 Ύψος

Οι μετρήσεις του ύψους πραγματοποιήθηκαν από τις 31 Οκτωβρίου μέχρι την μέρα της 2^η καταστροφικής στις 19 Δεκεμβρίου. Από 30 φυτά που επιλέχθηκαν ως σταθερά δείγματα για την κάθε μεταχείριση, πραγματοποιούνταν δύο φορές την εβδομάδα με περιοδικότητα περίπου 3 ημέρες, μετρήσεις για το ύψος τους με την χρήση μετροταινίας. Ως ύψος του φυτού, θεωρήθηκε η απόσταση του κορυφαίου σημείου του πιο αναπτυγμένου βλαστού από το σημείο έκπτυξης του φυτού από το υπόστρωμα. Στόχος ήταν η παρατήρηση της επίδρασης των 4 μεταχειρίσεων στην ανάπτυξη του δυόσμου και συνολικά πάρθηκαν 14 σετ μετρήσεων σε 120 φυτά, ανά ημερομηνία μέτρησης.

2.4.2 Συγκέντρωση χλωροφύλλης

Μια ακόμα μέτρηση που πραγματοποιήθηκε στα φυτά του δυόσμου ήταν η μέτρηση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης. Οι μετρήσεις ξεκίνησαν στις 4 Οκτωβρίου και ολοκληρώθηκαν στις 19 Δεκεμβρίου με συχνότητα μίας φορές την εβδομάδα και πραγματοποιήθηκαν συνολικά 7 σετ μετρήσεων.

Η συγκεκριμένη μέτρηση έγινε με τη χρήση του οργάνου SPAD-502 Plus (Konica Minolta, Inc.), το οποίο διαθέτει ειδικό αισθητήρα για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης της ολικής χλωροφύλλης. Το SPAD-502 Plus (Εικόνα 2) καθορίζει τη περιεκτικότητα χλωροφύλλης που υπάρχει μετρώντας την απορρόφηση του φύλλου σε δύο διαφορετικά μήκη κύματος (στα 650 nm και 940 nm).

Ο αισθητήρας ερχόταν σε επαφή με 5 φύλλα από 30 τυχαία φυτά κάθε μεταχείρισης και από όλες τις επαναλήψεις, χωρίς να προκαλείται κάποιος

τραυματισμός στα φυτά. Στη συνέχεια γινόταν η εξαγωγή του μέσου όρου των 5 μετρήσεων του κάθε φυτού, επιτόπου από τη συσκευή για την απόκτηση της τελικής τιμής της συγκέντρωσης χλωροφύλλης, μειώνοντας έτσι την επίδραση του σφάλματος. Τέλος, να σημειωθεί ότι επιλέχθηκαν φύλλα που ήταν πιο μεγάλα, πιο ώριμα και υγιή.



Εικόνα 2. Συσκευή μέτρησης συγκέντρωσης χλωροφύλλης SPAD-502 Plus, Konica Minolta

2.4.3 Ρυθμός φωτοσύνθεσης και διαπνοής

Μία επιπλέον μέτρηση εκτός από το ύψος, τον αριθμό των βλαστών και τη χλωροφύλλη, ήταν η μέτρηση της φωτοσυνθετικής ικανότητας των φυτών του δυόσμου που εμπεριείχε το ρυθμό φωτοσύνθεσης και το ρυθμό διαπνοής. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το LCpro T (Εικόνα 2) (ADC, Bioscientific Ltd, Hoddesdon, Hertfordshire, Uk).

Ο ρυθμός φωτοσύνθεσης (A) ο οποίος μετριέται σε $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ είναι ο ρυθμός ανταλλαγής CO_2 στο θάλαμο του οργάνου με το φύλλο και υπολογίζεται από τον

τύπο $A = u_s \Delta_c$ όπου u_s η συνολική ροή του αέρα για κάθε m_2 φυλλικής επιφάνειας σε $mol\ m^{-2}\ s^{-1}$ και Δ_c η διαφορά συγκέντρωσης του CO_2 σε $\mu mol\ mol^{-1}$.

Η διαπνοή (E), η οποία μετριέται σε $mmol\ m^2\ s^{-1}$ είναι μια φυσιολογική διεργασία των φυτών, όπου το νερό εντός των ιστών αποβάλλεται υπό μορφή υδρατμών από τμήματα των φυτών όπως τα στόματα (ADC BioScientific instruction manual, 2018).

Όπως και με τη χλωροφύλλη, ο αισθητήρας του οργάνου ερχόταν σε επαφή με το φύλλο χωρίς να το τραυματίζει, με σημαντική διαφορά στον χρόνο που πάρθηκαν οι μετρήσεις καθώς ήταν πιο χρονοβόρα διαδικασία. Οι μετρήσεις ξεκίνησαν στις 7 Νοεμβρίου με την τελευταία να γίνεται στις 5 Δεκεμβρίου. Συνολικά πάρθηκαν 8 σετ μετρήσεων με συχνότητα περίπου 4 ημέρων. Τα φυτά επιλέχθηκαν τυχαία από όλες τις επαναλήψεις για την μέτρηση και ήταν 15 για κάθε μεταχείριση.



Εικόνα 3. Συσκευή μέτρησης ρυθμού φωτοσύνθεσης και διαπνοής LCpro T, ADC, Bioscientific Ltd

2.4.4 Καταστροφικές συγκομιδές

Στο πείραμα πραγματοποιήθηκαν συνολικά 3 καταστροφικές συγκομιδές. Στις 29 Νοεμβρίου (DAT 30) ορίστηκε να γίνει η πρώτη καταστροφική επέμβαση στα φυτά του δυόσμου. Η δεύτερη πραγματοποιήθηκε στις 19 Δεκεμβρίου (DAT 50), ημέρα λήξης των μετρήσεων του πειράματος και η τελευταία καταστροφική έγινε στις 17 Ιανουαρίου (DAT 79).

Επιλέχθηκαν με τυχαίο τρόπο 3 φυτά από κάθε μια από τις 3 επαναλήψεις και από τις 4 μεταχειρίσεις (Εικόνα 3). Συγκομίστηκαν δηλαδή, συνολικά 36 φυτά δυόσμου ανά συγκομιδή και τοποθετήθηκαν άμεσα σε χάρτινες σακούλες, ώστε να υπολογιστεί το χλωρό βάρος ανά φυτό ξεχωριστά με όσο δυνατόν μικρότερες απώλειες υγρασίας.

Η διαδικασία ήταν ίδια και για τις 3 καταστροφικές συγκομιδές. Αφού μετρήθηκαν τα ολικά χλωρά βάρη των συγκομισθέντων φυτών ακολούθησε ο διαχωρισμός των βλαστών και των φύλλων, ώστε να μετρηθεί ξεχωριστά το χλωρό βάρος. Όλες αυτές οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση ψηφιακής ζυγαριάς ακριβείας της εταιρίας Kern PCB και με υποδιαίρεση ενός γραμμαρίου.

Επιπλέον, στην πρώτη συγκομιδή συλλέχθηκαν και δεδομένα για τον αριθμό των φύλλων από όλα τα συγκομισθέντα φυτά, 36 φυτών. Για την δεύτερη μετρήθηκαν μόνο από 4 φυτά, που το καθένα αντιπροσώπευε την κάθε μεταχείριση, λόγω του μεγάλου αριθμού των φύλλων σε εκείνο το στάδιο ανάπτυξης. Στην τελευταία συγκομιδή, δεν ελήφθησαν δεδομένα σχετικά με τον αριθμό των φύλλων καθώς ήταν πολυάριθμα. Έπειτα, τα φυτά και των τριών συγκομιδών μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο των Γεωργικών Κατασκευών του Πανεπιστημίου, ώστε να γίνει η αποξήρανση τους και να μετρηθούν τα ολικά ξηρά βάρη των βλαστών και των φύλλων. Η ξήρανση των φυτών έγινε εντός ειδικού φούρνου, στους 70°C για 48 ώρες. Για τα ξηρά βάρη χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακή ζυγαριά ακριβείας με υποδιαίρεση 0.1 g. Τα δείγματα έπειτα, κονιορτοποιήθηκαν και τοποθετήθηκαν σε αεροστεγώς κλεισμένες νάυλον σακούλες με κλείσιμο τύπου zip, για επιπλέον αναλύσεις, που ωστόσο δεν αποτελούν αντικείμενο μελέτης της παρούσας πτυχιακής.

Τέλος, να σημειωθεί ότι σε όλες τις μετρήσεις του χλωρού και του ξηρού βάρους, τα δείγματα ζυγίζονταν με τις χάρτινες σακούλες τύπου kraft, ώστε να μην υπάρχουν απώλειες βάρους. Για το λόγο αυτό, σε κάθε μέτρηση χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο απόβαρο, ώστε να γίνεται σωστή βαθμονόμηση της ζυγαριάς.



Εικόνα 4. Καλλιέργεια του δυόσμου μετά την 3^η καταστροφική συγκομιδή

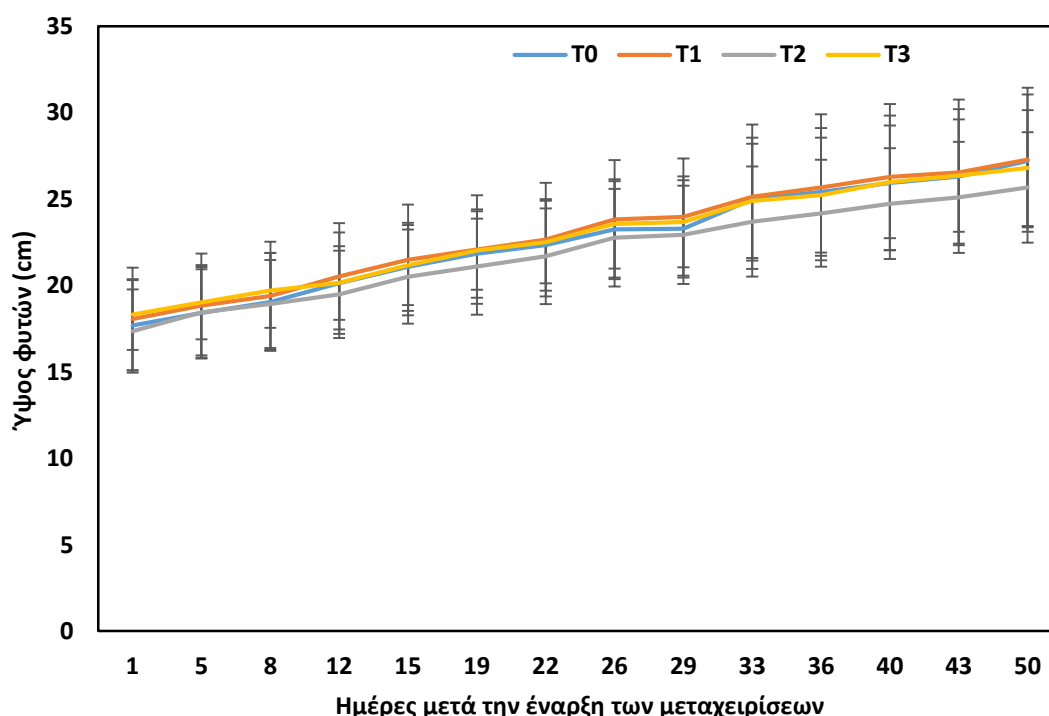
2.5 Στατιστική ανάλυση

Για τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν από το συγκεκριμένο πείραμα, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα IBM SPSS Statistics 26 (Statistical Package for the Social Sciences, IBM, Armonk, NY, USA). Αφού υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές για κάθε πίνακα δεδομένων και η τυπική απόκλιση των τιμών, επιλέχθηκε η μέθοδος one-way ANOVA με βαθμό εμπιστοσύνης 95% ($p \leq 0,05$). Επιπλέον εκεί που εντοπίστηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά γράμματα, με την μέγιστη τιμή να συμβολίζεται με (a).

3. Αποτελέσματα

3.1 Ύψος φυτών δυόσμου

Στο παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 1) παρουσιάζετε η μέση μεταβολή του ύψους των φυτών δυόσμου για κάθε μεταχείριση, για το χρονικό διάστημα της πρώτης ημέρας έναρξης των μεταχειρίσεων έως την 50^η ημέρα. Κατά το χρονικό διάστημα των μετρήσεων δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων, με τα φυτά να φτάνουν την 50^η ημέρα στο ύψος των 27 cm περίπου.



Διάγραμμα 1. Μέση αύξηση του ύψους φυτών δυόσμου, από την 1^η ημέρα έναρξης των μεταχειρίσεων, έως και την 50^η.

