



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

Διδακτορική διατριβή

Μελέτη της επίδρασης της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος
και των υδραυλικών ιδιοτήτων του υποστρώματος στην παραγωγή
και την ποιότητα του ασκόλυμπρου (*Scolymus hispanicus* L.)
σε υδροπονική καλλιέργεια

Δημήτριος Μ. Παπαδημητρίου

Επιβλέπων Καθηγητής:

Δημήτριος Σάββας, Καθηγητής ΓΠΑ

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Δημήτριος Σάββας, Καθηγητής ΓΠΑ

Καραπάνος Ιωάννης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΓΠΑ

Θρασύβουλος Μανιός, Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ



**ΑΘΗΝΑ
2024**

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

Διδακτορική διατριβή

Μελέτη της επίδρασης της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος και των υδραυλικών ιδιοτήτων του υποστρώματος στην παραγωγή και την ποιότητα του ασκόλυμπρου (*Scolymus hispanicus* L.) σε υδροπονική καλλιέργεια

Effect of the nutrient solution composition and the hydraulic properties of growing media on yield and quality characteristics of golden thistle (*Scolymus hispanicus* L.) grown in a soilless cropping system

Δημήτριος Μ. Παπαδημητρίου

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Δημήτριος Σάββας, Καθηγητής ΓΠΑ (επιβλέπων)
Ιωάννης Καραπάνος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΓΠΑ
Θρασύβουλος Μανιός, Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ
Γεωργία Ντάτση, Επίκουρη Καθηγήτρια ΓΠΑ
Κωνσταντίνος Σαϊτάνης, Καθηγητής ΓΠΑ
Ελένη Γουμενάκη, Καθηγήτρια ΕΛΜΕΠΑ
Ιωάννης Δαλιακόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ

Μελέτη της επίδρασης της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος και των υδραυλικών ιδιοτήτων του υποστρώματος στην παραγωγή και την ποιότητα του ασκόλυμπρου (*Scolymus hispanicus* L.) σε υδροπονική καλλιέργεια

Τμήμα Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής
Εργαστήριο Κηπευτικών Καλλιεργειών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η υδροπονική καλλιέργεια άγριων λαχανοόμενων ειδών αποτελεί μια μοντέρνα και οικονομικά ελκυστική δραστηριότητα, δεδομένης της υψηλής θρεπτικής και γαστρονομικής και πολιτισμικής τους αξίας. Ωστόσο, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η βέλτιστη διαχείριση της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος για τη διασφάλιση της υψηλής απόδοσης αυτών των εναλλακτικών καλλιεργειών. Στόχος της παρούσας ερευνητικής μελέτης είναι η αξιολόγηση α) της επίδρασης της σχέσης N/K και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του θρεπτικού διαλύματος, β) της επίδρασης της αλατότητας (NaCl) του θρεπτικού διαλύματος και γ) της επίδρασης του υποστρώματος και του υποδοχέα υποστρώματος, δ) της επίδρασης της αναλογίας $\text{NH}_4^+\text{-N}$ / ολικό N και του επιπέδου του ολικού N στις συγκεντρώσεις απορρόφησης και την συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων στους φυτικούς ιστούς, τις φυσιολογικές παραμέτρους, και τα αγρονομικά χαρακτηριστικά της παραγωγής του άγριου λαχανοόμενου φυτού ασκόλυμπρου (*Scolymus hispanicus* L.).

Στην πρώτη εργασία εφαρμόστηκαν 4 θρεπτικά διαλύματα αποτελούμενα από δύο επίπεδα σχέσης N/K σε δύο ηλεκτρικές αγωγιμότητες σε υδροπονική καλλιέργεια του ασκόλυμπρου με υπόστρωμα υδροπονικού περλίτη. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του πειράματος θρέψης προέκυψε ότι δεν υπήρξαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο επιπέδων αγωγιμότητας του θρεπτικού διαλύματος στο νωπό βάρος (g), την διάμετρο και τον αριθμό των φύλλων, ενώ αντίθετα η υψηλότερη σχέση N/K, αύξησε σημαντικά το νωπό βάρος της σαρκώδους ρίζας (g) καθώς και του αριθμού και του νωπού βάρους των φύλλων (g) χωρίς την ύπαρξη αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο παραγόντων ηλεκτρικής αγωγιμότητας και σχέσης N/K. Οι επεμβάσεις του πειράματος δεν επηρέασαν την σχετική πυκνότητα (SPAD) και τον σχετικό φθορισμό F_v/F_m (φωτοσυνθετική ικανότητα) της χλωροφύλλης των φύλλων των φυτών.

Σε άλλο πείραμα, εξετάστηκε η επίδραση τεσσάρων επιπέδων αλατότητας στην ανάπτυξη και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ασκόλυμπρου. Οι επεμβάσεις αλατότητας εφαρμόστηκαν με την παροχή θρεπτικών διαλυμάτων με τέσσερις διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl (0,5, 5,0, 10,0 και 15,0 mM) σε αυτά, οι οποίες οδήγησαν σε τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) ίσες με 2,2, 2,8, 3,2 και 3,8 dS m^{-1} , αντίστοιχα. Μέχρι το τέλος του πειράματος και πλησιάζοντας στο στάδιο εμπορικής συγκομιδής, 120 ημέρες μετά τη μεταφύτευση (HMM), η EC του διαλύματος απορρόφησης έφτασε τα 2,65, 3,33, 3,96, και 4,51 dS m^{-1} , αντίστοιχα. Κατά την πρώτη συγκομιδή, 90 HMM, η αύξηση της συγκέντρωσης NaCl στο θρεπτικό διάλυμα δεν είχε σημαντική επίδραση στον αριθμό των φύλλων, το νωπό και ξηρό βάρος των φύλλων [g φυτό^{-1}] και το ξηρό βάρος της ρίζας [g φυτό^{-1}]. Ωστόσο, κατά την δεύτερη συγκομιδή (120 HMM), το επίπεδο αλατότητας 15,0 mM NaCl μείωσε σημαντικά το νωπό και ξηρό βάρος της ρίζας και των φύλλων χωρίς όμως να επηρεάζει αρνητικά τον αριθμό των φύλλων ανά φυτό σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις αλατότητας 0,5 και 5,0 mM NaCl, ενώ η επέμβαση αλατότητας 10,0 mM NaCl δεν είχε καμία επίδραση σε καμία από τις ποσοτικές παραμέτρους. Οι συγκεντρώσεις των K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} και P στα φύλλα δεν επηρεάστηκαν από τα επίπεδα αλατότητας που εφαρμόστηκαν, ενώ το ολικό-N και το $\text{NO}_3^-\text{-N}$ μειώθηκαν σημαντικά στις επεμβάσεις αλατότητας των 10,0 και 15,0 mM NaCl, 90 HMM. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πειράματος αλατότητας, συμπεραίνεται ότι ο ασκόλυμπρος είναι ένα ανεκτικό φυτό σε μέτρια επίπεδα αλατότητας. Στα συστήματα εκτός εδάφους καλλιέργειας, η αντικατάσταση του εδάφους με μείγματα οργανικών και ανόργανων υποστρωμάτων έχει δώσει λύσεις, αλλά έχει δημιουργήσει και προκλήσεις, όπως η ανάγκη

προσαρμογής της άρδευσης σύμφωνα με τις υδραυλικές ιδιότητες του κάθε υποστρώματος καθώς και σύμφωνα με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις κάθε ξεχωριστού είδους καλλιέργειας. Σε αυτό το πλαίσιο, διερευνήθηκε η επίδραση του φυτοδοχείου (σάκος ή γλάστρα) και των υποστρωμάτων στην απόδοση και τις φυσιολογικές παραμέτρους του ασκόλυμπρου (*Scolymus hispanicus* L.) σε υδροπονική καλλιέργεια. Τα υποστρώματα που μελετήθηκαν ήταν ο περλίτης και ο κοκοφοίνικας σε αναλογίες 4:0, 3:1, 2:2, 1:3 και 0:4, οι οποίες στη συνέχεια αναφέρονται ως 4Π0Κ, 3Π1Κ, 2Π2Κ, 1Π3Κ και 0Π4Κ, αντίστοιχα. Για τον χαρακτηρισμό των υποστρωμάτων ως προς τις υδραυλικές τους ιδιότητες, προσδιορίστηκαν η υδραυλική αγωγιμότητα (K), το εύκολα διαθέσιμο νερό (EAW) και η υδατοχωρητικότητα του φυτοδοχείου (AWC) για το καθένα από αυτά, χρησιμοποιώντας τον αναλυτή υδραυλικών χαρακτηριστικών εδάφους HYPROP2. Τα μείγματα υποστρωμάτων 4Κ0Π και 3Κ1Π αύξησαν σημαντικά το συνολικό νωπό βάρος του φυτού τόσο των φύλλων όσο και των εδώδιμων ριζοκόνδυλων σε σύγκριση με την καλλιέργεια σε περλίτη, ενώ σημαντική φάνηκε η επίδραση της γεωμετρίας του φυτοδοχείου στην αναλογία μεταξύ της ανάπτυξης του υπέργειου και υπόγειου τμήματος του φυτού ($FW_L:FW_R$). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το εύκολα διαθέσιμο νερό αυξάνεται σημαντικά όταν το κλάσμα του κοκοφοίνικα αυξάνεται στο μείγμα, ενώ η υδραυλική αγωγιμότητα και η υδατοχωρητικότητα του φυτοδοχείου μειώνονται σημαντικά όταν το ύψος του υποδοχέα αυξάνεται από 5 σε 25 cm. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι σε καλλιέργεια υποστρωμάτων, τόσο το υπόστρωμα όσο και η γεωμετρία του φυτοδοχείου έχουν καθοριστική επίδραση στην υδραυλική αγωγιμότητα και τη διαθεσιμότητα του νερού, και έτσι ο σωστός χειρισμός τους μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη διατήρηση της βέλτιστης ισορροπίας νερού και αέρα στη ζώνη της ρίζας των φυτών.

Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση της αναλογίας $NH_4^+ : NO_3^-$ και του επιπέδου αζώτου στις συγκεντρώσεις απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων, την απορρόφηση νερού, τα ποσοτικά χαρακτηριστικά και την θρέψη του άγριου λαχανοδόμου είδους *Scolymus hispanicus* L. Κατά την εμπορική ωριμότητα, η αύξηση της συγκέντρωσης του αζώτου από 7,2 έως 14,2 mM στο θρεπτικό διάλυμα αύξησε σημαντικά τον αριθμό των φύλλων, όπως και το νωπό και ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος (26%, 34,5% και 29,90%, αντίστοιχα). Αντίστοιχα, ο συνδυασμός υψηλής συγκέντρωσης ολικού-N (14,2 mM) με χαμηλή αναλογία NH_4-N /ολικού N (10%) αύξησε τη βλαστική ανάπτυξη (νωπό βάρος και αριθμό φύλλων) ενώ ο συνδυασμός υψηλής τροφοδοσίας ολικού-N και υψηλής αναλογίας NH_4-N /ολικού N μείωσε τη στοματική αγωγιμότητα των φύλλων και το pH του διαλύματος απορροής. Επιπλέον, παρόλο που η μεταχείριση υψηλού επιπέδου ολικού-N και υψηλής αναλογίας NH_4-N /ολικού N μείωσε την απορρόφηση νερού από το φυτό, δεν επέφερε καμία σημαντική επίδραση στην εδώδιμη κονδυλώδη ρίζα του φυτού (νωπό βάρος ρίζας) ή στη φωτοσυνθετική ικανότητα (SPAD και F_v/F_m) των φύλλων. Παράλληλα, παρατηρήθηκε μειωμένη απορρόφηση νερού ως αποτέλεσμα της μειωμένης στοματικής αγωγιμότητας στην μεταχείριση υψηλού επιπέδου ολικού-N (14,2 mM) και της υψηλής αναλογίας $NH_4^+-N/NO_3^- -N$ (20%) του θρεπτικού διαλύματος η οποία αντίστοιχα είχε ως αποτέλεσμα τις μειωμένες συγκεντρώσεις απορρόφησης ολικού-N, K^+ , P και Mg^{2+} κατά την περίοδο καλλιέργειας 30 - 60 ημερών μετά τη μεταφύτευση. Συμπερασματικά, το αυξημένο επίπεδο τροφοδοσίας αζώτου στο θρεπτικό διάλυμα προάγει ποσοτικά την ανάπτυξη του ασκόλυμπρου, όμως η αναλογία NH_4-N /ολικού-N δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 10%, ώστε να αποφεύγεται η μείωση της στοματικής αγωγιμότητας και επομένως η μείωση της βλαστικής ανάπτυξης του φυτού.

Επιστημονική περιοχή: Καλλιέργειες εκτός εδάφους

Λέξεις κλειδιά: Ασκόλυμπρος, σύνθεση θρεπτικού διαλύματος, υποστρώματα, υδραυλικές ιδιότητες, συγκεντρώσεις απορρόφησης, αλατότητα

Effect of growing media and nutrient solution composition on yield and quality characteristics of *Scolymus hispanicus* L. grown in soilless cultivation system

Department of Crop Science
Laboratory of Vegetable Production

ABSTRACT

Soilless cultivation of wild edible green species is a modern and economically attractive activity, given their high nutritional, culinary and gastronomic value which raises an increasingly high consumer demand. However, optimal management of the composition of the nutrient solution is a prerequisite to ensure high yield of these alternative crops. Consequently, the objective of this study is to evaluate the effect of a) N/K ratio and the electrical conductivity of the nutrient solution, b) salinity level (NaCl) of the nutrient solution and c) substrate type and the container geometry, and d) total-N level and nitrogen source on the uptake concentrations and nutrient profile, plant physiology, and agronomic characteristics of the wild edible green Golden Thistle (*Scolymus hispanicus* L.) native in Crete (Greece).

The first experiment examines the effect of two N/K ratio levels and two electrical conductivities of the nutrient solution in hydroponic cultivation of *Scolymus hispanicus* L. Analysis of the results indicate no significant impact between the two levels of nutrient solution electrical conductivity in fresh weight (g), rosette diameter and number of leaves, however, higher N/K ratio significantly increased tuberous root fresh weight (g) as well as the number and leaves fresh weight (g) and no interaction between the two factors of electrical conductivity and N/K ratio. Additionally, no treatment affected leaf relative chlorophyll density (SPAD) and plant relative chlorophyll fluorescence Fv/Fm (Maximum Quantum Yield Efficiency of Photosystem II).

Another study evaluates the effect four salinity (NaCl) levels on yield and quality characteristics of *S. hispanicus* L. Treatments were obtained by establishing four NaCl concentrations (0.5, 5.0, 10.0, and 15.0 mM) in a standard nutrient solution, resulting in initial solution electrical conductivities (EC) of 2.2, 2.8, 3.2, and 3.8 dS m⁻¹, respectively. By the end of the experiment, 120 days after transplanting (DAT) drainage EC reached 2.65, 3.33, 3.96, and 4.51 dS m⁻¹, respectively. At the first harvest, 90 DAT, the increase of the NaCl concentration had no significant impact on the number of leaves per plant, leaf fresh and dry weight [g plant⁻¹], and root dry weight [g plant⁻¹]. At the second harvest (120 DAT), 15.0 mM NaCl significantly decreased root and leaf fresh and dry weight without affecting the number of leaves per plant compared to 0.5 and 5.0 mM NaCl, while 10 mM NaCl had no impact on any of these parameters. The concentrations of K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, and P in the leaves were not influenced by the tested salinity levels, while those of organic-N and NO₃⁻-N were significantly reduced by 10 and 15 mM NaCl, 90 DAT. Furthermore, 10 and 15 mM NaCl significantly increased the Cl⁻ and Na⁺ concentrations in leaves, but not in the roots. In the root tissues, only the K concentration was reduced by salinity while P increased at the highest salinity level (15 mM NaCl). Based on these results, we conclude that *S. hispanicus* L. is resilient to moderate salinity levels and can be considered a promising candidate plant for introduction to soilless cropping systems.

Soilless cultivation is an expanding greenhouse cropping system with the potential to maintain and increase food security in challenging environments and under the eminent climate crisis, and to diversify our diet with crops that could not be sustainably cultivated in open fields. The replacement of soil with blends of organic and inorganic substrates has provided solutions but has also created challenges and opportunities, such as the need to match crop irrigation with their hydraulic properties and the specific requirements of each crop species. In this context, here we investigate the effects of the container type (growbag or pot) and the growing media used to cultivate Golden

Thistle (*Scolymus hispanicus* L.) on crop performance and physiological parameters that may be affected by water and air availability in the root zone. The tested growing media were perlite and coir dust at ratios 4:0, 3:1, 2:2, 1:3, and 0:4, denoted as 4P0C, 3P1C, 2P2C, 1P3C, and 0P4C, respectively. To characterize substrates in terms of their hydraulic properties, the hydraulic conductivity (K), easily available water (EAW), and actual water content (AWC) in the substrate profile at container capacity were determined using HYPROP2. The cultivation of *S. hispanicus* L. on the blends 4C0P and 3C1P increased total plant fresh weight of both leaves and roots (FWL and FWR, respectively) compared to cultivation on sole perlite, while the use of the shorter (growbag) container increased the FWL:FWR ratio and, concomitantly, decreased in the higher container (pot). Results show that the EAW significantly increases when the fraction of coir dust increases in the mixture, while K and AWC decrease considerably when the container height increases from 5 to 25 cm. These results show that in substrate-grown crops, both the substrate and the container geometry have a crucial impact on water flux and water availability, and thus their proper manipulation can greatly contribute to maintenance of optimal water and air status in the root zone of the plants. In conclusion, accurate estimation of the moisture retention curve (MRC) of substrates used in soilless culture is essential to design proper irrigation schedules tailored to crop water and aeration needs. Furthermore, the current study provides valuable information about the agronomic responses of tuberous species such as *S. hispanicus* L. to the hydraulic characteristics and the container geometry of growing media used in soilless culture systems.

In the final experiment, the effect of $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ ratio and nitrogen level on uptake concentrations, water absorption, yield parameters and nutrient profile of *Scolymus hispanicus* L. was evaluated. Concomitantly, four nutrient solution treatments were applied by combining two levels of total-N supply (7,2 mM N or 14,2 mM N) with two $\text{NH}_4^+:\text{N}$: total-N supply ratios (0.10 and 0.20 mmol mmol^{-1} , respectively) in a 2 factorial design. A total-N supply of 14,2 mM in the influent nutrient solution combined with an $\text{NH}_4\text{-N}$: total-N ratio of 0.1, significantly increased the cumulative water uptake, number of leaves, and shoot fresh and dry weight, compared with 7.2 mM N (by 22.25%, 34.80%, 58.58%, 32.18%, respectively), as well as compared with the same N level (14.2 mM N) with an $\text{NH}_4\text{-N}$: total-N ratio of 0.2 (by 21.20%, 23.80%, 22.44%, 16.24%, respectively). The combination of high total-N and high $\text{NH}_4\text{-N}/\text{total-N}$ ratio maintained the root zone pH more closely to the target range (5.5-6.5) but decreased stomatal conductance and increased the incidence of rot in tuberous root, thereby decreasing marketable yield. The tissue nutrient levels were only marginally influenced by the differences in N source and supply level, except for N which reflected the differences in total N supply. A N supply level of about 14.2 mM of which only 1.40 mM ammonium content proved to be the best strategy for high marketable production in soilless *S. hispanicus* L. crops.

Scientific area: Soilless production

Keywords: *Scolymus hispanicus* L., nitrogen level, nitrogen source, substrates, hydraulic properties, uptake concentration, salinity

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Κηπευτικών Καλλιεργειών του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών και στο Εργαστήριο Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου. Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Δ. Σάββα για την διαρκή καθοδήγηση, την επίβλεψη, τις παραγωγικές συζητήσεις και την αυστηρή κριτική χωρίς τα οποία θα ήταν αδύνατη η επιτυχής ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή κ. Θ. Μανιό για την πολύτιμη βοήθεια, την ενθάρρυνση και τις διορατικές του ιδέες που με βοήθησαν να ξεπεράσω τους φόβους και να κυνηγήσω τους στόχους μου, καθώς και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ι. Καραπάνο για τη συμμετοχή του στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή και τις χρήσιμες παρεμβάσεις και επισημάνσεις του κατά την συγγραφή και παρουσίαση της διδακτορικής διατριβής.

Επίσης οφείλω ένα θερμό ευχαριστώ στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ι. Δαλιακόπουλο για την αμέριστη στήριξη και βοήθεια καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διατριβής μου, τόσο κατά την συγγραφή όσο και κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων της παρούσας μελέτης.