3.2 Χλωροφύλλη των φυτών δυόσμου

Η συγκέντρωση της χλωροφύλλης στα φύλλα του δυόσμου εμφάνισε στατιστικά σημαντικές διαφορές καθ' όλη την περίοδο των μετρήσεων. Αυτές πραγματοποιήθηκαν από την 5^η ημέρα μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων, έως και την 50^η ημέρα, με τον μάρτυρα να διαθέτει την λιγότερη συγκέντρωση σε χλωροφύλλη σχεδόν σε όλες τις μετρήσεις. Πιο συγκεκριμένα την 5^η ημέρα ο μάρτυρας του πειράματος υστερούσε ως προς τις άλλες 3 μεταχειρίσεις, με μέση τιμή

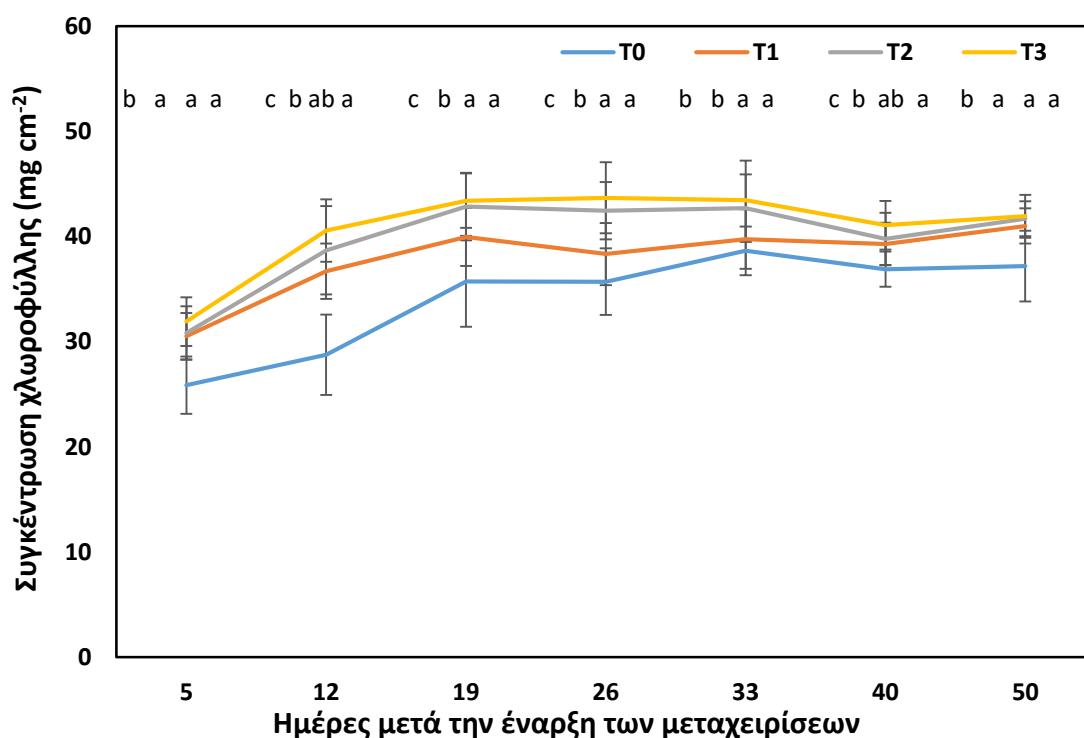
συγκέντρωσης χλωροφύλλης κατά 15% χαμηλότερη συγκριτικά με την T1. Η οποία T1 ήταν η αμέσως μεγαλύτερη σε συγκέντρωση χλωροφύλλης, ενώ οι άλλες μεταχειρίσεις δεν διέφεραν στατιστικά σημαντικά μεταξύ τους.

Την 12^η ημέρα η T3 είχε την μεγαλύτερη συγκέντρωση χλωροφύλλης, με μέση τιμή 40.5 mg cm⁻², χωρίς όμως να διαφέρει στατιστικά σημαντικά με την T2. Η τελευταία δεν διέφερε ούτε με την T1 σημαντικά, αφήνοντας έτσι τον μάρτυρα να υστερεί σημαντικά μεταξύ των μεταχειρίσεων, με 29% λιγότερη συγκέντρωση χλωροφύλλης από την T3 και 21.6% λιγότερη από την T1.

Την 19^η και 26^η ημέρα των μετρήσεων οι μεταχειρίσεις T3 και T2 είχαν την μεγαλύτερη συγκέντρωση χωρίς σημαντική διαφορά μεταξύ τους. Αμέσως επόμενη είναι η T1 και τελευταία ακολουθεί ο μάρτυρας.

Ωστόσο την 33^η ημέρα αν και οι μεταχειρίσεις T3 και T2 συνεχίζουν να έχουν τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, ο μάρτυρας προσεγγίζει την συγκέντρωση της T1, με αποτέλεσμα να μην έχουν σημαντική διαφορά μεταξύ τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι την ημέρα εκείνη ο μάρτυρας είχε την μεγαλύτερη συγκέντρωση χλωροφύλλης, με μέση τιμή 38.6 mg cm⁻².

Την 40^η ημέρα των μετρήσεων παρατηρείται μια παρόμοια εικόνα με αυτήν της 12^η ημέρας, όπου οι T3 και T2 είχαν την μεγαλύτερη συγκέντρωση και ο μάρτυρας



Διάγραμμα 2. Μέση μεταβολή της συγκέντρωσης χλωροφύλλης των φυτών δυόσμου, από την 5^η ημέρα έναρξης των μεταχειρίσεων, έως και την 50^η.

την χαμηλότερη.

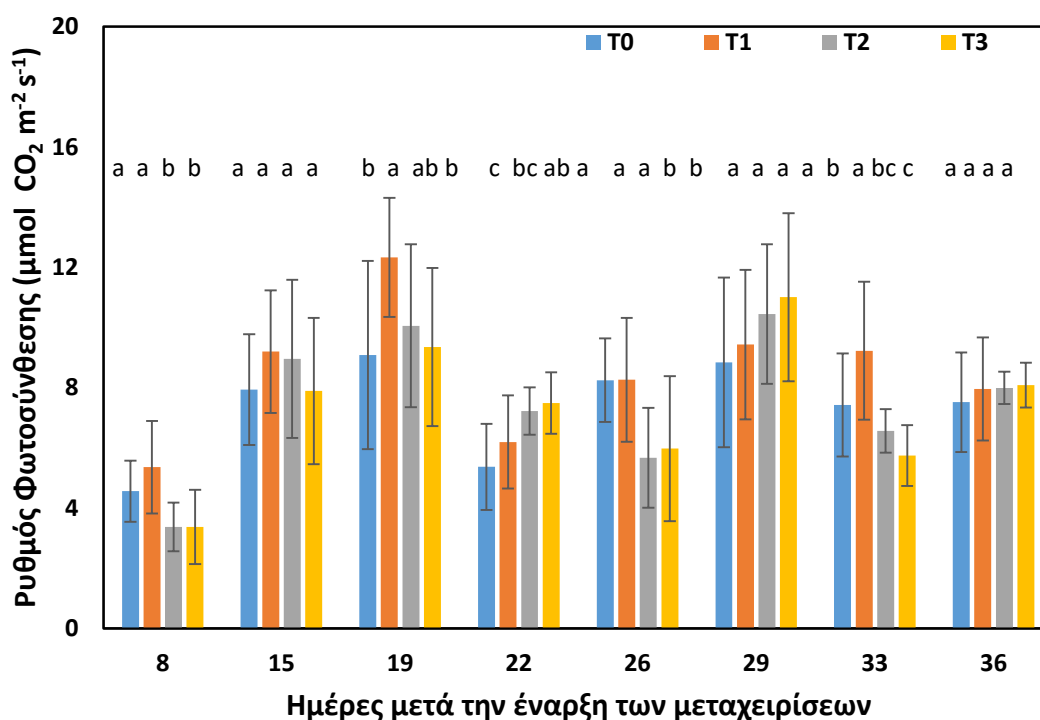
Την 50^η και τελευταία μέρα των μετρήσεων, όλες οι μεταχειρίσεις πλην του μάρτυρα, διέθεταν παρόμοια συγκέντρωση χλωροφύλλης και δεν είχαν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Τέλος, να σημειωθεί ότι ο μάρτυρας είχε 9.3% λιγότερη συγκέντρωση συγκριτικά με την T1.

3.3 Φωτοσύνθεση των φυτών του δυόσμου

Στο Διάγραμμα 3, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές από την 8η ημέρα μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων, με την μεταχείριση του μάρτυρα και την T1 να έχουν τον μεγαλύτερο ρυθμό φωτοσύνθεσης, χωρίς να διαφέρουν στατιστικά σημαντικά μεταξύ τους. Ακολουθούν οι T3 και T2 με χαμηλότερες τιμές που ωστόσο, δε διαφέρουν μεταξύ τους. Την 15^η ημέρα και οι τέσσερις μεταχειρίσεις δεν είχαν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.

Την 19^η ημέρα ωστόσο η T1 είχε την μεγαλύτερη τιμή συγκριτικά με όλες τις μέρες, καθώς είχε μέση τιμή $12.3 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, με τον μάρτυρα να έχει σχεδόν 26% χαμηλότερο ρυθμό φωτοσύνθεσης. Παρόλα αυτά η T1 δε διέφερε σημαντικά από την T2 όπου και αυτήν με την σειρά της δε διέφερε ούτε με τον μάρτυρα, αλλά ούτε με την T3. Την 22^η ημέρα η πιο σημαντική διαφορά ήταν μεταξύ του μάρτυρα και την T3, με την τελευταία να έχει 39.5% μεγαλύτερο ρυθμό φωτοσύνθεσης.

Την 26^η ημέρα ο μάρτυρας μαζί με την T1 είχαν παρόμοιες τιμές που δεν διέφεραν, ενώ χαμηλότερες τιμές παρατηρήθηκαν στην T3 και T2. Την 29^η ημέρα δεν υπήρχαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων, ενώ την 33^η ημέρα η T1 είχε την μεγαλύτερη τιμή με $9.2 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, που ήταν κατά 24% αυξημένη συγκριτικά με τον μάρτυρα. Η T2 δεν είχε σημαντική διαφορά ούτε με τον μάρτυρα, ούτε με την T3, με την τελευταία ωστόσο να είναι σημαντικά χαμηλότερη από τον μάρτυρα κατά 22.5%. Τέλος την 36^η ημέρα δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των τεσσάρων μεταχειρίσεων.



Διάγραμμα 3. Μέση μεταβολή του ρυθμού της φωτοσύνθεσης των φυτών δυόσμου, από την 8^η ημέρα έναρξης των μεταχειρίσεων, έως και την 36^η.

3.4 Διαπνοή των φυτών του δυόσμου

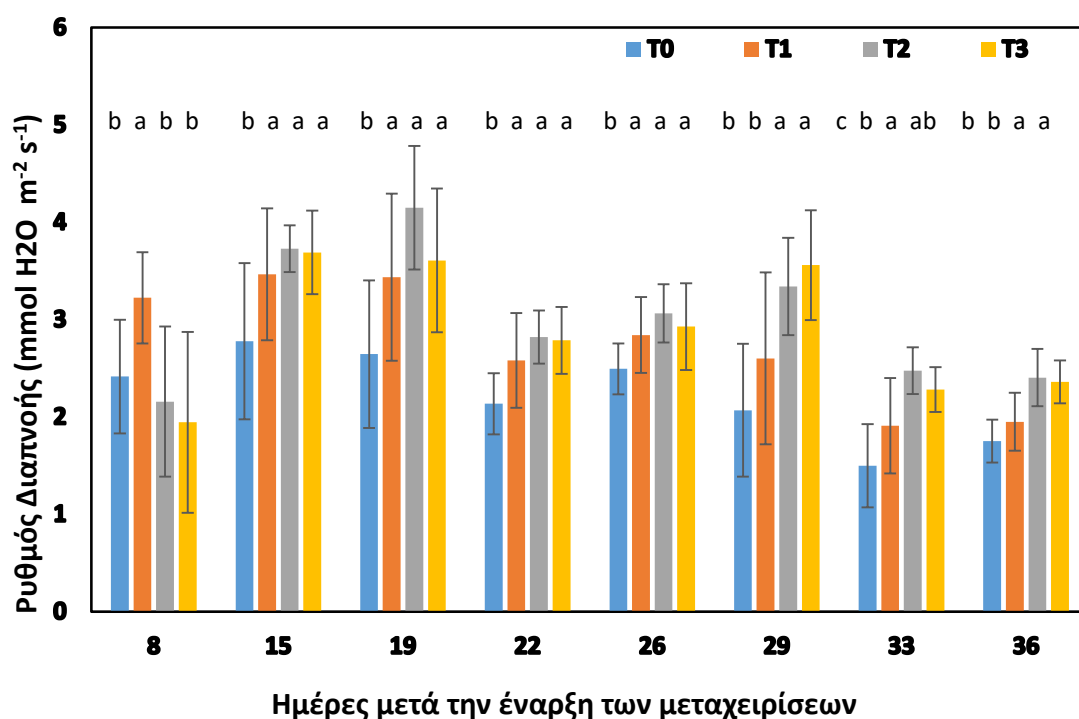
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της διαπνοής των τεσσάρων μεταχειρίσεων του δυόσμου παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 4). Στατιστικά ενδιαφέρουσες τιμές παρατηρούνται από την 8^η κιόλας ημέρα μετρά την εφαρμογή των μεταχειρίσεων.

Συγκεκριμένα η T1 έχει την μεγαλύτερη τιμή διαπνοής, με τις άλλες τρεις μεταχειρίσεις να μην διαφέρουν στατιστικά σημαντικά μεταξύ τους. Ενδιαφέρουσα παρατήρηση αποτελεί η σταθερή συσχέτιση μεταξύ των τεσσάρων μεταχειρίσεων για τις επόμενες τέσσερις μετρήσεις, δηλαδή από το διάστημα της 15^η ημέρας, μέχρι και την 26^η ημέρα. Εντός του διαστήματος αυτού ο μάρτυρας έχει σταθερά την χαμηλότερη τιμή διαπνοής, ενώ οι άλλες τρεις μεταχειρίσεις δε διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους.

Ενδεικτικά την 19^η ημέρα των μετρήσεων, η T2 είχε την μεγαλύτερη τιμή διαπνοής συγκριτικά με όλες τις ημέρες, αγγίζοντας τα 4.1 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ που είναι κατά περίπου 56% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη διαπνοή του μάρτυρα. Την 29^η ημέρα των μεταχειρίσεων, οι T3 και T2 είχαν το μεγαλύτερο ρυθμό διαπνοής,

χωρίς να διαφέρει σημαντικά μεταξύ τους, με τι άλλες δυο μεταχειρίσεις, του μάρτυρα και του T1 να έχουν σημαντικά χαμηλότερο ρυθμό διαπνοής που και αυτός δεν διέφερε σημαντικά με την μεταξύ τους σύγκριση.

Την 33^η ημέρα οι T3 και T2 εξακολουθούσαν να έχουν το μεγαλύτερο ρυθμό διαπνοής, με την τελευταία μεταχείριση ωστόσο να μην διαφέρει πλέον σημαντικά από την T1. Ο μάρτυρας είχε σημαντικά χαμηλότερη διαπνοή, κατά 39.5% συγκριτικά με την T2. Στην 36^η και τελευταία ημέρα μέτρησης της διαπνοής, ο μάρτυρας και η T1 είχαν χαμηλότερο ρυθμό διαπνοής σε σχέση με τις T3 και T2.



Διάγραμμα 4. Μέση μεταβολή του ρυθμού της διαπνοής των φυτών δυόσμου, από την 8^η ημέρα έναρξης των μεταχειρίσεων, έως και την 36^η.

3.5 Δείκτης αποτελεσματικότητας νερού

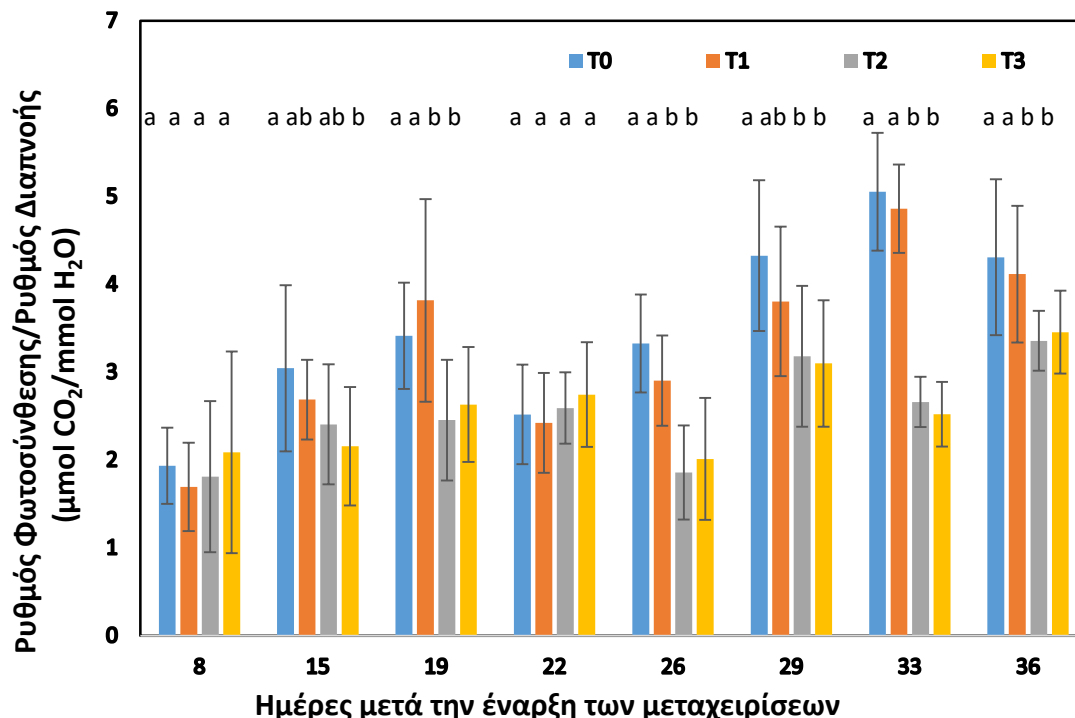
Όπως παρατηρείται στο Διάγραμμα 5 η στιγμιαία WUE είχε σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων και μεταβαλλόταν με την πάροδο των ημερών. Ειδικότερα την 8^η ημέρα δεν παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά των τιμών του λόγου μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Την 15^η ημέρα η τιμή του μάρτυρα υπερτερεί σε σύγκριση με τις άλλες τρεις μεταχειρίσεις, χωρίς ωστόσο να διαφέρει στατιστικά σημαντικά από την T1 και την

T2. Ο μάρτυρας είχε σημαντική διαφορά με την T3, καθώς η τιμή του λόγου του ήταν αυξημένη κατά 41%. Την 19^η ημέρα ο μάρτυρας με την T1 έχουν το μεγαλύτερο WUE χωρίς να διαφέρουν μεταξύ τους. Την χαμηλότερη τιμή την είχαν οι μεταχειρίσεις T3 και T2 όπου ούτε αυτές διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους.

Την 22^η δε σημειώθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Την 26^η ημέρα παρατηρήθηκε μια παρόμοια συσχέτιση των μεταχειρίσεων με την 19^η ημέρα, όπου ο μάρτυρας με την T1 υπερτερούσαν σημαντικά από τις μεταχειρίσεις T3 και T2. Την 29^η ημέρα ο μάρτυρας μαζί με την T1 συνεχίζουν να έχουν την μεγαλύτερη τιμή της στιγμιαίας WUE, έναντι των άλλων μεταχειρίσεων, με την διαφορά ότι η T1 δεν διαφέρει πλέον στατιστικά σημαντικά από τις μεταχειρίσεις T3 και T2.

Την 33^η ημέρα παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και της T1, από τις μεταχειρίσεις T3 και T2. Η τιμή του δείκτη αποτελεσματικότητας, WUE, στον μάρτυρα άγγιξε τα 5 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ και συγκριτικά με την T3 ήταν διπλάσια. Την 36^η ημέρα η συσχέτιση των μεταχειρίσεων παρέμεινε ίδια με την



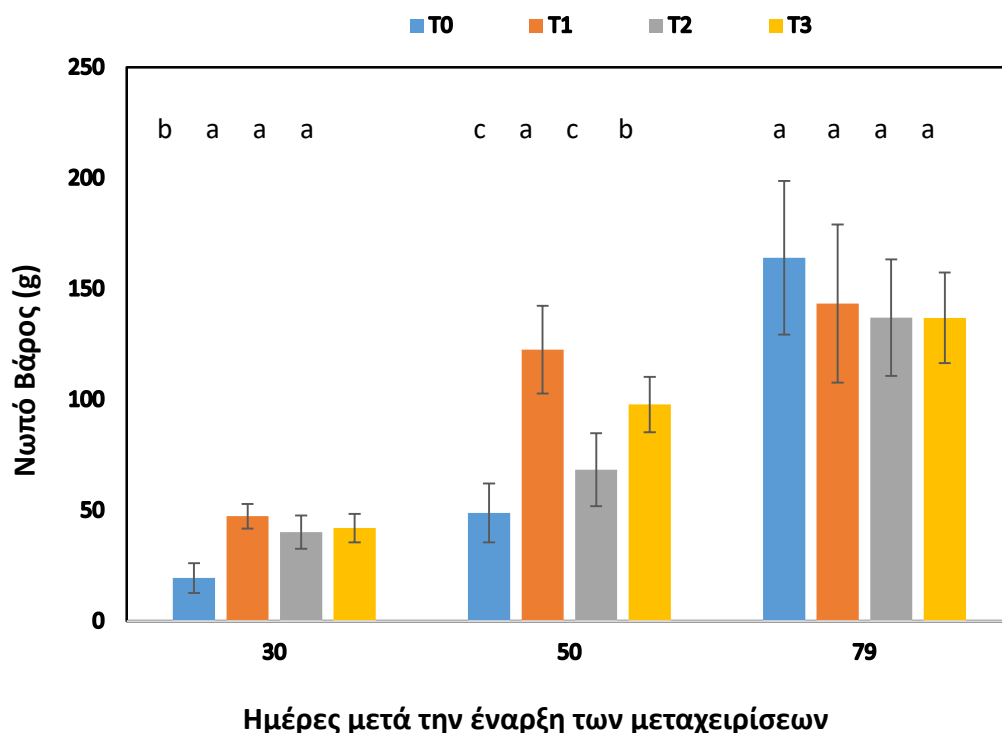
Διάγραμμα 5. Μέση μεταβολή της στιγμιαίας αποδοτικότητας χρήσης νερού (WUE) των φυτών του δυόσμου.

προηγούμενη μέτρηση, χωρίς να εντοπίζονται όμως μεγάλες τιμές της WUE, όπως εντοπίστηκαν στην προηγούμενη ημέρα μετρήσεως. Συνολικά, σύμφωνα με το Διάγραμμα 5 παρατηρείται ότι ο μάρτυρας και η T1 είχαν τις μεγαλύτερες τιμές στιγμιαίας WUE.

3.6 Χλωρό βάρος της καλλιέργειας δυόσμου

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 6, το νωπό βάρος των φυτών επηρεάστηκε από την εφαρμογή των μεταχειρίσεων από την πρώτη καταστροφική συγκομιδή (DAT 30). Ειδικότερα ο μάρτυρας υστερούσε σημαντικά συγκριτικά με τις άλλες τρεις μεταχειρίσεις, οι οποίες ωστόσο δεν διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους. Το μεγαλύτερο μέσο βάρος (47 g) το είχε η μεταχείριση με το φρέσκο διάλυμα και την προσθήκη NaCl, με το αμέσως χαμηλότερο μέσο βάρος ήταν οι μεταχειρίσεις T3 και T2, με 42 g και 40 g αντίστοιχα. Η T1 συγκριτικά με τον μάρτυρα, με μέσο βάρος μόλις στα 19.5 g, είχε 2.5 φορές μεγαλύτερο μέσο βάρος.

Στην δεύτερη καταστροφική συγκομιδή (DAT 50), η μεταχείριση με το φρέσκο διάλυμα και την προσθήκη NaCl, είχε το μεγαλύτερο μέσο βάρος στα 122 g, τιμή που διαφέρει σημαντικά από τις άλλες μεταχειρίσεις. Το αμέσως μεγαλύτερο μέσο βάρος



Διάγραμμα 6. Μέση τιμή νωπού βάρους των φυτών του δυόσμου κατά τις 3 συγκομιδές.

με 25 g λιγότερα από την T1, είχε η μεταχείριση T3. Οι μεταχειρίσεις του μάρτυρα και του T2 είχαν τα μικρότερα μέσα βάρη, με τις τιμές τους να μην διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Άξιο αναφοράς είναι ότι, η T1 συνεχίζει να έχει 2.5 φορές μεγαλύτερο μέσο βάρος συγκριτικά με τον μάρτυρα, με τον τελευταίο να έχει μέσο βάρος μόλις στα 49 g.

Στην τρίτη και τελευταία συγκομιδή (DAT 79), ο μάρτυρας κατέχει το μεγαλύτερο μέσο βάρος (164 g), με περίπου 20 g περισσότερα από τις άλλες μεταχειρίσεις, ωστόσο δεν υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των τεσσάρων μεταχειρίσεων.

Πίνακας 2. Μέσο νωπό βάρος (g) της καλλιέργειας του δυόσμου.

Μεταχειρίσεις	1^η Συγκομιδή	2^η Συγκομιδή	3^η Συγκομιδή
T0	19.4 ± 6.7b	48.9 ± 13.3c	164.0 ± 34.7a
T1	47.3 ± 5.6a	122.5 ± 19.7a	143.3 ± 35.7a
T2	40.2 ± 7.5a	68.3 ± 16.4c	137.0 ± 26.3a
T3	42.0 ± 6.5a	97.8 ± 12.5b	136.9 ± 20.5a

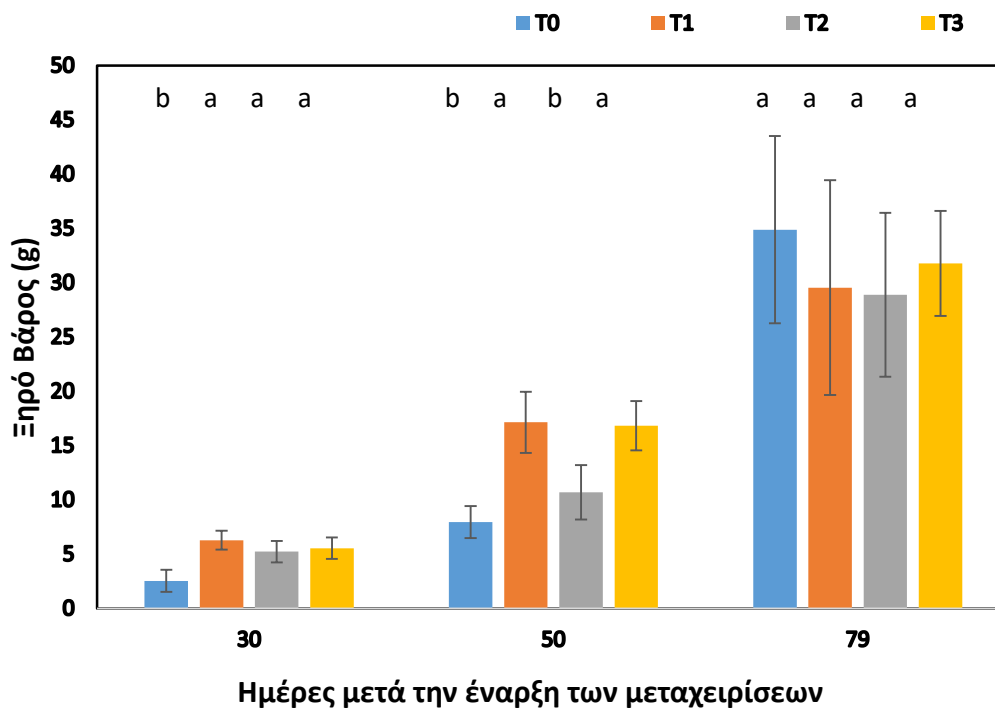
3.7 Ξηρό βάρος της καλλιέργειας δυόσμου

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του ξηρού βάρους των φυτών του δυόσμου παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 7). Κατά την 1^η συγκομιδή (DAT 30) το ξηρό βάρος του μάρτυρα ήταν σημαντικά χαμηλότερο συγκριτικά με τις άλλες τρεις μεταχειρίσεις, οι οποίες δε διέφεραν στατιστικά σημαντικά μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα η μεταχείριση με το πρότυπο διάλυμα και την προσθήκη NaCl, είχε την μεγαλύτερη μέση τιμή ξηρού βάρους (6.3 g), που συγκριτικά με τον μάρτυρα (2.5 g) ήταν κατά 2.5 φορές μεγαλύτερη.