Ευχαριστώ επίσης τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ε.Κονταξάκη και τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής για τη κριτική αξιολόγηση του κειμένου και τις πολύτιμες υποδείξεις τους καθώς επίσης το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας στο οποίο υπήρξα υπότροφος κατά τα τρία έτη των διδακτορικών μου σπουδών. Τέλος, την παρούσα διατριβή την αφιερώνω στην οικογένεια μου και στον αγαπημένο μου ανιψιό Αντώνη Μ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1. Γενική εισαγωγή.....	11
1.1 Αυτοφυή λαχανευόμενα φυτά	11
1.2 Μελέτη περίπτωσης: ασκόλυμπρος (<i>Scolymus hispanicus</i> L.).....	12
1.2.1 Φυτογεωγραφία, χρήσεις και διατροφική αξία	12
1.2.2 Μορφολογικά και βοτανικά χαρακτηριστικά.....	14
1.2.3 Πολλαπλασιασμός.....	15
1.2.4 Στοιχεία καλλιέργειας	16
1.3 Ανόργανη θρέψη των φυτών	16
1.4 Απορρόφηση και μεταφορά νερού και θρεπτικών στοιχείων στο φυτό	21
1.4.1 Απορρόφηση και μεταφορά νερού	21
1.4.2 Απορρόφηση και μεταφορά ιόντων	22
1.4.3 Αλατότητα και αλληλεπίδραση με τα θρεπτικά στοιχεία.....	25
1.5 Καλλιέργεια εκτός εδάφους	26
1.5.1 Υποστρώματα και υποδοχείς υδροπονικών καλλιεργειών.....	27
1.5.2 Θρεπτικά διαλύματα υδροπονιών καλλιεργειών.....	30
1.5.3 Συγκεντρώσεις απορρόφησης και εκτίμηση απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων από το φυτό	31
Σκοπός της διδακτορικής διατριβής.....	34
Κεφάλαιο 2. Επίδραση της αναλογίας N/K και ηλεκτρικής αγωγιμότητας θρεπτικού διαλύματος στην παραγωγή και την ποιότητα του ασκόλυμπρου (<i>Scolymus hispanicus</i> L.)	35
2.1 Εισαγωγή.....	35
2.2 Υλικά και μέθοδοι	37
2.2.1 Εγκατάσταση του πειράματος και πειραματικός σχεδιασμός.....	37
2.3 Μετρήσεις και στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων	40
2.4 Αποτελέσματα	42
2.4.1 Αποτελέσματα ποσοτικών και φυσιολογικών παραμέτρων.....	42

2.4.2 Συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων φυτικού ιστού σε φύλλα και κονδυλόριζα.....	43
2.5 Συζήτηση	44
Κεφάλαιο 3. Επίδραση αλατότητας του θρεπτικού διαλύματος σε αγρονομικά χαρακτηριστικά του ασκόλυμπρου καλλιεργούμενου σε ανοικτό υδροπονικό σύστημα.	46
3.1 Εισαγωγή.....	46
3.2 Υλικά και μέθοδοι	47
3.2.1 Πειραματικό σχέδιο.....	47
3.2.2 Σύνθεση θρεπτικού διαλύματος	48
3.2.3 Καταγραφή ποσοτικών παραμέτρων των φυτών	49
3.2.4 Προσδιορισμός ποιοτικών παραμέτρων των φυτών	50
3.2.5 Στατιστική ανάλυση	52
3.3 Αποτελέσματα	52
3.4 Συζήτηση	57
Κεφάλαιο 4. Επίδραση υδραυλικών ιδιοτήτων υποστρώματος και γεωμετρίας υποδοχέα σε εκτός εδάφους καλλιέργειας του ασκόλυμπρου	64
4.1 Εισαγωγή.....	64
4.2 Υλικά και μέθοδοι	66
4.2.1 Πειραματικός σχεδιασμός	66
4.2.2 Προσδιορισμός των υδραυλικών χαρακτηριστικών.....	68
4.2.3 Κριτήρια αξιολόγησης.....	71
4.2.4 Ανάπτυξη φυτών και προσδιορισμός φωτοσυνθετικής λειτουργίας.....	71
4.2.5 Στατιστική ανάλυση	73
4.3 Αποτελέσματα	73
4.4 Συζήτηση	80
4.4.1 Φυσικές και υδραυλικές ιδιότητες υποστρώματος.....	80
4.4.2 Σχετική υδραυλική αγωγιμότητα	82
4.4.3 Υδραυλικές ιδιότητες υποδοχέα.....	82
4.4.4 Θρεπτική κατάσταση του φυτού	84

4.4.5 Παραγωγή και φωτοσυνθετική ικανότητα του φυτού.....	84
4.4.6 Συσχέτιση παραμέτρων απόδοσης και υδραυλικών ιδιοτήτων του υποστρώματος	86
Κεφάλαιο 5. Επίδραση μορφής και συνολικής συγκέντρωσης παρεχόμενου αζώτου σε καλλιέργεια ασκόλυμπρου σε ανοικτό υδροπονικό σύστημα.....	88
5.1 Εισαγωγή.....	88
5.2 Υλικά και μέθοδοι.....	91
5.2.1 Καλλιεργητικές πρακτικές στο θερμοκήπιο.....	91
5.2.2 Προσδιορισμός ποσοτικών και φωτοσυνθετικών παραμέτρων.....	94
5.2.3 Εργαστηριακές αναλύσεις.....	94
5.2.4 Επεξεργασία δεδομένων.....	95
5.2.5 Στατιστική ανάλυση.....	96
5.3 Αποτελέσματα.....	96
5.3.1 Διάλυμα απορροής.....	96
5.3.2 Απόδοση και φωτοσυνθετική δραστηριότητα.....	99
5.3.3 Συγκεντρώσεις μακροθρεπτικών στοιχείων στον φυτικό ιστό.....	101
5.3.4 Συγκέντρωση απορρόφησης (ΣΑ).....	102
5.4 Συζήτηση.....	104
Κεφάλαιο 6. Γενικά Συμπεράσματα.....	113
Διεθνής Βιβλιογραφία.....	115
Ελληνική Βιβλιογραφία.....	135
Κατάλογοι εικόνων και πινάκων.....	136
Κατάλογος Εικόνων.....	136
Κατάλογος Πινάκων.....	139
Πρωτοτυπία της διδακτορικής διατριβής.....	141
Επιστημονικές δημοσιεύσεις που προέκυψαν από την παρούσα διδακτορική διατριβή.....	142
Βιογραφικό σημείωμα.....	143