Στη 2^η συγκομιδή (DAT 50) το μεγαλύτερο ξηρό βάρος το είχαν οι μεταχειρίσεις T1 και T3, χωρίς σημαντικές διαφορές μεταξύ τους, με βάρος 17.1 g και 16.8 g αντίστοιχα. Ο μάρτυρας με την T2 είχαν τα μικρότερα ξηρά βάρη, χωρίς να διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Η T1 συγκριτικά με τον μάρτυρα είχε σχεδόν το διπλάσιο ξηρό βάρος, με τον μάρτυρα να έχει μόλις 8 g ξηράς ουσίας.

Τέλος, την 3^η και τελευταία συγκομιδή (DAT 79) δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των τεσσάρων μεταχειρίσεων. Ο μάρτυρας ωστόσο, εμφανίζει το μεγαλύτερο ξηρό βάρος (34.9 g), που σημαίνει ότι μέσα σε

διάστημα 30 ημερών κατάφερε να αυξήσει το ξηρό του βάρος περίπου κατά 4.5 φορές συγκριτικά με το βάρος της 2^η συγκομιδής.



Διάγραμμα 7. Μέση τιμή ξηρού βάρους των φυτών του δυόσμου κατά τις 3 συγκομιδές.

Πίνακας 3. Μέσο ξηρό βάρος (g) της καλλιέργειας του δυόσμου.

Μεταχειρίσεις	1 ^η Συγκομιδή	2 ^η Συγκομιδή	3 ^η Συγκομιδή
T0	2.5 ± 1.0b	8.0 ± 1.5b	34.9 ± 8.6a
T1	6.3 ± 0.9a	17.1 ± 2.8a	29.6 ± 9.9a
T2	5.2 ± 1.0a	10.7 ± 2.5b	28.9 ± 7.5a
T3	5.6 ± 1.0a	16.8 ± 2.3a	31.8 ± 4.8a

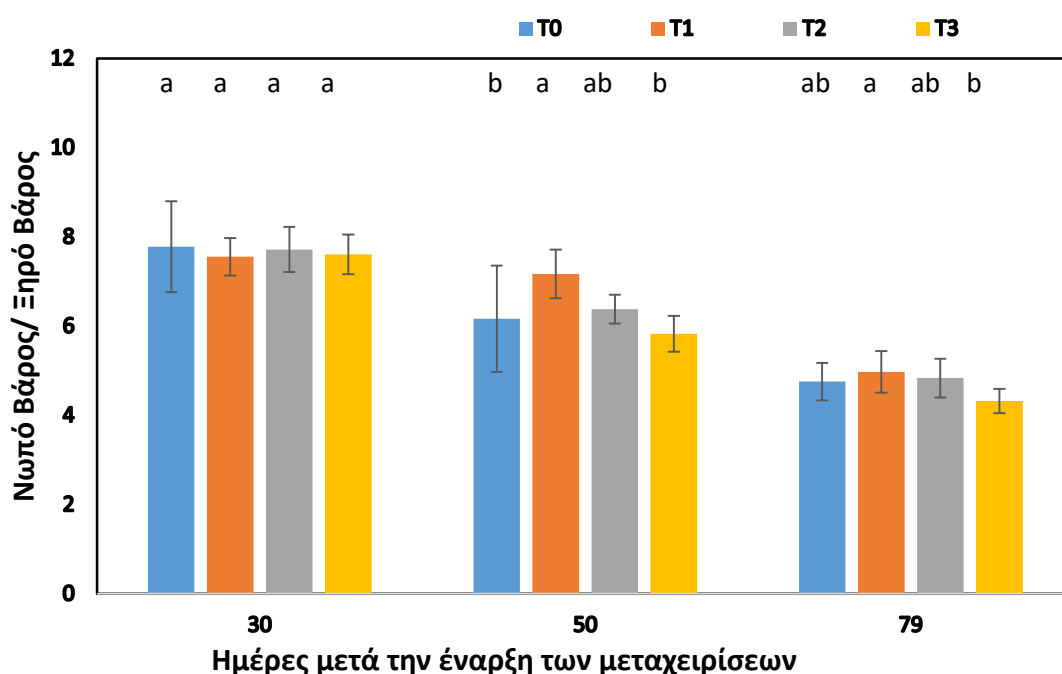
3.8 Λόγος νωπού προς ξηρού βάρους των φυτών του δυόσμου

Όπως παρατηρείται στο Διάγραμμα 8, ο λόγος του νωπού προς ξηρού βάρους δεν είχε στατιστικές διαφορές στην 1^η συγκομιδή (DAT 30) μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Ωστόσο κατά την 2^η συγκομιδή (DAT 50) παρατηρείται ότι η μεταχείριση με το πρότυπο διάλυμα και την προσθήκη NaCl, είχε την μεγαλύτερη τιμή (7.2) του λόγου

νωπού προς ξηρού βάρους. Ωστόσο δεν εντοπίστηκαν σημαντικές διαφορές με την μεταχείριση T2, με την τελευταία να μην παρουσιάζει διαφορές ούτε με τον μάρτυρα, αλλά ούτε και με την T3. Η μεταχείριση T1 είχε κατά 16% αυξημένη τιμή του λόγου, συγκριτικά με τον μάρτυρα (6.2).

Κατά την 3^η συγκομιδή, 79 ημέρες μετά την εφαρμογή των μεταχειρίσεων, η μοναδική στατιστικά σημαντική διαφορά ήταν μεταξύ της μεταχείρισης T1 και της T3, με την πρώτη να υπερτερεί με τιμή 17% μεγαλύτερη. Τέλος ο μάρτυρας δε διέφερε σημαντικά με καμία από τις άλλες μεταχειρίσεις.



Διάγραμμα 8. Αναλογία νωπού προς ξηρού βάρους των φυτών του δυόσμου κατά τις 3 συγκομιδές.

Πίνακας 4. Μέσος λόγος του νωπού προς ξηρού βάρους των φυτών του δυόσμου.

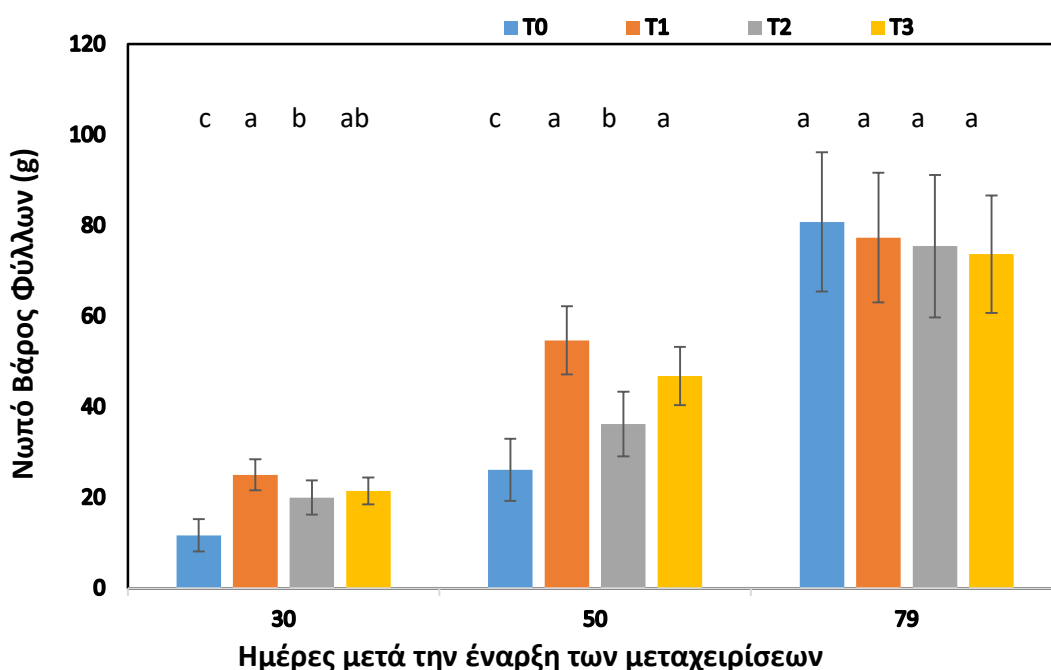
Μεταχειρίσεις	1 ^η Συγκομιδή	2 ^η Συγκομιδή	3 ^η Συγκομιδή
T0	7.8 ± 1a	6.2 ± 1.2b	4.8 ± 0.4ab
T1	7.6 ± 0.4a	7.2 ± 0.5a	5.0 ± 0.5a
T2	7.7 ± 0.5a	6.4 ± 0.3ab	4.8 ± 0.4ab
T3	7.6 ± 0.4a	5.8 ± 0.4b	4.3 ± 0.3b

3.9 Νωπό βάρος φύλλων του δυόσμου

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του νωπού βάρους των φύλλων του δυόσμου παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 9. Από την 1^η συγκομιδή (DAT 30) εντοπίστηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Ειδικότερα με μεγαλύτερο νωπό βάρος φύλλων ήταν η μεταχείριση με το πρότυπο διάλυμα και την προσθήκη NaCl, χωρίς όμως να διαφέρει σημαντικά από την T3, όπου η τελευταία δεν διέφερε με την σειρά της από την μεταχείριση T2. Ο μάρτυρας είχε το μικρότερο νωπό βάρος φύλλων (11.7 g) με την μεταχείριση T1 να έχει σχεδόν διπλάσιο βάρος.

Στην 2^η συγκομιδή (DAT 50) η μεταχείριση με το πρότυπο διάλυμα και την προσθήκη NaCl συνέχισε να έχει το μεγαλύτερο νωπό βάρος, χωρίς να διαφέρει σημαντικά από την T3, με την τελευταία πλέον να διαφέρει σημαντικά από την T2, όπως και από τον μάρτυρα. Ο μάρτυρας είχε το μικρότερο νωπό βάρος από όλες τις μεταχειρίσεις με μέση τιμή τα 26 g, και συγκριτικά με την μεταχείριση T1 είχε σχεδόν το μισό βάρος.

Κατά την 3^η συγκομιδή δεν παρατήρησαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων, με τον μάρτυρα ωστόσο να έχει την μεγαλύτερη αύξηση συγκριτικά με την 2^η καταστροφική, καθώς αύξησε το νωπό βάρος των φύλλων μέσα στο διάστημα αυτό σχεδόν κατά 3 φορές.



Διάγραμμα 9. Μέση τιμή νωπού βάρους των φύλλων του δυόσμου κατά τις 3 συγκομιδές.

Πίνακας 5. Μέσο νωπό βάρος των φύλλων του δυόσμου.

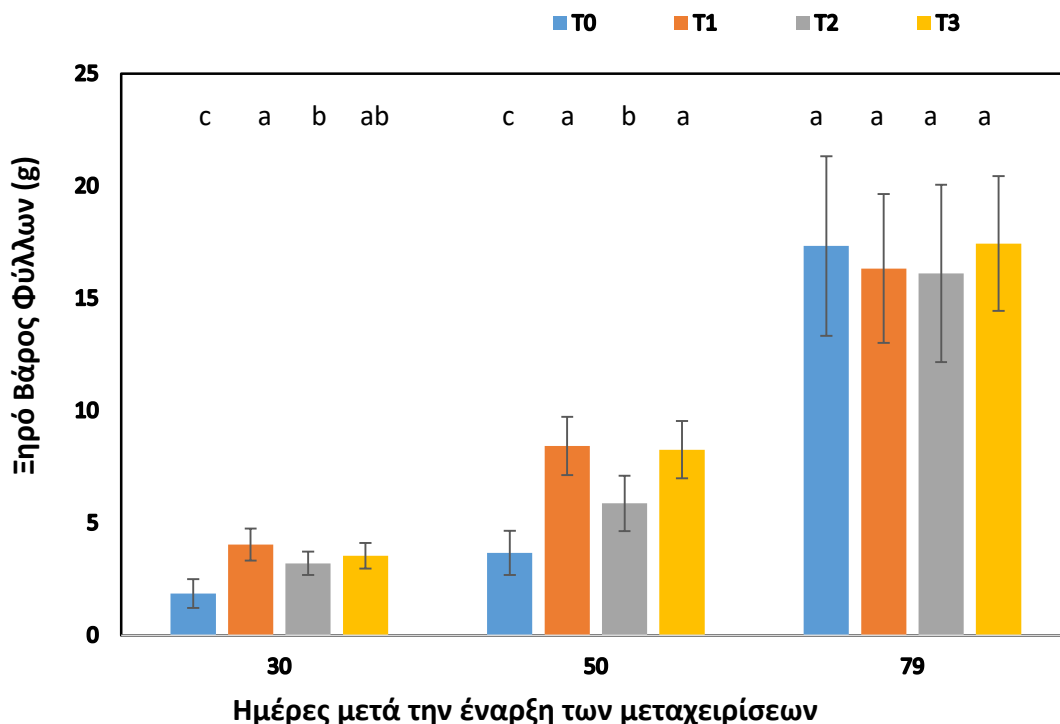
Μεταχειρίσεις	1^η Συγκομιδή	2^η Συγκομιδή	3^η Συγκομιδή
T0	11.7 ± 3.6c	26.1 ± 6.9c	80.8 ± 15.4a
T1	25 ± 3.4a	54.7 ± 7.5a	77.3 ± 14.3a
T2	20 ± 3.8b	36.2 ± 7.1b	75.4 ± 15.7a
T3	21.4 ± 3ab	46.8 ± 6.4a	73.7 ± 13a

3.10 Ξηρό βάρος φύλλων του δυόσμου

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του ξηρού βάρους των φύλλων του δυόσμου παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 10. Οι διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ήταν όμοιες με αυτές που παρατηρήθηκαν στο βάρος των νωπών φύλλων. Ειδικότερα στην 1^η συγκομιδή (DAT 30) με μεγαλύτερο ξηρό βάρος φύλλων ήταν η μεταχείριση με το πρότυπο διάλυμα και την προσθήκη NaCl, χωρίς όμως να διαφέρει σημαντικά από την T3, όπου η τελευταία δεν διέφερε με την σειρά της από την μεταχείριση T2. Ο μάρτυρας είχε το μικρότερο ξηρό βάρος φύλλων (1,9 g) με την μεταχείριση T1 να έχει σχεδόν διπλάσιο βάρος.

Στην 2^η συγκομιδή (DAT 50) η μεταχείριση με το πρότυπο διάλυμα και την προσθήκη NaCl συνέχιζε να έχει το μεγαλύτερο ξηρό βάρος, χωρίς να διαφέρει σημαντικά από την T3, με την τελευταία πλέον να διαφέρει σημαντικά από την T2, όπως και από τον μάρτυρα. Ο μάρτυρας είχε το μικρότερο ξηρό βάρος από όλες τις μεταχειρίσεις με μέση τιμή τα 3.7 g, και συγκριτικά με την μεταχείριση T1 είχε σχεδόν το μισό βάρος.

Κατά την 3^η συγκομιδή δεν παρατήρησαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων, με τον μάρτυρα ωστόσο να έχει την μεγαλύτερη αύξηση συγκριτικά με την 2^η καταστροφική, καθώς αύξησε το ξηρό βάρος των φύλλων μέσα στο διάστημα αυτό σχεδόν κατά 5 φορές.



Διάγραμμα 10. Μέσο ξηρό βάρος των φύλλων του δυόσμου κατά τις 3 συγκομιδές.

Πίνακας 6. Μέσο ξηρό βάρος των φύλλων του δυόσμου.

Μεταχειρίσεις	1 ^η Συγκομιδή	2 ^η Συγκομιδή	3 ^η Συγκομιδή
T0	1.9 ± 0.6c	3.7 ± 1.0c	17.3 ± 4.0a
T1	4.0 ± 0.7a	8.4 ± 1.3a	16.3 ± 3.3a
T2	3.2 ± 0.5b	5.9 ± 1.2b	16.1 ± 4.0a
T3	3.5 ± 0.6ab	8.3 ± 1.3a	17.4 ± 3.0a

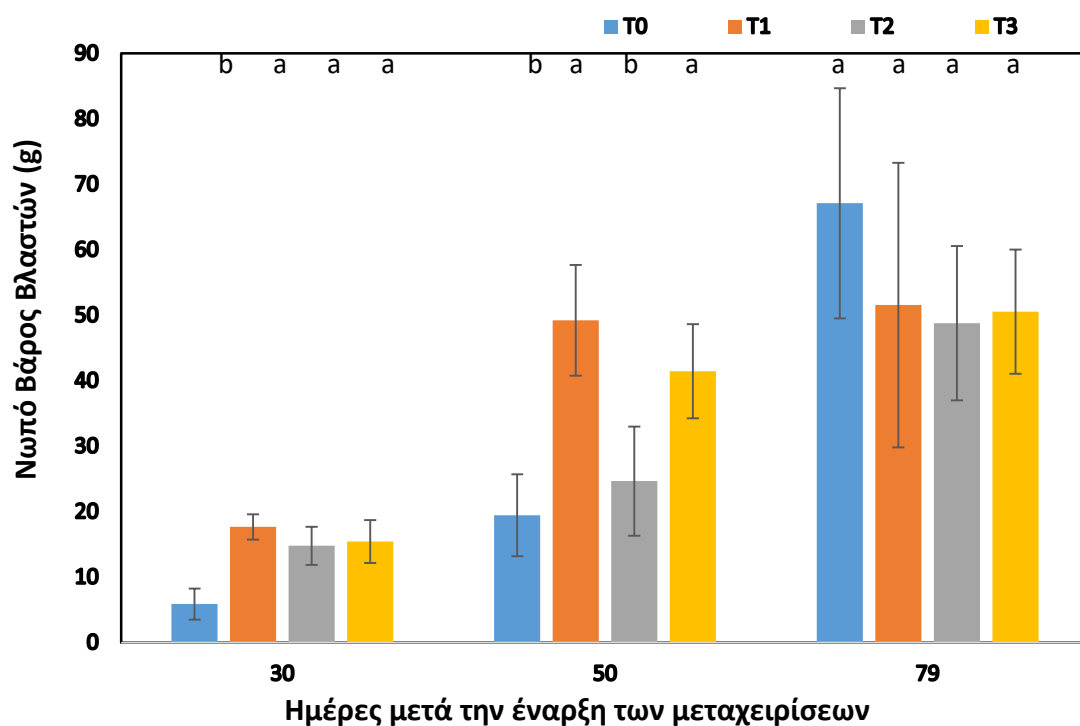
3.11 Νωπό βάρος βλαστών του δυόσμου

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 11, το νωπό βάρος των βλαστών επηρεάστηκε από την εφαρμογή των μεταχειρίσεων από την πρώτη κιόλας καταστροφική συγκομιδή (DAT 30). Πιο συγκεκριμένα ο μάρτυρας υστερούσε σημαντικά συγκριτικά με τις άλλες τρεις μεταχειρίσεις, οι οποίες δεν διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους. Χαρακτηριστικά, η μεταχείριση T1 είχε το τριπλάσιο βάρος συγκριτικά με τον μάρτυρα (5.9 g).

Στην 2η συγκομιδή (DAT 50) η μεταχείριση με το πρότυπο διάλυμα και την προσθήκη NaCl, μαζί με την T3, είχαν τις μεγαλύτερες τιμές του νωπού βάρους των βλαστών, με την μεταχείριση του μάρτυρα και του T2 να έχουν παρόμοιες χαμηλές

τιμές. Ενδεικτικά η μεταχείριση T1 συνέχισε να έχει το τριπλάσιο βάρος συγκριτικά με τον μάρτυρα (19.4 g).

Τέλος, στην 3η συγκομιδή δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων, με τον μαρτυρά ωστόσο να έχει την μεγαλύτερη αύξηση συγκριτικά με την 2η καταστροφική, καθώς αύξησε το νωπό βάρος των βλαστών μέσα στο διάστημα αυτό σχεδόν κατά 3.5 φορές.



Διάγραμμα 11. Μέσο νωπό βάρος των βλαστών του δυόσμου κατά τις 3 συγκομιδές.

Πίνακας 7. Μέσο νωπό βάρος των βλαστών του δυόσμου.

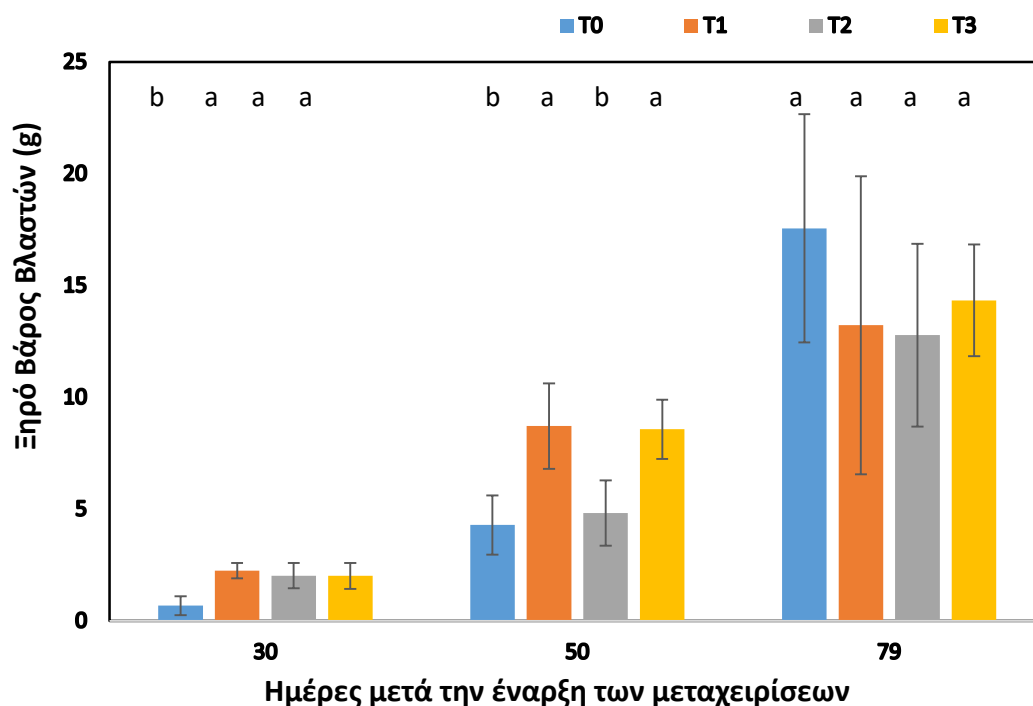
Μεταχειρίσεις	1 ^η Συγκομιδή	2 ^η Συγκομιδή	3 ^η Συγκομιδή
T0	5.9 ± 2.4b	19.4 ± 6.3b	67.1 ± 17.6a
T1	17.7 ± 1.9a	49.2 ± 8.5a	51.6 ± 21.7a
T2	14.8 ± 2.9a	24.7 ± 8.3b	48.8 ± 11.8a
T3	15.4 ± 3.3a	41.4 ± 7.2a	50.6 ± 9.5a

3.12 Ξηρό βάρος βλαστών του δυόσμου

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 12, το ξηρό βάρος των βλαστών επηρεάστηκε από την εφαρμογή των μεταχειρίσεων από την πρώτη κιάλας καταστροφική συγκομιδή (DAT 30). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ήταν όμοιες με αυτές που παρατηρήθηκαν στο βάρος των νωπών βλαστών. Πιο συγκεκριμένα ο μάρτυρας υστερούσε σημαντικά συγκριτικά με τις άλλες τρεις μεταχειρίσεις, οι οποίες δεν διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους. Χαρακτηριστικά, η μεταχείριση T1 είχε σχεδόν 3,5 φορές περισσότερο βάρος συγκριτικά με τον μάρτυρα (0.7 g).

Στην 2^η συγκομιδή (DAT 50) η μεταχείριση με το πρότυπο διάλυμα και την προσθήκη NaCl, μαζί με την T3, είχαν τις μεγαλύτερες τιμές του ξηρού βάρους των βλαστών, με την μεταχείριση του μάρτυρα και του T2 να έχουν παρόμοιες χαμηλές τιμές. Ενδεικτικά η μεταχείριση T1 είχε το διπλάσιο βάρος συγκριτικά με τον μάρτυρα (4.3 g).

Τέλος, στην 3^η συγκομιδή δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων, με τον μάρτυρα ωστόσο να έχει την μεγαλύτερη αύξηση συγκριτικά με την 2^η συγκομιδή, καθώς αύξησε το ξηρό βάρος των βλαστών σχεδόν κατά 4 φορές.



Διάγραμμα 12. Μέσο ξηρό βάρος των βλαστών του δυόσμου κατά τις 3 συγκομιδές.

Πίνακας 8. Μέσο ξηρό βάρος των βλαστών του δυόσμου.