Κεφάλαιο 1. Γενική εισαγωγή

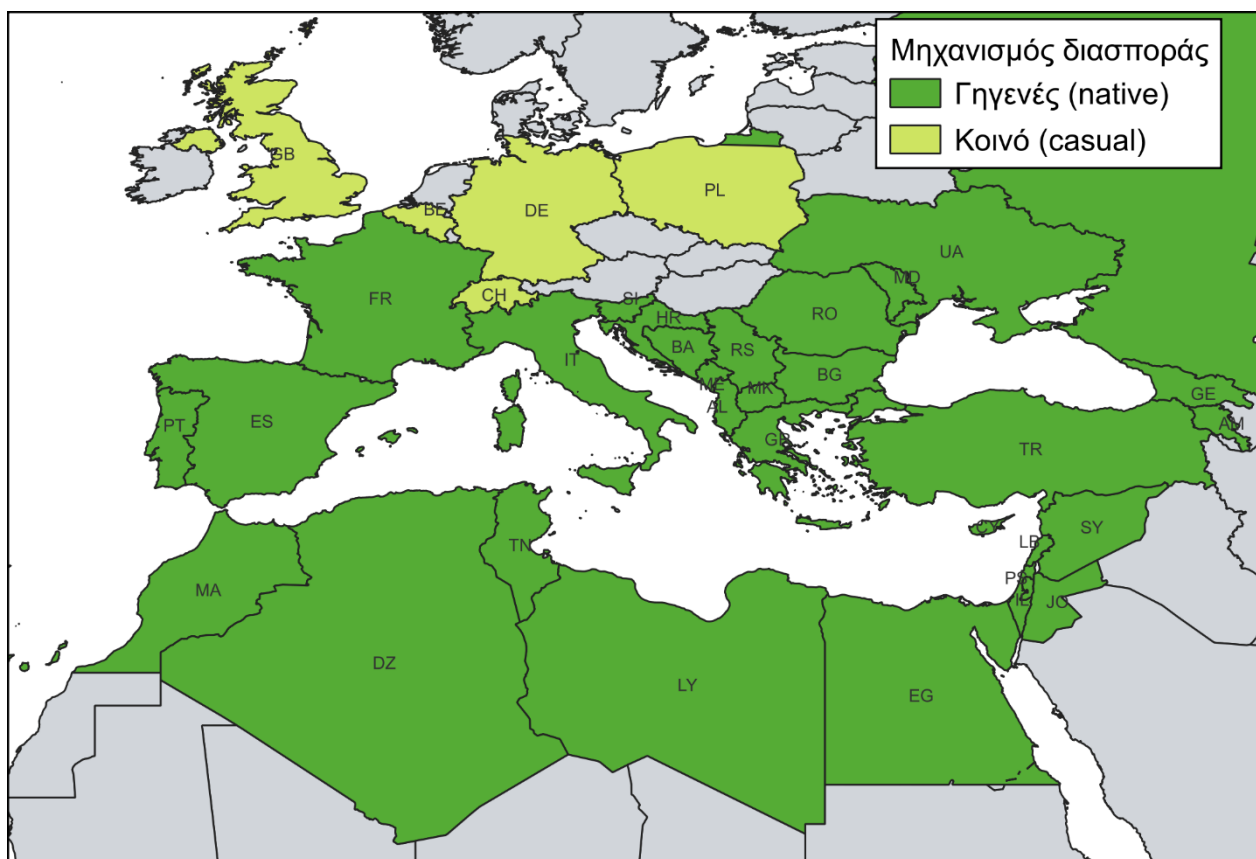
1.1 Αυτοφυή λαχανευόμενα φυτά

Η ελληνική ύπαιθρος παρουσιάζει μια μεγάλη βιοποικιλότητα άγριων λαχανευόμενων ειδών με σημαντική προοπτική εμπορικής αξιοποίησης και ανταγωνιστικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις υπόλοιπες Ευρωπαϊκές χώρες (Papadimitriou et al., 2022; Petropoulos et al., 2009). Παρόλα αυτά, η πλειοψηφία των αυτοφυών και ενδημικών άγριων λαχανευόμενων ειδών δεν έχει μελετηθεί επαρκώς όσον αφορά την επίδραση της θρέψης και των περιβαλλοντικών παραγόντων στην ανάπτυξη και την ποιότητά τους κάτω από διαφορετικά συστήματα καλλιέργειας, όπως η καλλιέργεια υπό κάλυψη και η υδροπονική καλλιέργεια, με αποτέλεσμα να υπάρχουν εμπόδια στην εμπορική αξιοποίησή τους. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται μια αυξανόμενη τάση αξιοποίησης άγριων λαχανευόμενων φυτικών ειδών όπως η αδραλίδα (*Hymenomena graecum* L.), το σταμναγκάθι (*Cichorium spinosum* L.) κ.α., ως μέρος του ιδιαίτερου γαστρονομικού μας πολιτισμού (Chatzigianni et al., 2019; Salonikioti et al., 2015). Το ενδιαφέρον αυτό οφείλεται στην υψηλή διατροφική τους αξία, στην ικανότητά τους να προσαρμόζονται στις αντίξοες εδαφοκλιματικές συνθήκες του «Ευρωπαϊκού Νότου» (ξηροθερμικό περιβάλλον και αλατότητα), καθώς και στη δυνατότητα εκμετάλλευσης εδαφών των οποίων οι φυσικοχημικές ιδιότητες έχουν υποβαθμιστεί (Paschoalinotto et al., 2023; Stark et al., 2019). Επίσης, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι μεγάλο μέρος της έρευνας, τα τελευταία χρόνια, εστιάζεται στην αξιοποίηση εναλλακτικών και περισσότερο αποδοτικών μεθόδων καλλιέργειας όπως τα υδροπονικά συστήματα για την καλλιέργεια άγριων λαχανευόμενων ειδών. Ενδεικτικά, οι Puccinelli et al., (2024) πραγματοποίησαν έρευνα με στόχο την αξιολόγηση της δυνατότητας αξιοποίησης υφάλμυρων νερών σε υδροπονική καλλιέργεια του σαλικόρνια (*Salicornia Europaea* L.). Αντίστοιχα, οι (Kaşkar et al., 2009) διερεύνησαν την επίδραση διαφορετικών επιπέδων ηλεκτρικής αγωγιμότητας του θρεπτικού διαλύματος στο άγριο λαχανευόμενο είδος αδραλίδα (*Portulaca oleraceae* L.) σε σύστημα επιπλέουσας υδροπονίας. Οι Labiad et al., (2021) και Sarrou et al., (2019) διερεύνησαν στην δυνατότητα υδροπονικής καλλιέργειας του κρίταμου (*Crithmum maritimum* L.), ενώ εκτενής είναι ήδη οι ερευνητικές αναφορές καλλιέργειας σταμναγκαθιού (*Cichorium spinosum* L.) αξιοποιώντας διαφορετικά συστήματα εκτός εδάφους καλλιέργειας όπως η καλλιέργεια σε σάκους με υπόστρωμα περλίτη καθώς και σε συστήματα επίπλευσης και ρέοντος θρεπτικού διαλύματος (Klados and Tzortzakis, 2014; Ntatsi et al., 2017; Petropoulos et al., 2017).

1.2 Μελέτη περίπτωσης: ασκόλυμπρος (*Scolymus hispanicus* L.)

1.2.1 Φυτογεωγραφία, χρήσεις και διατροφική αξία

Ο ασκόλυμπρος (*Scolymus hispanicus* L.), ανήκει στην οικογένεια Asteraceae και αποτελεί ένα διετές (ενίοτε πολυετές) φυτό που αυτοφύεται στη λεκάνη της Μεσογείου, αλλά και στα Κανάρια νησιά, στη Δυτική και Νότια Ευρώπη, στη Βόρεια Αφρική και στη Βορειοδυτική Γαλλία, Ισπανία και Τουρκία και άλλες χώρες της Μαύρης θάλασσας σε ξηρά, βραχώδη και ακαλλιέργητα εδάφη (Polo et al., 2009). Ο ασκόλυμπρος (*Scolymus hispanicus* L.) είναι ένα αυτοφύες λαχανουόμενο είδος στην Ελλάδα, για την καλλιέργεια και την θρεπτική αξία του οποίου λίγα στοιχεία έχουν δημοσιευθεί. Σύμφωνα με μελέτες, παρουσιάζει σημαντική αντιοξειδωτική δραστηριότητα καθώς και υψηλή συγκέντρωση ολικών φαινολικών ουσιών ($300,1 \pm 13,4$ mg γαλλικού οξέος ανά γραμμάριο ξηρού βάρους) (Al-Ismaïl et al., 2007). Επίσης, ερευνητικά δεδομένα αναφέρουν αντισπασμωδική και αντι-ηπατοτοξική δράση η οποία αποδίδεται στην κύρια ένωση της κονδυλόριζας του φυτού, το τριτερπενοειδές taraxasteryl acetate (Kirimer et al., 1997). Όπως και άλλα φυλλώδη λαχανικά, έτσι και ο ασκόλυμπρος είναι πλούσιος φυτικές ίνες (2,3-13,4 g/100 g), σε κάλιο (375-1.772 mg/100 g) και σε ασβέστιο (16-472 mg/100 g) (Πίνακας 1), ενώ επίσης πρόσφατες ερευνητικές μελέτες αναφέρουν ότι ο ασκόλυμπρος αποτελεί φυτό υψηλής περιεκτικότητας σε ολικά αντιοξειδωτικά, φαινολικά, φλαβονοειδή και α-τοκοφερόλη (Sánchez-Mata and Tardío, 2016; Ozel-Tasci and Gulec, 2023; Petropoulos et al., 2018).



Εικόνα 1: Διασπορά και μηχανισμός διασποράς του Scolymus hispanicus L. Πηγή: Greuter (2006).

Πίνακας 1. Διατροφική αξία ασκόλυμπρου σύμφωνα με τους Sánchez-Mata και Tardío, (2016), Petropoulos et al., (2018) και Ozel-Tasci και Gulec, (2023).

Παράμετρος	Μέσος όρος	Εύρος τιμών
Ενέργεια (kJ/100 g)	167	53-280
Υγρασία (g)	84,1	81,8-92,7
Λίπη (g)	0,09	0,08-0,11
Πρωτεΐνες (g)	1,75	0,34-5,25
Φυτικές ίνες (g)	7,00	3,11-12,26
Na (mg)	39,1	11,2-65,3
K (mg)	1.040	559-1.772
Ca (mg)	235	124-410
Mg (mg)	93,9	17,5-210,0
Cu (mg)	0,09	0,05-0,13
Fe (mg)	2,36	1,39-3,11
Mn (mg)	0,37	0,16-0,57

Zn (mg)	0,50	0,34-0,92
Ολικά αντιοξειδωτικά (μmol Trolox / mg)	0,486	0,102-0,870
Ολικά φλαβονοειδή (μmol Catechin / mg)	10,09	9,56-10,62
Ολικά φαινολικά (μmol Gallic acid / mg)	81,42	75,73-87,11
α - τοκοφερόλη (mg / 100 g)	0,135	0,021-0,25

1.2.2 Μορφολογικά και βοτανικά χαρακτηριστικά

Ο ασκόλυμπρος είναι ριζωματώδες φυτό με αγκαθωτά λογχοειδή λοβωτά φύλλα με λευκά νεύρα και μακρείς μίσχους που διατάσσονται υπό μορφή ρόδακα. Τα άνθη του εκπτύσσονται σε κάθετους διακλαδισμένους ανθοφόρους βλαστούς μήκους 20-100 cm, και είναι ταξιανθίες τύπου κεφαλή με στεφάνη διαμέτρου 3-4 cm που περιβάλλεται από αγκαθωτά βράκτια φύλλα και κίτρινα προς πορτοκαλοκίτρινα γλωσσοειδή πέταλα (Εικόνα 3). Τα άνθη είναι ερμαφρόδιτα και παράγουν αχάινια μήκους 2-3 mm που διαθέτουν πάππο για να γίνεται αποτελεσματικότερη η διασπορά τους με τον άνεμο. Ο ασκόλυμπρος ανθίζει Απρίλιο-Σεπτέμβριο ανάλογα με την περιοχή και το υψόμετρο. Ο πολλαπλασιασμός του είναι εύκολος, αφού πολλαπλασιάζεται με σπέρματα τα οποία χαρακτηρίζονται για την μεγάλη διάρκεια διατήρησης της βλαστικής τους ικανότητας (Sánchez-Mata and Tardío, 2016; García-Herrera et al., 2014).



Εικόνα 2. Φυτά καλλιεργούμενου ασκόλυμπρου ηλικίας 4 μηνών (από προσωπικό αρχείο).

1.2.3 Πολλαπλασιασμός

Πρωταρχικό πρόβλημα για την εισαγωγή της καλλιέργειας του ασκόλυμπρου στην εμπορική λαχανοκομία είναι η έλλειψη ουσιαστικής πληροφόρησης όσον αφορά στη βλαστικότητα των σπόρων και την παραγωγή καλής ποιότητας σποροφύτων. Η θερμοκρασία, οι κύκλοι φωτός-σκότους, το διαθέσιμο νερό. Στην φύση, οι σπόροι ωριμάζουν αργά το καλοκαίρι (Εικόνα 2) και χρειάζονται μια περίοδο μεθωρίμανσης για την βλάστηση τους. Συνήθως, χαρακτηρίζονται από μικρή βλαστικότητα όμως σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα μπορεί να αυξηθεί όταν η θερμοκρασία σποράς κυμαίνεται μεταξύ 20 και 25 °C ιδιαίτερα με την παρουσία φωτός (Polo et al., 2009). Επίσης, θετικά φαίνεται να επηρεάζει το ποσοστό βλάστησης και την ταχύτητα βλάστησης των σπόρων οι προμεταχειρίσεις όπως η προενυδάτωση, η βραχεία παραμονή σε διάλυμα γιββερελλίνης καθώς και η εφαρμογή ωσμωρυθμιστικών ουσιών όπως το νιτρικό κάλιο (Casciaro and Damato, 2007; Sari and Tutar, 2009) .



Εικόνα 3. Ταξιανθία ασκόλυμπρου (προσωπικό αρχείο).

1.2.4 Στοιχεία καλλιέργειας

Ο ασκόλυμπρος αποτελεί λαχανευόμενο είδος προσαρμοσμένο στο μεσογειακό κλίμα. Οι ζεστές και βροχερές περιόδους του χειμώνα είναι κατάλληλες για την ανάπτυξη των φυτών ενώ οι ζεστοί και ξηροί καλοκαιρινοί μήνες αποτελούν κατάλληλες συνθήκες για την ωρίμανση των σπόρων. Είναι φυτό που γενικά απαντάται σε χαμηλά και μέτρια υψόμετρα (600-800 m) και σπανιότερα σε υψόμετρο 900-1.000 m (Karik, 2019). Συγκομίζεται την άνοιξη και μετά ακολουθεί η αφαίρεση του ελάσματος των φύλλων καθώς δεν αποτελεί εδώδιμο μέρος (Corrêa, et al., 2020). Ενδιαφέρον έχει και η χρήση των ριζών του ασκόλυμπρου ως υποκατάστατο του καφέ και η χρήση των χρωστικών των ανθέων του αντί για το σαφράν (Polo et al., 2009). Στην Ελλάδα ο ασκόλυμπρος διατίθεται σε μικρές ποσότητες από το Φθινόπωρο έως την Άνοιξη, είτε ως εδώδιμο άγριο λαχανευόμενο είτε ως καλλιεργούμενο, σε αρκετά υψηλή τιμή, λόγω της διαιτητικής και γαστρονομικής του αξίας (Σάββας, 2016). Τα τελευταία χρόνια, καλλιεργείται σε μικρή έκταση, ως υπαίθρια καλλιέργεια στην Κρήτη, με απευθείας σπορά στο έδαφος, κυρίως στην Κίσσαμο από παραγωγούς του Αγροτικού Συνεταιρισμού της Γραμβούσας σε έκταση 20-30 στρεμμάτων μαζί με το σταμναγκάθι (που καλλιεργείται σε μεγαλύτερη έκταση) αλλά και σε ορισμένες περιοχές του Ηρακλείου και Λασιθίου από μεμονωμένους παραγωγούς σε υψόμετρο 100 - 800 m.

1.3 Ανόργανη θρέψη των φυτών

Όπως όλοι οι οργανισμοί, τα φυτά χρειάζονται θρεπτικά στοιχεία για την βλαστική τους ανάπτυξη και καρποφορία. Τα θρεπτικά στοιχεία είναι απαραίτητα για πολλές λειτουργικές διαδικασίες των

φυτών όπως βιοχημικές αντιδράσεις και την παραγωγή οργανικών μορίων που συχνά αναφέρονται ως φωτοσυνθετικά προϊόντα (υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λίπη, βιταμίνες κ.λπ.) (Arnold and van Diest, 1991; Hawkesford et al., 2012; Sonneveld and Voogt, 2009). Στη φυτική παραγωγή, η κατάλληλη θρέψη των καλλιεργειών είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την εξασφάλιση υψηλών αποδόσεων και ποιοτικών προϊόντων. Επίσης, λειτουργούν ως ενεργοποιητές ενζύμων ή είναι απαραίτητα ως καταλύτες σε αρκετές ενζυμικές αντιδράσεις (Αγγελάκη κα., 2018). Για την φυσιολογική θρέψη και ανάπτυξη των φυτών απαραίτητα είναι τουλάχιστον 14 ανόργανα στοιχεία (Σάββας, 2012). Ως απαραίτητο θρεπτικό στοιχείο ορίζεται εκείνο που έχει ένα σαφή φυσιολογικό ρόλο και του οποίου η απουσία εμποδίζει ένα φυτό να ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής (Arnold and van Diest, 1991; Sonneveld and Voogt, 2009). Αυτά περιλαμβάνουν τα μακροθρεπτικά στοιχεία άζωτο (N), φώσφορο (P), κάλιο (K), ασβέστιο (Ca), μαγνήσιο (Mg) και θείο (S) και τα ιχνοστοιχεία χλώριο (Cl), βόριο (B), σίδηρο (Fe), μαγγάνιο (Mn), χαλκό (Cu), ψευδάργυρο (Zn), νικέλιο (Ni) και μολυβδαίνιο (Mo) τα οποία περιέχονται στο έδαφος. Η ποσότητα των μακροθρεπτικών στοιχείων που απορροφάται από τα διαφορετικά είδη κηπευτικών τείνει να ποικίλλει, ενώ η συγκέντρωση σε άζωτο και κάλιο στα φύλλα είναι συνήθως υψηλότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα μακροθρεπτικά στοιχεία, αν και η αναλογία διαφέρει ανάλογα με το φυτικό είδος (Σάββας, 2012). Η συγκέντρωση των μακροστοιχείων στον φυτικό ιστό αποτελεί σημαντική πληροφορία για την κατάρτιση θρεπτικού διαλύματος κατάλληλης σύνθεσης σε υδροπονικά συστήματα καλλιέργειας (Neocleous et al., 2017).

Το άζωτο (N) είναι το πιο απαραίτητο χημικό στοιχείο για την ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών καθώς αποτελεί συστατικό πολλών ουσιών του μεταβολισμού των φυτικών κυττάρων και κυρίως των πρωτεϊνών και των αμινοξέων, αλλά και της χλωροφύλλης, των νουκλεϊκών οξέων, πολλών αλκαλοειδών και ορισμένων ορμονών (Fageria, 2014). Απορροφάται από τις ρίζες είτε σε νιτρική (NO_3^-) είτε σε αμμωνιακή (NH_4^+) μορφή. Η νιτρική μορφή ανάγεται σε αμμωνιακή μορφή μέσα στους φυτικούς ιστούς μέσω των ενζύμων νιτρική αναγωγή και νιτρώδης αναγωγή με κατανάλωση μεταβολικής ενέργειας προερχόμενη κατευθείαν από την φωτοσύνθεση. Η αμμωνιακή μορφή του αζώτου ενσωματώνεται αρχικά στο κετογλουταρικό οξύ μέσω της συνθετάσης της γλουταμίνης ενώ στη συνέχεια μεταφέρεται μέσω τρανσαμινώσεων σε άλλα κετονοξέα με αποτέλεσμα την βιοσύνθεση και των υπόλοιπων αμινοξέων που αποτελούν τα δομικά στοιχεία των πρωτεϊνών (Errebhi and Wilcox, 1990). Επομένως, το άζωτο προστίθεται στα θρεπτικά διαλύματα υπό την μορφή νιτρικών και αμμωνιακών ιόντων (οι δύο μορφές αζώτου που μπορούν να απορροφήσουν τα φυτά) με την νιτρική μορφή να υπερτερεί έναντι του αμμωνιακού αζώτου (Savvas et al., 2003; Sonneveld and Voogt, 2009). Από προαναφερόμενα προκύπτει ότι η

αφομοίωση της νιτρικής μορφής του αζώτου απαιτεί μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας από το φυτό σε σχέση με την αφομοίωση της αμμωνιακής μορφής. Εντούτοις, αποφεύγεται η αυξημένη συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου στο διάλυμα καθώς αυτή μπορεί να προκαλέσει συμπτώματα φυτοτοξικότητας (Hawkesford et al., 2012; Wang et al., 2022). Ένας ακόμη λόγος που επιλέγεται η αυξημένη συγκέντρωση νιτρικών ιόντων στο θρεπτικό διάλυμα είναι ότι ισοσκελίζουν τη συγκέντρωση των κατιόντων (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+) με στόχο την διατήρηση της ηλεκτροχημικής ισορροπίας του (Bryson et al., 2014; Neocleous and Savvas, 2015). Για αυτό τον λόγο η συγκέντρωση των αμμωνιακών ιόντων στο θρεπτικό διάλυμα δεν πρέπει να είναι άνω των 1,5-2 mmol L⁻¹ ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα τοξικότητας και ταυτόχρονα να ρυθμίζεται καλύτερα το pH στο περιβάλλον των ριζών (Sonneveld and Voogt, 2009). Σε αντίθεση με τα αμμωνιακά, οι συγκεντρώσεις νιτρικών στα θρεπτικά διαλύματα κυμαίνονται μεταξύ 8 και 18 mmol L⁻¹ (Bryson et al., 2014). Ωστόσο είναι σημαντικό οι συγκεντρώσεις νιτρικών στο θρεπτικό διάλυμα να μην υπερβαίνουν κάποια όρια καθώς μπορεί να δημιουργήσουν ανισορροπίες στην ανάπτυξη (υπέρμετρη βλαστική ανάπτυξη που μπορεί να ζημιώσει την καρποφορία) και υποβάθμιση της ποιότητας του προϊόντος (Savvas et al., 2013).

Ο φώσφορος (P) αποτελεί ένα από τα κύρια θρεπτικά συστατικά των φυτών που επηρεάζει άμεσα ή έμμεσα όλες τις βιολογικές διεργασίες. Αποτελεί βασικό στοιχείο του μεταβολισμού και της βιοσύνθεσης νουκλεϊκών οξέων και μεμβρανών (Hawkesford et al., 2012; Raghothama, 2015). Πολλές βασικές βιοχημικές διεργασίες όπως η φωτοσύνθεση και η αναπνοή ενεργοποιούνται από ανόργανο φωσφορικό άλας (Pi) ή τα οργανικά του παράγωγα. Ως μέρος των νουκλεοτιδίων (π.χ., ATP), το P έχει σημαντικό ρόλο στις αντιδράσεις μεταφοράς ενέργειας. Επιπλέον, οι φωσφορικοί εστέρες δρουν ως φορείς ενέργειας σε διάφορες μεταβολικές οδούς (Αγγελάκη, 2018). Ο φώσφορος είναι μέρος των φωσφολιπιδίων που χρησιμεύουν ως σημαντικό συστατικό των βιολογικών μεμβρανών. Η ενζυματική μεταφορά και απομάκρυνση των φωσφορικών (φωσφορυλίωση και αποφωσφορυλίωση) έχει σημαντική επίδραση στη λειτουργία των πρωτεϊνών (Kaya et al., 2000). Σε πολλές περιπτώσεις, τα γεγονότα φωσφορυλίωσης και αποφωσφορυλίωσης αποτελούν μέρος των περίπλοκων μονοπατιών μεταγωγής σήματος στα φυτά (Malhotra et al., 2018). Η φωσφορυλίωση των πρωτεϊνών χρησιμεύει επίσης ως σήμα για αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πρωτεϊνών. Επιπλέον, η συγκέντρωση φωσφορικών στους χλωροπλάστες καθορίζει τη μεταφορά των φωσφορυλιωμένων σακχάρων και τη σύνθεση του αμύλου (Αγγελάκη, 2018). Η μορφή του αζώτου στα διαλύματα σε μεγάλο βαθμό εξαρτάται από το pH του διαλύματος. Επομένως, από pH 6,0 και κάτω, η παρουσία του φωσφόρου θα είναι υπό τη μορφή μονοσθενούς $H_2PO_4^-$. Οι περισσότερες μελέτες σχετικά με την εξάρτηση της πρόσληψης φωσφόρου από το pH

σε ανώτερα φυτά αναφέρουν ότι το ποσοστό πρόσληψης είναι υψηλότερο μεταξύ του 5,0 και 6,0, όπου κυριαρχεί το H_2PO_4 (Raghothama, 2015), ενώ σε υψηλές τιμές pH (>7) η θρέψη των φυτών με P καθίσταται προβληματική (Malhotra et al., 2018). Σε υδροπονικά συστήματα καλλιέργειας ο φώσφορος προστίθεται με την μορφή φωσφορικού μονοαμμωνίου, φωσφορικού μονοκάλιου ή και φωσφορικού οξέος, ενώ μεγάλες συγκεντρώσεις στα θρεπτικά διαλύματα μπορεί να οδηγήσουν σε τοξικότητα ή ανταγωνισμό με άλλα θρεπτικά, όπως π.χ. το Mn^{2+} , ο Zn^{2+} και το B (Σάββας, 2012). Τα φυτά έχουν αναπτύξει αποτελεσματικούς μηχανισμούς απορρόφησης του φωσφόρου όπου η πρόσληψή του μπορεί να γίνει ενεργητικά αντίθετα με τη διαβάθμιση της συγκέντρωσης του (Schachtman et al., 1998).