Μεταχειρίσεις	1 ^η Συγκομιδή	2 ^η Συγκομιδή	3 ^η Συγκομιδή
T0	0.7 ± 0.4b	4.3 ± 1.3b	17.6 ± 5.1a
T1	2.2 ± 0.3a	8.7 ± 1.9a	13.2 ± 6.7a
T2	2 ± 0.6a	4.8 ± 1.5b	12.8 ± 4.1a
T3	2 ± 0.6a	8.6 ± 1.3a	14.3 ± 2.5a

3.13 Λόγος νωπού βάρους των φύλλων προς νωπό βάρος βλαστών

Σύμφωνα με τον Πίνακα 9, ο λόγος του νωπού βάρους των φύλλων προς το νωπό βάρος βλαστών κατά την 1^η συγκομιδή (DAT 30) ήταν μεγαλύτερος για τον μάρτυρα. Οι άλλες μεταχειρίσεις δεν είχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Ωστόσο κατά την 2^η συγκομιδή (DAT 50) παρατηρείται ότι η μεταχείριση T2 είχε την μεγαλύτερη τιμή του λόγου (1.6). Ωστόσο δεν εντοπίστηκαν σημαντικές διαφορές με τον μάρτυρα, με τον τελευταίο να μην παρουσιάζει διαφορές ούτε με την T1, αλλά ούτε και με την T3.

Τέλος, κατά την 3^η συγκομιδή, η T1 υπερτερεί συγκριτικά με τον μάρτυρα, αλλά δεν διέφερε σημαντικά από τις T2 και T3.

Πίνακας 9. Λόγος νωπού βάρους των φύλλων προς νωπό βάρος βλαστών.

Μεταχειρίσεις	1 ^η Συγκομιδή	2 ^η Συγκομιδή	3 ^η Συγκομιδή
T0	2.1 ± 0.6a	1.4 ± 0.3ab	1.2 ± 0.2b
T1	1.4 ± 0.2b	1.1 ± 0.1b	1.7 ± 0.5a
T2	1.4 ± 0.2b	1.6 ± 0.4a	1.6 ± 0.4ab
T3	1.4 ± 0.3b	1.1 ± 0.2b	1.5 ± 0.2ab

3.14 Λόγος ξηρού βάρους των φύλλων προς ξηρό βάρος βλαστών

Σύμφωνα με τον Πίνακα 10, ο λόγος του ξηρού βάρους των φύλλων προς το ξηρό βάρος βλαστών, κατά την 1^η συγκομιδή, ήταν μεγαλύτερος για τον μάρτυρα. Οι άλλες μεταχειρίσεις δεν είχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Ωστόσο κατά την 2^η συγκομιδή (DAT 50) παρατηρείται ότι η μεταχείριση T2 είχε την μεγαλύτερη τιμή του λόγου (1.6). Οι άλλες μεταχειρίσεις δεν είχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.

Τέλος, κατά την 3^η συγκομιδή, η T2 υπερτερούσε συγκριτικά με τις T1 και T3, αλλά δεν διέφερε σημαντικά από τον μάρτυρα.

Πίνακας 10. Λόγος ξηρού βάρους των φύλλων προς ξηρό βάρος βλαστών.

Μεταχειρίσεις	1^η Συγκομιδή	2^η Συγκομιδή	3^η Συγκομιδή
T0	3 ± 0.8a	0.9 ± 0.3b	1.2 ± 0.2ab
T1	1.8 ± 0.3b	1.1 ± 0.1b	1 ± 0.2b
T2	1.7 ± 0.5b	1.6 ± 0.4a	1.3 ± 0.3a
T3	1.9 ± 0.6b	1.1 ± 0.2b	1 ± 0.1b

4. Συζήτηση

Ένα σημαντικό ζήτημα με το οποίο προβληματίζεται η επιστημονική κοινότητα τις τελευταίες δεκαετίες, είναι η παραγωγή αγροτικών προϊόντων σε αλατούχα εδάφη και περιοχές με χαμηλής ποιότητας αρδευτικό νερό. Στην συγκεκριμένη εργασία, αξιολογήθηκε με βάση ποσοτικά χαρακτηριστικά η υδροπονική καλλιέργεια του δυόσμου (δευτερεύουσα καλλιέργεια), αξιοποιώντας το απορρέον θρεπτικό διάλυμα της καλλιέργειας τομάτας (πρωτεύουσα καλλιέργεια). Επιπλέον, με την αύξηση της αλατότητας μέσω της προσθήκης NaCl στα διαλύματα άρδευσης του δυόσμου, δημιουργήθηκαν συνθήκες οσμωτικής καταπόνησης, ώστε να παρατηρηθεί η επίδραση της στα φυτά του δυόσμου με ανώτατο όριο ηλεκτρικής αγωγιμότητας 8dS m^{-1} .

Στο συγκεκριμένο πείραμα δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στο ύψος των φυτών του δυόσμου, μεταξύ των διαφορετικών μεταχειρίσεων. Αντίθετα τα αποτελέσματα των Chrysargyris et al., (2019a) σε φυτά δυόσμου, όπου εκτέθηκαν σε συνθήκες αλατότητας 50 mM NaCl, διαπιστώθηκε σημαντική μείωση του ύψους συγκριτικά με τον μάρτυρα του πειράματος. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσίασαν σε πειράματα τους οι Chrysargyris et al., (2019b), όπου φυτά δυόσμου που αρδευόνταν με 150 mM NaCl είχαν μειωμένο ύψος.

Σύμφωνα με τον García και τους συνεργάτες του (2002), υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις ότι η χλωροφύλλη και άλλες φωτοσυνθετικές χρωστικές τείνουν να μειώνονται, όταν αυξάνεται η αλατότητα. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται στην αυξημένη αποικοδόμηση και αναστολή της σύνθεσης των χρωστικών αυτών (García et al., 2002). Στο συγκεκριμένο πείραμα, ο μάρτυρας παρουσίασε σε όλη τη διάρκεια του πειράματος τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης, διαφέροντας σημαντικά από τις άλλες τρεις μεταχειρίσεις. Έτσι τα φυτά του δυόσμου με την αύξηση της αγωγιμότητας δεν μείωσαν την συγκέντρωση των φύλλων τους σε χλωροφύλλη, κάτι που ίσως υποδηλώνει την ανεκτικότητα τους στην αλατότητα.

Η αλατότητα επηρεάζει σημαντικά τον φωτοσυνθετικό ρυθμό, την στοματική αγωγιμότητα και την εσωτερική συγκέντρωση CO₂ (Chaves et al., 2008). Στο πείραμα των Khanam και Mohammad (2018) με φυτά μέντας, παρατηρήθηκε μειωμένος ρυθμός φωτοσύνθεσης, και ειδικά στην μεταχείριση που εφαρμόστηκε NaCl με συγκέντρωση 150 mM. Το αποτέλεσμα αυτό το αποδίδουν σε μειωμένη συγκέντρωση χλωροφύλλης στα φύλλα, τη μειωμένη στοματική αγωγιμότητα και τη μειωμένη διαπνοή. Στο συγκεκριμένο πείραμα παρουσιάστηκαν σημαντικές διαφορές

μεταξύ των μετρήσεων. Ειδικότερα ως προς τον μάρτυρα, ο οποίος είχε το μεγαλύτερο ρυθμό φωτοσύνθεσης σε κάποιες από τις μετρήσεις, ενώ σε αρκετές είχε τον μικρότερο ρυθμό ή παρόμοιο με τις άλλες μεταχειρίσεις.

Όπως αναφέρεται σε μελέτη από τους Wang et al. (2013), η εφαρμογή K^+ μπορεί να ρυθμίζει την στοματική αγωγιμότητα και θα μπορούσε να διατηρήσει ή και να ενισχύσει τον ρυθμό της φωτοσύνθεσης, αλλά ακόμη και να προστατεύσει τη δομή των χλωροφυλλών. Αυτό συνάδει με την παρατήρηση των Khanam και Mohammad (2018), όπου η προσθήκη NaCl στο διάλυμα θρέψης οδήγησε σε σημαντική μείωση του K στον φυτικό ιστό.

Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι η συγκέντρωση K^+ , στον φυτικό ιστό μειώνεται καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση του Na^+ στη ριζόσφαιρα, λόγω του ανταγωνισμού πρόσληψης των δυο αυτών στοιχείων, με τελικό αποτέλεσμα την μείωση της ανάπτυξης και της απόδοσης των φυτών (Munns, 1993, Lopez and Satti, 1996, Grattan and Grieve, 1999).

Παρόμοια αποτελέσματα παρουσίασαν οι Tabatabaie και Nazari (2007), όπου σε φυτά μέντας που εφαρμόστηκε θρεπτικό διάλυμα με NaCl και ηλεκτρική αγωγιμότητα 5.6 dS m^{-1} , παρατηρήθηκε αύξηση της ολικής χλωροφύλλης. Ωστόσο, τα αποτελέσματα των Farsaraei et al, (2020) σε φυτά βασιλικού έδειξαν ότι επιτεύχθηκε μεγαλύτερη συγκέντρωση χλωροφύλλης στον μάρτυρα. Με την αύξηση της αλατότητας, η συγκέντρωση της ολικής χλωροφύλλης μειωνόταν, με την μικρότερη συγκέντρωση να την έχει η μεταχείριση με την συγκέντρωση 120 mM NaCl .

Σε άλλο πείραμα που πραγματοποιήθηκε από τους Faliagka et al. (2021), όπου αρδεύτηκαν φυτά βασιλικού με τέσσερα διαφορετικά επίπεδα ηλεκτρικής αγωγιμότητας ($2, 4, 6$ και 8 dS m^{-1}), οι τελικές συγκεντρώσεις χλωροφύλλης μεταξύ της μεταχείρισης με $EC 2 \text{ dS m}^{-1}$ και αυτών με 6 και 8 dS m^{-1} , δεν είχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Τα αποτελέσματα του πειράματος, όσο αναφορά την στιγμιαία WUE, έδειξαν το μάρτυρα και τη μεταχείριση με το πρότυπο διάλυμα και την προσθήκη NaCl να διαφέρουν σημαντικά από τις μεταχειρίσεις των απορροών, όπου είχαν την χαμηλότερη στιγμιαία WUE. Στο πείραμα των Faliagka et al. (2021), παρατηρήθηκε σημαντική μείωση του WUE σε φυτά βασιλικού, όσο αυξανόταν η αλατότητα των διαλυμάτων θρέψης, καθώς είχε δυσμενείς επιπτώσεις για την παραγωγή βιομάζας. Ωστόσο με την εφαρμογή του NFT (Nutrient Film Technique), παρά την αύξηση του

NaCl στο αρδευτικό διάλυμα η WUE ήταν παρόμοια για όλες τις μεταχειρίσεις. Να αναφερθεί ότι και στις δυο περιπτώσεις η WUE υπολογίστηκε με το πηλίκο της παραγομένης βιομάζας προς τον όγκο του θρεπτικού διαλύματος που εφαρμόστηκε.

Το νωπό βάρος του μάρτυρα ήταν σημαντικά μειωμένο σε σχέση με τις άλλες μεταχειρίσεις κατά την πρώτη συγκομιδή. Κατά την 2^η συγκομιδή, η μεταχείριση με την μεγαλύτερη παραγωγή ήταν αυτή του πρότυπο διαλύματος με την προσθήκη NaCl. Τέλος στην 3^η συγκομιδή, δεν υπήρχαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Τα δεδομένα των Khanam και Mohammad (2018) έδειξαν ότι η αύξηση των επιπέδων αλατότητας μείωσε το φρέσκο βάρος βλαστών και ριζών και το ξηρό βάρος βλαστών και ριζών. Συγκεκριμένα παρατήρησαν μείωση στο φρέσκο βάρος ανά φυτό, κατά 16.12%, 20.89% και 25.06% στις μεταχειρίσεις με 50, 100 και 150 mM NaCl αντίστοιχα.

Παρόμοια αποτελέσματα παρουσίασαν οι Tabatabaie και Nazari (2007), όπου σε φυτά μέντας που εφαρμόστηκε θρεπτικό διάλυμα με NaCl και ηλεκτρική αγωγιμότητα 5.6 dS m^{-1} , παρατηρήθηκε ότι το φρέσκο και ξηρό βάρος των φύλλων είχαν μεγαλύτερη τιμή στην ηλεκτρική αγωγιμότητα 1.4 dS m^{-1} . Αύξηση της EC του διαλύματος είχε ως αποτέλεσμα την μείωση του φρέσκου βάρους του φυτού. Τα αποτελέσματα των Chrysargyris et al., (2019a) για τα φυτά του δυόσμου, έδειξαν ότι η νωπή βιομάζα μειώθηκε κατά 50% σε επίπεδο αλατότητας 50 mM NaCl και κατά 60% σε αλατότητα 100 mM NaCl, αντίστοιχα. Επίσης στα 100 mM NaCl παρατηρήθηκε σημαντικά υψηλότερη ξηρή μάζα στο υπέργειο τμήμα των φυτών, έως και 38.9% σε σύγκριση με τον μάρτυρα.

Στο συγκεκριμένο πείραμα δεν παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων ως προς των λόγο νωπού προς ξηρού βάρους. Στην 2^η συγκομιδή φάνηκε να υπερτερεί η μεταχείριση του πρότυπου διαλύματος με NaCl από τον μάρτυρα και τις απορροές με NaCl. Ωστόσο στην 3^η συγκομιδή μόνο η μεταχείριση με τις απορροές και το NaCl φάνηκε να υστερεί από τις άλλες μεταχειρίσεις. Το νωπό και ξηρό βάρος των φύλλων, δεν επηρεάστηκαν από την υψηλή αγωγιμότητα, καθώς στην 3^η συγκομιδή καμία από τις μεταχειρίσεις δε διέφεραν στατιστικά σημαντικά, με την ίδια εικόνα να παρατηρείται και στο νωπό και ξηρό βάρος των βλαστών.