Το κάλιο (K^+) έχει καθοριστικό ρόλο στην ενεργοποίηση ενζύμων, στη σύνθεση πρωτεϊνών, στη φωτοσύνθεση, στην κίνηση των στοματίων και στη σχέση με το νερό (ωσμωτική ρύθμιση) στα φυτά (Hawkesford et al., 2012). Η αυξημένη διαθεσιμότητα K^+ στο ριζικό περιβάλλον έχει αποδειχθεί ότι ενισχύει τον φωτοσυνθετική απόδοση, την ανάπτυξη των φυτών, την απόδοση και την αντοχή των φυτών υπό συνθήκες υδατικής καταπόνησης ενώ σε συνθήκες αλατότητας ανταγωνίζεται το Na^+ (Zheng et al., 2008). Σε αντίθεση με άλλα μακροθρεπτικά στοιχεία όπως το άζωτο, ο φώσφορος και το θείο, το K^+ δεν αφομοιώνεται στην οργανική ύλη αλλά παραμένει στην ιοντική του μορφή (K^+) μέσα στα κύτταρα. Επίσης, το K^+ παρέχει ηλεκτροχημική ισορροπία για την κίνηση άλλων ιόντων εντός των φυτικών ιστών (Giebisch, 2004). Στα θρεπτικά διαλύματα, το κάλιο παρέχεται με τη μορφή νιτρικού καλίου, φωσφορικού μονοκάλιου και θεικού καλίου (Sonneveld and Voogt, 2009). Ο Benton Jones Jr (1999) αναφέρει συγκέντρωση K^+ στα θρεπτικά διαλύματα γύρω στα 200 mg L^{-1} (ppm), δηλαδή περίπου 5 mM. Ωστόσο, ελαφρώς υψηλότερες συγκεντρώσεις από αυτά τα επίπεδα έχουν δοκιμαστεί σε θρεπτικά διαλύματα και έχει διαπιστωθεί ότι δεν προκαλούν τοξικότητες (Adams and Hill, 2004). Παρόλα αυτά, σημαντικά υψηλότερα επίπεδα θα πρέπει να αποφεύγονται, καθώς μπορούν να προκαλέσουν αλατούχο καταπόνηση όπως επίσης και να παρεμποδίσουν την απορρόφηση άλλων κατιόντων, όπως το Ca^{2+} (Sonneveld and Voogt, 2009).

Το ασβέστιο (Ca^{2+}) αποτελεί απαραίτητο θρεπτικό στοιχείο στην ανάπτυξη των φυτών (Ca^{2+}) καθώς απαιτείται για δομικούς ρόλους στο κυτταρικό τοίχωμα και τις μεμβράνες, για την σταθεροποίηση της λειτουργικότητας και ακεραιότητας των μεμβρανών, τη λειτουργία των στομάτων, και τη διαίρεση του κυττάρου (Broadley et al., 2002), ενώ έχει άμεσο ή έμμεσο ρόλο σε συστήματα που εμπλέκονται στην άμυνα των φυτών (Lecourieux et al., 2006). Στην φύση, η ανεπάρκεια ασβεστίου είναι σπάνια, αλλά το περίσσιο Ca^{2+} περιορίζει την ανάπτυξη των φυτών στα ασβεστούχα εδάφη (Burstrom, 1968). Το ασβέστιο προσλαμβάνεται παθητικά μέσω των ριζών

από το εδαφικό διάλυμα και μεταφέρεται στο βλαστό μέσω του ξυλώματος (Cramer et al., 1987). Διασχίζει τη ρίζα είτε μέσω του κυτταροπλάσματος των κυττάρων που συνδέονται με το πλασμοδεσμό (το σύμπλασμα) είτε μέσω του αποπλάστη. Οι σχετικές συνεισφορές των αποπλαστικών και συμπλαστικών οδών στην μεταφορά του ασβεστίου στο ξυλώμα είναι άγνωστες (White, 2001). Ωστόσο, η κίνηση του Ca^{2+} μέσω αυτών των οδών πρέπει να είναι καλά ισορροπημένη ώστε να επιτρέπεται στα ριζικά κύτταρα να αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, να ελέγχεται ο ρυθμός παροχής ασβεστίου στο ξυλώμα και να αποτρέπεται η συσσώρευση τοξικών κατιόντων στο βλαστό (White, 2001). Σύμφωνα με τον Benton Jones Jr, (1999), η συγκέντρωση Ca^{2+} στα θρεπτικά διαλύματα κυμαίνεται στα 200 mg L^{-1} ενώ η απαιτούμενη ποσότητα ασβεστίου συνήθως παρέχεται υπό τη μορφή νιτρικού ασβεστίου. Ωστόσο, πολύ συχνά ένα σημαντικό ποσοστό του ασβεστίου που πρέπει να προστεθεί στα θρεπτικά διαλύματα βρίσκεται στο αρδευτικό νερό λόγω της υψηλής περιεκτικότητας των εδαφών σε Ca^{2+} και πρέπει να συνυπολογίζεται κατά την σύνθεση των θρεπτικών διαλυμάτων (Neocleous et al., 2017); Σάββας, 2012).

Το θείο, παίζει καθοριστικό ρόλο στον μεταβολισμό και την ανάπτυξη των φυτών. Μέσα στα φυτικά κύτταρα το SO_4^{2-} ανάγεται μέσω ενός σύνθετου ενζυμικού συστήματος, της ρεδουκτάσης τωνθεικών, με αποτέλεσμα την παραγωγή σουλφυδρυλικών ομάδων, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τον σχηματισμό του θειούχου αμινοξέος κυστεΐνη και μεθειονίνη (Curtin et al., 1993). Η κυστεΐνη και η μεθειονίνη, συμβάλλουν όχι μόνο ως δομικά στοιχεία σε πρωτεΐνες και τη δραστηριότητά τους, αλλά και ως πρόδρομοι για συνθέσεις γλουταθειόνης, συνενζύμων, απαραίτητων βιταμινών και την βιοσύνθεση δευτερογενών μεταβολιτών (Leustek, 2002). Η πρόσληψη SO_4^{2-} από τις ρίζες γίνεται μέσω μηχανισμών ενεργού μεταφοράς ενώ δεν φαίνεται να παρεμποδίζεται σημαντικά από τα υπόλοιπα μακροανιόντα (NO_3^- , H_2PO_4^- , Cl^-) (Narayan et al., 2023). Τόσο η πρόσληψη όσο και οι απαιτήσεις σε θείο διαφέρουν πολύ μεταξύ των ειδών, των ποικιλιών και του σταδίου ανάπτυξης του φυτού (Sonneveld and Voogt, 2009). Οι καλλιέργειες που συνήθως περιέχουν τις μεγαλύτερες ποσότητες σε θείο περιλαμβάνουν τα αλόφυτα και τα περισσότερα είδη των οικογενειών Cruciferae και Liliaceae (Narayan et al., 2023). Στις υδροπονικές καλλιέργειες, οι επιθυμητές συγκεντρώσεις θείου στα θρεπτικά διαλύματα κυμαίνονται μεταξύ 1 και $2,5 \text{ mmol L}^{-1}$ (Kläring et al., 1999). Ωστόσο, η συσσώρευσηθεικών στην περιοχή της ρίζας δεν φαίνεται να προκαλεί ειδική τοξικότητα, για αυτό το λόγο τα ιόντα SO_4^{2-} μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλείο για αύξηση της αλατότητας στο διάλυμα τροφοδοσίας (Sonneveld and Voogt, 2009).

Οι συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων στους φυτικούς ιστούς είναι πολύ χαμηλότερες από αυτές των μακροστοιχείων και επομένως αντίστοιχα χαμηλότερες είναι οι συγκεντρώσεις τους στα

θρεπτικά διαλύματα (Sonneveld and Burg, 1991; Sonneveld and Voogt, 2009). Τα φυτά απορροφούν κατά κανόνα τα μεταλλικά ιχνοστοιχεία σίδηρο (Fe^{2+}), μαγγάνιο (Mn^{2+}), ψευδάργυρο (Zn^{2+}), και χαλκό (Cu^{2+}) σε μορφές δισθενών κατιόντων και τα επίπεδα επάρκειας στα περισσότερα φυτά κυμαίνονται μεταξύ 50-250, 20-300, 20-100 και 5-20 μg ανά g ξηρού βάρους, αντίστοιχα (Fageria et al., 2008). Τα στοιχεία αυτά συνήθως εμπλέκονται στις οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις και την ενζυμική δραστηριότητα των φυτών. Οι συγκεντρώσεις των μεταλλικών ιχνοστοιχείων στα θρεπτικά διαλύματα κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 10-40 $\mu\text{mol L}^{-1}$ για το Fe, 5-10 $\mu\text{mol L}^{-1}$ για το Mn, 3-5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ για τον Zn και 0,5-1 $\mu\text{mol L}^{-1}$ για το Cu (Σάββας, 2012). Ο σίδηρος παρέχεται σε μορφή οργανικών ενώσεων οι οποίες καλούνται χηλικές ενώσεις σιδήρου, επειδή τα ανόργανα άλατα σιδήρου αντιδρούν με τον φώσφορο και σχηματίζουν δυσδιάλυτα άλατα που καταβυθίζονται και δεν είναι διαθέσιμα για τα φυτά (Steiner, 1966). Το βόριο (B) απορροφάται από τα θρεπτικά διαλύματα ως βορικό οξύ και προστίθεται σε αυτά ως βορικό οξύ ή τέτρα- ή όκτα-βορικό νάτριο. Το στοιχείο αυτό συνδέεται με το μεταβολισμό των νουκλεϊκών οξέων και των κυτταρικών τοιχωμάτων. Το μολυβδαίνιο (Mo) είναι συστατικό στοιχείο της νιτρικής ρεδουκτάσης. Απορροφάται από τα θρεπτικά διαλύματα ως MoO_4^{2-} και προστίθεται ως μολυβδαινικό νάτριο ή μολυβδαινικό αμμώνιο. Η κινητικότητα των ιχνοστοιχείων μέσα στο φυτό είναι περιορισμένη με συνέπεια τα συμπτώματα έλλειψης τους τα εμφανίζονται στα νεαρότερα φύλλα, ενώ ειδικά αυτά του βορίου εμφανίζονται στις κορυφές αύξησης (Rizwan et al., 2021).

1.4 Απορρόφηση και μεταφορά νερού και θρεπτικών στοιχείων στο φυτό

1.4.1 Απορρόφηση και μεταφορά νερού

Κινητήριος δύναμη ανύψωσης του νερού από την ρίζα στο υπέργειο τμήμα του φυτού είναι η αποβολή νερού από τα φύλλα με τη μορφή υδρατμών μέσω της διαπνοής, η οποία δημιουργεί μια αναρροφητική τάση (πτώση υδατικού δυναμικού στα αγγεία) από τα αγγεία των φύλλων στα αγγεία του βλαστού και κατά συνέπεια στα αγγεία της ρίζας (ρεύμα διαπνοής) με αποτέλεσμα να τροφοδοτείται το φυτό με νερό (Steudle, 2000). Η είσοδος του νερού στην ρίζα μπορεί να πραγματοποιηθεί ακολουθώντας διαφορετικές διόδους όπως την αποπλαστική οδό (μεσοκυττάρια χώροι και κυτταρικά τοιχώματα), την συμπλαστική οδό (σύνολο των πρωτοπλαστών που αλληλοσυνδέονται με τις πλασμοδέσμες) ή μέσω της διαμεμβρανικής οδού που αναφέρεται στην κίνηση του νερού από κύτταρο σε κύτταρο μέσω της κυτταροπλασματικής μεμβράνης και του τονοπλάστη (Steudle, 2000; Zhao et al., 2004). Η είσοδος του νερού στο κύτταρο καθορίζεται από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ κυττάρου και αποπλάστη και από την υδραυλική αγωγιμότητα του κυττάρου. Δεδομένου ότι οι μεμβράνες των κυττάρων αποτελούν μια υδρόφοβη επιφάνεια, η

διέλευση του νερού μέσω αυτών είναι δυνατή μόνο δια μέσου υδάτινων καναλιών, τα οποία ονομάζονται υδατοπορίνες (aquaporins), δηλαδή διαμεμβρανικές πρωτεΐνες (Zhao et al., 2004). Αν και τρεις δίοδοι συμβάλουν στην μεταφορά του νερού, η επιμέρους συμβολή τους εξαρτάται από την διαθεσιμότητα του νερού και την ταχύτητα της διαπνοής. Όταν το φυτό διαπνέει έντονα υπερισχύει η αποπλαστική οδός ενώ η συμπλαστική και η διαμεμβρανική οδός υπερισχύουν όταν η ταχύτητα διαπνοής είναι χαμηλή. Κατά την αποπλαστική κίνηση, το νερό κινείται ανεμπόδιστα μεταξύ των κυττάρων του φλοιώδους παρεγχύματος έως την ενδοδερμίδα (τελευταία στιβάδα του φλοιού). Μετά την ενδοδερμίδα, νερό και ανόργανα ιόντα καταλήγουν στον κεντρικό κύλινδρο για να μεταφερθούν στα ξυλώδη αγγεία και από εκεί στο υπέργειο μέρος του φυτού (Hwang et al., 2012). Σε συνθήκες πολύ χαμηλών ρυθμών διαπνοής, στην ανοδική κίνηση των ιόντων και του νερού μέσω των αγγείων του ξύλου μπορεί να συμμετέχει και η ριζική πίεση. Η ριζική πίεση προκαλείται από την πτώση του υδατικού δυναμικού στα αγγεία του ξύλου της ρίζας (σε απόλυτες τιμές αυξάνεται), και οφείλεται στο γεγονός ότι οι ρυθμοί διαπνοής είναι από εξαιρετικά χαμηλοί έως μηδενικοί, οπότε τα ανόργανα θρεπτικά ιόντα που απεκκρίνονται ενεργά στον κεντρικό κύλινδρο συσσωρεύονται εκεί σε υψηλές συγκεντρώσεις. Κατά συνέπεια, δημιουργείται διαφορά ωσμωτικού δυναμικού μεταξύ του νερού των αγγείων του ξύλου και του εξωτερικού διαλύματος. Καθώς οι κυτταρικές μεμβράνες είναι περατές στο νερό, αυτή η διαφορά ωσμωτικού δυναμικού προκαλεί είσοδο νερού στα αγγεία του ξύλου το οποίο ωθεί με τα περιεχόμενα σε αυτό θρεπτικά στοιχεία προς τα επάνω μέσω των αγγείων του ξυλώματος (Steudle, 1994).

1.4.2 Απορρόφηση και μεταφορά ιόντων

Η απορρόφηση των ιόντων γίνεται από τη ρίζα για να μεταφερθούν ακολούθως κατακόρυφα στο βλαστό και τα φύλλα και η πορεία των ιόντων είναι ίδια με εκείνη που ακολουθεί το νερό στο οποίο είναι διαλυμένα (Steudle, 1994). Όταν τα ιόντα φθάσουν στην ριζικά τριχίδια, είτε θα διασχίσουν το πλασμαλήμμα, θα μπουν σε ένα επιδερμικό κύτταρο και από εκεί θα ακολουθήσουν την συμπλαστική οδό, είτε θα μετακινηθούν στον αποπλάστη των κυττάρων του φλοιού μέχρις ότου φθάσουν στα κύτταρα της ενδοδερμίδας. Ωστόσο, η κασπαρική λωρίδα φράζει την αποπλασματική δίοδο των ιόντων προς τη στήλη, εξωθώντας τα ιόντα να περάσουν δια μέσου του πλασμαλήμματος των ενδοδερμικών κυττάρων. Κατά συνέπεια, η ενδοδερμίδα αποτελεί θέση ελέγχου αλλά και ποσοτικής ρύθμισης της εισόδου ιόντων στον συμπλάστη της ρίζας (Αγγελάκη, 2018). Εν συνεχεία, όταν τα ιόντα βρεθούν στο εσωτερικό του κυττάρου, μετακινούνται από κύτταρο σε κύτταρο, ακολουθώντας την συμπλασματική οδό, μέχρι να φθάσουν στα κύτταρα του περικυκλίου. Η μετακίνηση των ιόντων από κύτταρο σε κύτταρο γίνεται κυρίως μέσω των πλασμοδεσμών. Τα ιόντα αφού φθάσουν τελικώς στα κύτταρα του περικυκλίου, προκειμένου να εισέλθουν στα αγγεία

του ξυλώματος, πρέπει να διασχίσουν για μια ακόμη φορά το πλασμαλήμμα και να μπουν στον αποπλάστη. Η διαδικασία αυτή απαιτεί μεταβολική ενέργεια και κατανάλωση ATP προερχόμενου από την αναπνοή της ρίζας (Αγγελάκη, 2018; Wang et al., 2006).

Τα κύτταρα, μέσω της κατανάλωσης μεταβολικής ενέργειας για την μεταφορά, έχουν την ικανότητα να επιτρέπουν την είσοδο και συσσώρευση ιόντων και ευδιάλυτων μορίων σε αυτά σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από αυτές του εξωτερικού τους περιβάλλοντος, δηλαδή του αποπλάστη. Ειδικότερα, σύμφωνα με τους νόμους της θερμοδυναμικής, η συσσώρευση ιόντων εντός του κυττάρου σε υψηλότερη συγκέντρωση από τον εξωτερικό χώρο δεν είναι δυνατόν να επιτελεστεί με απλή διάχυση, χωρίς την κατανάλωση ενέργειας που εξασφαλίζεται από την υδρόλυση του ATP. Η κατανάλωση ή όχι ενέργειας, για την διέλευση μιας ευδιάλυτης ένωσης δια μέσου του πλασμαλήμματος, εξαρτάται από το χημικό δυναμικό της (Bentrup, 1990). Όταν η ένωση στερείται ηλεκτρικού φορτίου, ο μοναδικός παράγοντας που καθορίζει την διαβάθμισή του χημικού δυναμικού της είναι η διαφορά της συγκέντρωσής της μέσα και έξω από το πλασμαλήμμα (White, 2012). Στην περίπτωση των ιόντων όμως, υπεισέρχεται και η διαβάθμιση του ηλεκτρικού δυναμικού. Η διαβάθμιση του ηλεκτρικού δυναμικού εκατέρωθεν του πλασμαλήμματος εκφράζει την έλξη ή την απώθηση που υφίσταται ένα ιόν και οφείλεται στην διαφορά των ηλεκτρικών φορτίων μέσα και έξω από το πλασμαλήμμα (Αγγελάκη, 2018). Επιπλέον τα κύτταρα, χρησιμοποιώντας ενέργεια, προκαλούν την έξοδο θετικά φορτισμένων ιόντων, όπως πρωτονίων, Ca^{2+} και Na^+ (Bentrup, 1990) για να εξισορροπούν το ηλεκτροχημικό τους δυναμικό. Εξαιτίας των αρνητικών φορτίων, το θεμελιώδες κυτταρόπλασμα ελκύει τα κατιόντα και απωθεί τα ανιόντα. Επομένως, προκειμένου η μεταφορά ενός ιόντος στο κύτταρο να είναι παθητική, θα πρέπει το άθροισμα της διαφορά του χημικού και του ηλεκτρικού δυναμικού εκατέρωθεν του κυττάρου να είναι ίσο με το μηδέν (Gillespie et al., 2002). Η σχέση αυτή εκφράζεται από την εξίσωση του Nerst:

$$\Delta\mu = \Delta(RT\ln C) + \Delta(zF\psi) \quad (1)$$

όπου $\Delta\mu$ η διαφορά του ηλεκτροχημικού δυναμικού εκατέρωθεν του πλασμαλήμματος, R η σταθερά αερίων ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), T η απόλυτη θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin, C η συγκέντρωση του ιόντος (mol L^{-1}), z το σθένος του, F η σταθερά Faraday ($96.400 \text{ J Volt}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) και $\Delta\psi$ η διαφορά του ηλεκτροχημικού δυναμικού μέσα και έξω από το πλασμαλήμμα. Ο όρος $RT\ln C$ αποτελεί τη χημική συνεισφορά στο ηλεκτροχημικό δυναμικό του ιόντος, ενώ ο όρος $zF\psi$ αποτελεί την ηλεκτρική συνεισφορά. Όταν το $\Delta\mu$ είναι μηδέν, τότε για την είσοδο του ιόντος στο κύτταρο δεν καταναλώνεται ενέργεια και η μεταφορά του είναι παθητική. Αντιθέτως, όταν το $\Delta\mu$ είναι θετικό, τότε η είσοδος του ιόντος στο κύτταρο είναι ενεργητική (Gillespie et al., 2002).