5. Συμπεράσματα

Αξιολογώντας τα παραπάνω αποτελέσματα και συγκρίνοντας τα με την αντίστοιχη βιβλιογραφία, διαπιστώνεται ότι η υιοθέτηση και η περαιτέρω αναβάθμιση των ανοιχτών υδροπονιών συστημάτων επάλληλων καλλιεργειών, αποτελεί μια μέθοδος παραγωγής αγροτικών προϊόντων με αειφορικό τρόπο, καθώς αξιοποιεί τις εκροές ως εισροές (νερό και λιπάσματα) για μια άλλη καλλιέργεια.

Σε αυτό το πείραμα τα φυτά του μάρτυρα δεν είχαν σημαντική διαφορά στο ύψος, συγκριτικά με τις άλλες μεταχειρίσεις. Η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη ήταν μεγαλύτερη για την T2 και T3, ενώ ο μάρτυρας είχε καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος την χαμηλότερη, συγκριτικά με τις άλλες τρεις μεταχειρίσεις. Ο ρυθμός φωτοσύνθεσης και διαπνοής, παρουσίασαν αυξομειώσεις κατά τη διάρκεια του πειράματος, με αποτέλεσμα να μη μπορεί να βγει κάποιο ασφαλές συμπέρασμα, από τη συγκεκριμένη μέτρηση.

Σημαντικές διαφορές εντοπίστηκαν στην παραγωγή βιομάζας, και στο νωπό και ξηρό βάρος των φύλλων και των βλαστών, με την T1 να παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα, έναντι των άλλων μεταχειρίσεων. Πιο συγκεκριμένα, ως προς την παραγωγή βιομάζας, στην πρώτη συγκομιδή, με εξαίρεση τον μάρτυρα, δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές. Τη μέγιστη παραγωγή στη δεύτερη συγκομιδή παρουσίασε η T1. Τέλος, στην τελευταία συγκομιδή δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Σημαντικές διαφορές εντοπίστηκαν στο νωπό και ξηρό βάρος των φύλλων και των βλαστών. Ως προς το βάρος των φύλλων, η T1 παρουσίαζε καλύτερα αποτελέσματα κατά την πρώτη και δεύτερη συγκομιδή. Ως προς το βάρος των βλαστών, στην πρώτη συγκομιδή (με εξαίρεση τον μάρτυρα) δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές, ενώ στην δεύτερη συγκομιδή, η T1 και η T3 είχαν τις μέγιστες τιμές. Επίσης, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές κατά την τελευταία συγκομιδή, τόσο στο χλωρό όσο και στο ξηρό βάρος των φύλλων και των βλαστών.

Όμοια αποτελέσματα με την παραγόμενη βιομάζα, παρατηρήθηκαν και στην παραγωγή ξηράς ουσίας, με μοναδική διαφορά να παρατηρείται στη δεύτερη συγκομιδή, όπου και η μεταχείριση των καθαρών απορροών είχε την ίδια παραγωγή με την μεταχείριση του πρότυπου διαλύματος με NaCl, δηλαδή (T3 με T1).

Ο λόγος του νωπού προς ξηρού βάρους των φυτών του δυόσμου κατά την πρώτη συγκομιδή, δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές. Ωστόσο κατά την

δεύτερη και τρίτη συγκομιδή, την μεγαλύτερη τιμή την είχε η T1. Κατά την τελευταία συγκομιδή, η T1 είχε μεγαλύτερο λόγο από την μεταχείριση των αμιγών απορροών (T3), αλλά δεν διέφερε σημαντικά από την T0 και T2.

Ο μάρτυρας και η μεταχείριση T1 είχαν σε σημαντικό αριθμό μετρήσεων, υψηλότερη στιγμιαία αποτελεσματικότητα χρήσης νερού (WUE), και υπερτερούσαν από την μεταχείριση των αμιγών απορροών (T3) και την T2.

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα του πειράματος, η μεταχείριση με το πρότυπο διάλυμα μαζί με προσθήκη NaCl, είναι αυτή που ενδείκνυται για την παραγωγή του δυόσμου, καθώς παρατηρήθηκε μέγιστη αποδοτικότητα χρήσης νερού και παραγωγής βιομάζας. Συμπερασματικά, ο δυόσμος έχει μεγάλη ανεκτικότητα, μέχρι την τιμή της ηλεκτρο-αγωγιμότητας 8 dS m^{-1} , σε συνθήκες υψηλής αλατότητας και δύναται να χρησιμοποιηθεί ως δευτερεύουσα καλλιέργεια σε υπόστρωμα πετροβάμβακα, αξιοποιώντας τις απορροές από την υδροπονική καλλιέργεια τομάτας.

6. Βιβλιογραφία

- ADC BioScientific instruction manual.* (2018).
- Ahmad P. (2010). Growth and antioxidant responses in mustard (*Brassica juncea* L.) plants subjected to combined effect of gibberellic acid and salinity. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 56 (5): 575-588.
- Akl, I. A., Savvas, D., Papadantonakis, N., Lydakis-Simantiris, N., & Kefalas, P. (2003). Influence of ammonium to total nitrogen supply ratio on growth, yield and fruit quality of tomato grown in a closed hydroponic system. *European Journal of Horticultural Science*, 68 (5): 204-211.
- AlShrouf A. (2017). *Hydroponics, aeroponic and aquaponic as compared with conventional farming. American Academic Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, 27(1), 247-255.
- Asaduzzaman, M., Kobayashi, Y., Mondal, M. F., Ban, T., Matsubara, H., Adachi, F., & Asao, T. (2013). Growing carrots hydroponically using perlite substrates. *Scientia Horticulturae*, 159, 113-121.
- Avdouli, D., Max, J. F., 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. Horticulturae*, 7(8), 203.
- Ayenan, M. A. T., Danquah, A., Hanson, P., Ampomah-Dwamena, C., Sodedji, F. A. K., Asante, I. K., & Danquah, E. Y. (2019). Accelerating breeding for heat tolerance in tomato (*Solanum lycopersicum* L.): an integrated approach. *Agronomy*, 9 (11): 720.
- Bacon, M. A. (2004). *Water use efficiency in plant biology*, Blackwell Publishing Oxford, p. 1-26.
- Barbosa, G., Gadelha, F., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G.M. and Halden, R.U. (2015). *Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using Hydroponic vs Conventional Agricultural Methods*”,*International journal of environmental research and public health*, 12(6), 6879-6891.
- Brahmi, F., Khodir, M., Mohamed, C., & Pierre, D. . (2017). Chemical composition and biological activities of *Mentha* species. *Aromatic and medicinal plants-Back to nature*, 10: 47-79.

- Brechner, M., Both, A. J., & Staff, C. E. A. (2013). *Hydroponic lettuce handbook. Cornell Controlled Environment Agriculture. 1-48.*
- Bussell W. T. & McKennie S. (2004). Rockwool in horticulture, and its importance and sustainable use in New Zealand. *New Zealand journal of crop and horticultural science*, 32 (1): 29-37.
- Carmassi, G., Incrocci, L., Maggini, R., Malorgio, F., Tognoni, F., & Pardossi, A. . (2007). An aggregated model for water requirements of greenhouse tomato grown in closed rockwool culture with saline water. *Agricultural water management*, 88(1-3): 73-82.
- Chaves M. M., Flexas J., Pinheiro C. (2008). *Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell, Annals of Botany*, 103 (3): 551-560.
- Chrysargyris A., Papakyriakou E., Petropoulos S. and Tzortzakis N. (2019b). *The combined and single effect of salinity and copper stress on growth and quality of Mentha spicata plants, Journal of Hazardous Materials*, 368: 584-593.
- Chrysargyris A., Nikolaidou E., Stamatakis A. and Tzortzakis N. (2017). Vegetative, physiological, nutritional and antioxidant behavior of spearmint (*Mentha spicata* L.) in response to different nitrogen supply in hydroponics. *Journal of applied research on medicinal and aromatic plants*, 6: 52-61.
- Chrysargyris A., Solomou M., Petropoulos S. and Tzortzakis N. (2019a). *Physiological and biochemical attributes of Mentha spicata when subjected to saline conditions and cation foliar application, Journal of Plant Physiology*, 232: 27-38.
- Cifuentes-Torres, L., Mendoza-Espinosa, L. G., Correa-Reyes, G., & Daesslé, L. W. (2021). *Hydroponics with wastewater: a review of trends and opportunities. Water and Environment Journal*, 35 (1): 166-180.
- Dasgan, H. Y., & Ekici, B. (2004). *Comparison of open and recycling systems for ion accumulation of substrate, nutrient uptake and water and water use of tomato plants. In International Symposium on Soilless Culture and Hydroponics. 697: 399-408.*
- De Rijck, G., & Schrevens, E. (1998). Cationic speciation in nutrient solutions as a function of pH. *Journal of plant nutrition*, 21 (5): 861-870.

- Domeño, I., Irigoyen, I., & Muro, J. (2011). Comparison of traditional and improved methods for estimating the stability of organic growing media. *Scientia horticulturae*, 130 (1): 335-340.
- Domingues, D. S., Takahashi, H. W., Camara, C. A., & Nixdorf, S. L. (2012). Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production. *Computers and electronics in agriculture*, 84: 53-61.
- Dysko, J., Kaniszewski, S., & Kowalczyk, W. (2008). The effect of nutrient solution pH on phosphorus availability in soilless culture of tomato. *Journal of Elementology*, 13 (2).
- Elvanidi A., Benitez Reascos C. M., Gourzoulidou E., Kunze A., Max J. F. & Katsoulas N. (2020). Implementation of the circular economy concept in greenhouse hydroponics for ultimate use of water and nutrients. *Horticulturae*, 6 (4): 83.
- Faliagka S., Elvanidi A., Spanoudaki S., Kunze A., Max J. F. & Katsoulas N. (2021). *Effect of NaCl or Macronutrient-Imposed Salinity on Basil Crop Yield and Water Use Efficiency. Horticulturae*, 7 (9): 296.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO Statistical Yearbook 2013, Vasa, Brickyard.* (2013).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. Tracking water to make the most of it.* (2017). Ανάκτηση από <https://www.fao.org/fao-stories/article/en/c/1381233/>
- García-Caparrós, P., Llanderal, A., Maksimovic, I., & Lao, M. T. (2018). Cascade cropping system with horticultural and ornamental plants under greenhouse conditions. *Water*, 10 (2): 125.
- García-Sánchez F., Jifon J., Carvajal M. and Syvertsen J. (2002). *Gas exchange, chlorophyll and nutrient contents in relation to Na⁺ and Cl⁻ accumulation in 'Sunburst' mandarin grafted on different rootstocks, Plant Science*, 162, (5): 705-712.
- Genuncio, G. D. C., Gomes, M., Ferrari, A. C., Majerowicz, N., & Zonta, E. (2012). Hydroponic lettuce production in different concentrations and flow rates of nutrient solution. *Horticultura Brasileira*, 30 (3): 526-530.
- Grattan, S. R., & Grieve, C. M. (1998). *Salinity–mineral nutrient relations in horticultural crops. Scientia horticulturae*, 78(1-4): 127-157.

- Grattan, S. R., Oster, J. D., Benes, S. E., & Kaffka, S. R. (2012). Use of saline drainage waters for irrigation. *Agricultural Salinity Assessment and Management*, 2nd ed.; Wallender, WW, Tanji, KK, Eds: 687-719.
- Hanna, H. Y. (2010). Reducing time and expense to recycle perlite for repeat use in greenhouse tomato operations. *Horttechnology*, 20 (4): 746-750.
- Herrero, B., Blázquez, M. E., & Cristóbal, M. D. (2014). *Agronomic parameters assessment in hydroponic tomato crop. Horticultura Brasileira*, 32: 385-390.
- Hultberg, M., Carlsson, A. S., & Gustafsson, S. (2013). *Treatment of drainage solution from hydroponic greenhouse production with microalgae. Bioresource technology*, 136, 401-406.
- Huo, S., Liu, J., Addy, M., Chen, P., Necas, D., Cheng, P. & Ruan, R. (2020). *The influence of microalgae on vegetable production and nutrient removal in greenhouse hydroponics. Journal of Cleaner Production*, 243: 118563.
- Incrocci L., Carmassi G., Maggini R., Massa D., Tognoni F., Pardossi A., & Malorgio, F. (2006). Simplified models for the water relations of soilless cultures: what they do or suggest for sustainable water use in intensive horticulture. *III International Symposium on Models for Plant Growth, Environmental Control and Farm Management in Protected Cultivation 718*, (pp. 425-434).
- Ivushkin, K., Bartholomeus, H., Bregt, A. K., Pulatov, A., Kempen, B., & De Sousa, L. (2019). *Global mapping of soil salinity change. Remote sensing of environment*, 231, 111260.
- Katsoulas, N., Sapounas, A., De Zwart, F., Dieleman, J. A., & Stanghellini, C. . (2015). Reducing ventilation requirements in semi-closed greenhouses increases water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 156: 90-99.
- Katsoulas, N., Savvas, D., Kitta, E., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2015). Extension and evaluation of a model for automatic drainage solution management in tomato crops grown in semi-closed hydroponic systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 113: 61-71.
- Keith R. (2003). *How to Hydroponics*. The Futuregarden Press, New York.
- Kempen, E., Agenbag, G. A., & Deckers, S. (2017). *Variations in water and macronutrient uptake of soilless tomato as affected by the nutrient solution composition. South African Journal of Plant and Soil*, 34 (2): 139-148.

- Khanam, D., & Mohammad, F. (2018). *Plant growth regulators ameliorate the ill effect of salt stress through improved growth, photosynthesis, antioxidant system, yield and quality attributes in Mentha piperita L. Acta Physiologiae Plantarum, 40 (11): 1-13.*
- Khorasaninejad, S., Mousavi, A., Soltanloo, H., Hemmati, K., & Khalighi, A. (2010). The effect of salinity stress on growth parameters, essential oil yield and constituent of peppermint (*Mentha piperita L.*). *World Applied Sciences Journal, 11 (11): 1403-1407.*
- Komosa, A., Piróg, J., Weber, Z., & Markiewicz, B. . (2011). *Comparison of yield, nutrient solution changes and nutritional status of greenhouse tomato grown in recirculating and non-recirculating nutrient solution systems. Journal of plant nutrition, 34(10), 1473-1488.*
- Lee, S., & Lee, J. (2015). Beneficial bacteria and fungi in hydroponic systems: Types and characteristics of hydroponic food production methods. *Scientia Horticulturae, 195: 206-215.*
- Li, Z., Yang, H., Wu, X., Guo, K., & Li, J. . (2015). Some aspects of salinity responses in peppermint (*Mentha× piperita L.*) to NaCl treatment. *Protoplasma, 252 (3): 885-899.*
- Lopez, M. V., & Satti, S. M. E. . (1996). *Calcium and potassium-enhanced growth and yield of tomato under sodium chloride stress. Plant science, 114(1):, 19-27.*
- Mahajan, S., & Tuteja, N. (2005). Cold, salinity and drought stresses: an overview. *Archives of biochemistry and biophysics, 444 (2): 139-158.*
- Mahendran, G., Verma, S. K., & Rahman, L. U. (2021). The traditional uses, Phytochemistry and pharmacology of Spearmint (*Mentha spicata L.*): A review. *Journal of Ethnopharmacology, 278: 114266.*
- Maher, M., Prasad, M. and Raviv, M. (2008). Organic soilless media components. In: M. Raviv & J. Lieth (Eds.), *Soilless Culture: Theory and Practice*. New York: Elsevier, pp. 459– 504.
- 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. *Agricultural Water Management, 97(7), 971-980.*

- Massa D., Magán J. J., Montesano F. F. & Tzortzakis, N. (2020). *Minimizing water and nutrient losses from soilless cropping in southern Europe. Agricultural water management, 241, 106395.*
- McCarthy, H. R., Pataki, D. E., & Jenerette, G. D. (2011). Plant water-use efficiency as a metric of urban ecosystem services. *Ecological Applications, 21 (8): 3115-3127.*
- Medrano, H., Flexas, J., Ribas-Carbó, M., & Gulías, J. (2010). Measuring water use efficiency in grapevines. *Methodologies and results in grapevine research.* Springer, Dordrecht, pp. 123-134.
- Medrano, H., Tomás, M., Martorell, S., Flexas, J., Hernández, E., Rosselló, J., & Bota, J. (2015). From leaf to whole-plant water use efficiency (WUE) in complex canopies: Limitations of leaf WUE as a selection target. *The Crop Journal, 3 (3): 220-228.*
- Modu, F., Adam, A., Aliyu, F., Mabu, A., & Musa, M. (2020). *A survey of smart hydroponic systems. Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, 5 (1): 233-248.*
- Mohammed, S. (2018). *Tomorrow's Agriculture:" NFT Hydroponics"-Grow Within Your Budget, Manila, Springer International Publishing, Philippines, pp. 1- 50*
- Moreno-Pérez, E. D. C., Castillo, S. D., Gutiérrez-Tlaque, J., González-Molina, L., & Pineda-Pineda, J. (2015). *Greenhouse lettuce production with and without nutrient solution recycling. Revista Chapingo. Serie horticultura, 21(1), 43-55.*
- Munns R. (1993). *Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses. Plant, Cell & Environment, 16 (1): 15-24.*
- Munns R. & Tester M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol., 59: 651-681.*
- Munns R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, cell & environment, 25 (2): 239-250.*
- Munns R. (2005). Genes and salt tolerance: bringing them together. *New phytologist, 167 (3): 645-663.*
- Neocleous, D., & Savvas, D. . (2016). NaCl accumulation and macronutrient uptake by a melon crop in a closed hydroponic system in relation to water uptake. *Agricultural Water Management, 165: 22-32.*

- Olympios C. M. (1992). Soilless media under protected cultivation rockwool, peat, perlite and other substrates. In Symposium on Soil and Soilless Media under Protected Cultivation in Mild Winter Climates, 323: 215-234.
- Olympios, C. M., & Choukr-Allah, R. (1999). Overview of soilless culture: advantages, constraints, and perspectives. Protected cultivation in the Mediterranean region, 31, 307-324.
- Orsini, F., Sanoubar, R., Oztekin, G. B., Kappel, N., Tepecik, M., Quacquarelli, C., ... & Gianquinto, G. . (2013). Improved stomatal regulation and ion partitioning boosts salt tolerance in grafted melon. *Functional Plant Biology*, 40 (6): 628-636.
- Papadopoulos A., Bar-tal A., Silber A., Uttam K. Saha and Raviv M. (2008). Inorganic and synthetic organic components of soilless culture and potting mixes, *Soilless Culture*, Elsevier, pp. 505-543.
- Pavan, S., van Heusden, A. W., & Bai, Y. (2009). *Solanum lycopersicum* (tomato). eLS.
- Putra, P. A., & Yuliando, H. (2015). Soilless culture system to support water use efficiency and product quality: a review. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 3: 283-288.
- Qadir, M., Quill rou, E., Nangia, V., Murtaza, G., Singh, M., Thomas, R. J., and Noble, A. D. . (2014). *Economics of salt-induced land degradation and restoration. In Natural resources forum. 38 (4): 282-295.*
- Qadir, M., Wichelns, D., Raschid-Sally, L., McCornick, P. G., Drechsel, P., Bahri, A., and Minhas, P. S. . (2010). *The challenges of wastewater irrigation in developing countries. Agricultural water management, 97(4), 561-568.*
- Rahnama, A., James, R. A., Poustini, K., & Munns, R. (2010). Stomatal conductance as a screen for osmotic stress tolerance in durum wheat growing in saline soil. *Functional Plant Biology*, 37 (3): 255-263.
- Raneem G, Khawlah A., Khadija M., Ajwan J. and Abeer G. (2018). *Comparison between Growing Plants in Hydroponic System and Soil Based System. In Proceedings of the 4th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering , 1-7.*
- Raviv, M., Wallach, R., Silber, A. and Bar Tal, A. (2002). "Substrates and their analysis", in Savvas, D. and Passam, H. (Eds), *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*, Embryo Publications, Athens.

- Rhoades, J.D., Kandiah, A., Mashali, A.M., (1992). *The Use of Saline Water for Crop Production. FAO. Paper 48.*
- Richa, A., Touil, S., Fizir, M., & Martinez, V. (2020). Recent advances and perspectives in the treatment of hydroponic wastewater: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19 (4): 945-966.
- Rodríguez-Delfín, A. (2011). Advances of hydroponics in Latin America. In II International Symposium on Soilless Culture and Hydroponics, 947: 23-32.
- Rodríguez-Jurado, S., García-Trejo, J. F., Mejía-Ugalde, I., Vera-Morales, J. M., Vargas-Hernández, M., & Ávila-Juárez, L. . (2020). Water and fertilizer efficiency in a polyculture cropping system under three production systems. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 10 (2): 95-105.
- Salehi, B., Stojanović-Radić, Z., Matejić, J., Sharopov, F., Antolak, H., Kręgiel, D. & Sharifi-Rad, J. . (2018). Plants of genus *Mentha*: From farm to food factory. *Plants*, 7 (3): 70.
- Sara Farsaraei, Mohammad Moghaddam, Abdollah Ghasemi Pirbalouti. (2020). *Changes in growth and essential oil composition of sweet basil in response of salinity stress and superabsorbents application, Scientia Horticulturae*, 271, 109465.
- Savvas, D., Gianquinto, G., Tuzel, Y., & Gruda, N. . (2013). Soilless culture. *FAO plant production and protection paper*, 217: 303-354.
- Shu, S., Yuan, L. Y., Guo, S. R., Sun, J., & Yuan, Y. H. (2013). Effects of exogenous spermine on chlorophyll fluorescence, antioxidant system and ultrastructure of chloroplasts in *Cucumis sativus* L. under salt stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 63, 209-216.
- Silva H. (2020). A descriptive overview of the medical uses given to *Mentha* aromatic herbs throughout history. *Biology*, 9 (12): 484.
- Singh, J., Sastry, E. V., & Singh, V. (2012). Effect of salinity on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) during seed germination stage. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 18 (1): 45-50.
- Sonneveld C. (1991). Rockwool as a substrate for greenhouse crops. *High-Tech and Micropropagation I*, 285-312.
- Sonneveld C. and Voogt W. . (2009). *Plant nutrition of greenhouse crops. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York*, 431.

- Stanghellini, C., Kempkes, F., Pardossi, A., Incrocci, L., (2005). Closed water loop in greenhouses: effect of water quality and value of produce. *Acta Hortic.* 691: 233–241.
- Steduto, P., Albrizio, R., Giorio, P., & Sorrentino, G. . (2000). Gas-exchange response and stomatal and non-stomatal limitations to carbon assimilation of sunflower under salinity. *Environmental and experimental botany*, 44 (3): 243-255.
- Tabatabaie, S.J. and Nazari J. (2007). *Influence of nutrient concentrations and NaCl salinity on the growth, photosynthesis, and essential oil content of peppermint and lemon verbena. Turk. J. Agric. For., 31: 245–253.*
- Tanji, K.K. and Kielen, N.C., (2002). *Agricultural Drainage Water Management in Arid and Semi-arid Areas. FAO. Paper 61.*
- Treftz, C., & Omaye, S. T. (2016). *Hydroponics: Potential for augmenting sustainable food production in non-arable regions. Nutrition & Food Science.*
- Trejo-Téllez, L. I., & Gómez-Merino, F. C. (2012). Nutrient solutions for hydroponic systems. *Hydroponics-a standard methodology for plant biological researches*, 1-22.
- Vallance, J., Déniel, F., Floch, G. L., Guérin-Dubrana, L., Blancard, D., & Rey, P. (2011). *Pathogenic and beneficial microorganisms in soilless cultures. Sustainable Agriculture (2): 711-726.*
- Varlagas, H., Savvas, D., Mouzakis, G., Liotsos, C., Karapanos, I., & Sigrimis, N. (2010). Modelling uptake of Na⁺ and Cl⁻ by tomato in closed-cycle cultivation systems as influenced by irrigation water salinity. *Agricultural water management*, 97 (9): 1242-1250.
- Vimolmangkang, S., Sitthithaworn, W., Vannavanich, D., Keattikunpairroj, S., & Chittasupho, C. (2010). Productivity and quality of volatile oil extracted from *Mentha spicata* and *M. arvensis* var. *piperascens* grown by a hydroponic system using the deep flow technique. *Journal of natural medicines*, 64 (1): 31-35.
- Wagh, N., Vijendra, P., Avinash, B., Priyanka, S., & Umesh, B. (2016). *PLC based automated hydroponic system. IJSTE-International Journal of Science Technology & Engineering, 2(10).*
- Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., & Guo, S. (2013). *The critical role of potassium in plant stress response. International journal of molecular sciences, 14 (4): 7370-7390.*

- Wei, P., Yang, Y., Fang, M., Wang, F., & Chen, H. (2016). Physiological response of young seedlings from five accessions of *Diospyros L.* under salinity stress. *Horticultural Science & Technology*, 34 (4): 564-577.
- Yeager, T.H., Fare, D., Lea-Cox, J., Ruter, J., Bilderback, T.E., Gilliam, C.H., Niemiera, A.X., Warren, L., Whitwell, T.E., Wright, R.D. and Tilt, K.M. . (2007). Best management practices: guide for producing container - grown plants. 2nd ed. Southern Nurserymen's Association, Maretta, GA. pp. 4-10.
- Yson, R. V., Simonne, E. H., Davis, M., Lamb, E. M., White, J. M., & Treadwell, D. D. . (2007). Effect of nutrient solution, nitrate-nitrogen concentration, and pH on nitrification rate in perlite medium. *Journal of Plant Nutrition*, 30 (6): 901-913.
- Zaragoza, G., & Buchholz, M. (2008). Closed greenhouses for semi-arid climates: critical discussion following the results of the Watergy prototype. In *International Workshop on Greenhouse Environmental Control and Crop Production in Semi-Arid Regions*. 797: 37-42.
- Zeljkočić, S. Ć., Aucique-Perez, C. E., Štefelová, N., & De Diego, N. (2022). Optimizing growing conditions for hydroponic farming of selected medicinal and aromatic plants. *Food Chemistry*, 375: 131845.