Οι κυτταρικές μεμβράνες αποτελούνται κυρίως από μια φωσφολιπιδική διπλοστιβάδα με διαμεμβρανικές πρωτεΐνες, οι οποίες επιτρέπουν τη δίοδο του νερού, ιόντων και μεταβολιτών, καθώς και τη διατήρηση του pH του θεμελιώδους κυτταροπλάσματος (Banfalvi, 2016). Οι φωσφολιπιδικές διπλοστιβάδες επιτρέπουν την ελεύθερη δίοδο του CO₂, οξυγόνου και αζώτου, αλλά είναι ελάχιστα διαπερατές για τα μόρια νερού και αδιαπέρατες για τα ανόργανα ιόντα και τις οργανικές ουσίες όπως τα σάκχαρα και τα αμινοξέα (Banfalvi, 2016; Chrispeels et al., 1999). Για τη μεταφορά νερού, ανόργανων ιόντων και άλλων οργανικών μορίων δια μέσου των μεμβρανών απαιτούνται πρωτεΐνες εξειδικευμένες στο να τα μεταφέρουν για την κάλυψη των αναγκών των κυττάρων. Αυτές οι εξειδικευμένες πρωτεΐνες διακρίνονται σε πρωτεΐνες-μεταφορείς και πρωτεΐνες-κανάλια (Αγγελάκη, 2018; Καράταγλης, 1999). Τα κανάλια μεταφέρουν τα ιόντα και τα μόρια του νερού προς την κατεύθυνση της διαβάθμισης του ηλεκτροχημικού δυναμικού τους, ενώ οι πρωτεΐνες-μεταφορείς μεταφέρουν τις ευδιάλυτες ουσίες είτε προς είτε αντίθετα από τη διαβάθμιση του ηλεκτροχημικού δυναμικού τους (Mansour, 2014). Ωστόσο, ενώ υπάρχει εξειδίκευση φορέα-ιόντος, μπορεί κατιόντα ή ανιόντα όμοια χημικώς να ανταγωνίζονται το ένα το άλλο στα σημεία πρόσδεσης τους πάνω στο φορέα. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν ο ανταγωνισμός στις θέσεις πρόσληψης των Ca²⁺ και Mn²⁺ με το Mg²⁺, όπως επίσης ανταγωνισμός παρατηρείται μεταξύ NO₃⁻ και Cl⁻ (Neocleous and Savvas, 2015). Επίσης, ενδέχεται να παρατηρηθούν και συμπτώματα τροφοπενίας κάποιων στοιχείων στο φυτικό ιστό ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς κάθε θρεπτικού στοιχείου στα όργανα εντός του φυτού. Αντίστοιχα παραδείγματα αποτελούν ο φώσφορος, το κάλιο και το μαγνήσιο τα οποία μεταφέρονται δια μέσου του φλοιώματος και ως εκ τούτου τα συμπτώματα έλλειψής τους εμφανίζονται στα γηραιότερα φύλλα ενώ αντίθετως το θείο και το ασβέστιο μεταφέρονται δια μέσου του ξυλώματος και για αυτό τα συμπτώματα της έλλειψής τους είναι πρώτα εμφανή στα νεαρότερα φύλλα (Hawkesford et al., 2012).

Η πρόσληψη ανιόντων όπως τα νιτρικά, τα φωσφορικά και τα θειικά, αποτελεί μια πρόκληση για το φυτό, διότι συχνά γίνεται αντίθετα από την διαβάθμιση του ηλεκτροχημικού δυναμικού τους (Coskun and White, 2023; White, 2012). Σύμφωνα ερευνητικά δεδομένα, υπάρχουν δύο μηχανισμοί πρόσληψης ο οποίοι ονομάζονται I και II. Ο μηχανισμός I λειτουργεί σε μικρές συγκεντρώσεις (μέχρι 0,1 mM) ανάλογες με αυτές του εδάφους και η ταχύτητα πρόσληψης αυξάνεται σημαντικά όσο αυξάνεται η συγκέντρωσή τους. Αντίθετα, σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις λειτουργεί ο μηχανισμός II, στον οποίο η κινητική είναι είτε ευθύγραμμη είτε πολυφασική (Epstein, 1956). Ο μηχανισμός I αντιστοιχεί σε σύστημα με μεγάλη συγγένεια μεταφορέα-ιόντος, ενώ αντίθετα στο μηχανισμό II η συγγένεια είναι μικρή. Ένα από τα

χαρακτηριστικά της πρόσληψης των ανιόντων είναι ότι ο μεγάλης συγγένειας μεταφορέας ρυθμίζεται από τη συγκέντρωση του εκάστοτε ανιόντος στο έδαφος (Αγγελάκη, 2018).

1.4.3 Αλατότητα και αλληλεπίδραση με τα θρεπτικά στοιχεία

Η βαθμιαία αλάτωση των εδαφών αποτελεί παγκόσμιο πρόβλημα που απειλεί την απόδοση των καλλιεργειών και εμποδίζει τη βιώσιμη ανάπτυξη της σύγχρονης γεωργίας ενώ πάνω από το ένα τρίτο των αρδευόμενων εκτάσεων στον κόσμο επηρεάζονται από την αλάτωση (Daliakopoulos et al., 2016). Οι κύριες αιτίες της αλατότητας του εδάφους είναι η αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης αλάτων και κυρίως του NaCl στο αρδευτικό νερό και στα υπόγεια ύδατα σε αλάτι και η κακή ποιότητα των συστημάτων άρδευσης και αποστράγγισης (Daliakopoulos et al., 2016; Papadimitriou et al., 2022). Όλες οι κύριες καλλιέργειες που παρέχουν τα βασικά είδη τροφίμων για την κάλυψη των διατροφικών αναγκών του ανθρώπου (π.χ. ρύζι, σιτάρι και καλαμπόκι), είναι καλλιέργειες γλυκόφυτων (glycophytes) τα οποία δεν μπορούν να ολοκληρώσουν τον κύκλο ζωής τους όταν οι συγκεντρώσεις NaCl του εδάφους υπερβαίνουν τα 200 mM, ενώ η απόδοσή τους έχει αναφερθεί ότι μπορεί να μειωθεί κατά 50-80% σε συνθήκες αλατότητας, ανάλογα με το είδος και το επίπεδο συγκέντρωσης του NaCl στο έδαφος (Cheeseman, 2015; Glenn et al., 1999; Mansour, 2014). Επίσης, η συσσώρευση αλάτων στο έδαφος και η προσρόφησή τους στα εδαφικά κολλοειδή μειώνει την πρόσληψη νερού και θρεπτικών στοιχείων και μπορεί να οδηγήσει σε ωσμωτικό στρες, τοξικότητα (από την υπερβολική απορρόφηση και συσσώρευση ιόντων νατρίου στα φύλλα), ανισορροπίες θρεπτικών στοιχείων, και οξειδωτικό στρες ως αποτέλεσμα της επίδρασης των δραστικών μορφών οξυγόνου (Acosta-Motos et al., 2017; Neocleous et al., 2017). Οι υπερβολικές συγκεντρώσεις ιόντων NaCl ζημιώνουν τα φωτοσυνθετικά ενεργά φύλλα και μπορεί να οδηγήσουν σε χλώρωση και πρόωμη γήρανση των φύλλων (Chartzoulakis et al., 2002; Hniličková et al., 2017), ενώ επίσης επηρεάζουν τις διεργασίες μεταφοράς θρεπτικών στοιχείων στο φυτό (Acosta-Motos et al., 2017). Η ωσμωτική καταπόνηση που επάγεται από την συσσώρευση NaCl στο επίπεδο της ριζόσφαιρας καταστέλλει την πρόσληψη και τη μεταφορά του καλίου (K^+), του ασβεστίου (Ca^{2+}) και του φωσφόρου (P), απαραίτητων θρεπτικών μακροστοιχείων για την φυσιολογική ανάπτυξη των φυτών (Grattan and Grieve, 1998). Ωστόσο, αυτές οι θρεπτικές ανισορροπίες μπορεί έχουν μεγαλύτερη ή μικρότερη επίπτωση στο φυτό ανάλογα με τις συνθήκες περιβάλλοντος και την ποικιλία της καλλιέργειας (Volkmar et al., 1998). Αντίστοιχα, η καταπόνηση από το NaCl μπορεί να επηρεάσει τα διαφορετικά στάδια μεταβολισμού του αζώτου όπως την πρόσληψη (ανιονική παρεμπόδιση της μεταφοράς του NO_3^- -N δια μέσου της πλασματικής μεμβράνης της ρίζας λόγω ανταγωνισμού από το Cl^-) (Perez-Alfocea et al., 1993), την αφομοίωση και την σύνθεση πρωτεϊνών που συχνά ευθύνονται για τον μειωμένο ρυθμό ανάπτυξης των φυτών που παρατηρείται σε

συνθήκες αλατούχου καταπόνησης (Shahbaz et al., 2012; Varlagas et al., 2010). Για παράδειγμα, εκτενής είναι η αναφορά της ανασταλτικής επίδρασης της αλατότητας στην ανάπτυξη της τομάτας που όμως φαίνεται να μπορεί να ξεπεραστεί, σε ένα βαθμό, από την αυξημένη τροφοδοσία αζώτου στα φυτά (Cerda and Martinez, 1988; Hu and Schmidhalter, 1997; Singh et al., 2016; Tzortzakis et al., 2022).

Σε συστήματα υδροπονικής καλλιέργειας έχει διαπιστωθεί ότι, λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων Na^+ στο τροφοδοτούμενο θρεπτικό διάλυμα, συχνά εμφανίζονται δυσχέρειες στην πρόσληψη, μεταφορά και κατανομή του K^+ και Ca^{2+} στο φυτό (Parida et al., 2016; Sonneveld and Voogt, 2009), όπως επίσης ότι η υψηλή συγκέντρωση NaCl συνδέεται με συμπτώματα τροφοπενίας φωσφόρου σε καλλιέργεια τομάτας (Adams, 1990; Adams and Ho, 1989) και αγγουριού (Sonneveld, 1988). Έτσι, μια εναλλακτική στρατηγική για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της βαθμιαίας αλάτωσης των εδαφών και του υποστρώματος σε καλλιέργειες εκτός εδάφους μπορεί να είναι η συμπληρωματική τροφοδοσία των φυτών με υψηλή συγκέντρωση φωσφόρου και καλίου στο θρεπτικό διάλυμα (Ashraf et al., 2010; Kaya et al., 2001). Μία τέτοια προσθήκη όμως, επιδεινώνει ακόμη περισσότερο την αλατούχο καταπόνηση καθώς αυξάνει την έντασή της. Επίσης, σε συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους, μια αποτελεσματική στρατηγική διαχείρισης της συσσώρευσης NaCl στο ριζόστρωμα για τον μετριασμό των δυσμενών επιπτώσεων στο φυτό, αποτελεί ο έλεγχος του κλάσματος απορροής το οποίο καθορίζει τον βαθμό έκπλυσης των αλάτων από το περιβάλλον των ριζών (Katsoulas et al., 2015). Συνεπώς, αν το νερό άρδευσης είναι σχετικά κακής ποιότητας ($\text{EC} > 1,2 \text{ dS m}^{-1}$, συγκεντρώσεις Na^+ και $\text{Cl}^- > 5 \text{ mM}$), μπορεί να επιτευχθεί αύξηση του κλάσματος απορροής μέχρι και 50% για να μετριαστεί η υπέρμετρη αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC στο διάλυμα ριζοστρώματος (Σάββας, 2012). Το μειονέκτημα αυτού του χειρισμού όμως είναι η υπέρμετρη σπατάλη νερού και λιπασμάτων.

1.5 Καλλιέργεια εκτός εδάφους

Ως αποτέλεσμα των αυξανόμενων προβλημάτων που σχετίζονται με την εντατική παραγωγή κηπευτικών καλλιεργειών, όπως η απώλεια καλλιεργήσιμης γης, η βαθμιαία υποβάθμιση-αλάτωση των εδαφών και, κυρίως, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και ασθενειών που μεταδίδονται με το έδαφος, τα συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους αποτελούν σήμερα έναν από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους τομείς της γεωργίας (Porter, 2017). Ως καλλιέργεια εκτός εδάφους ορίζεται η μέθοδος καλλιέργειας των φυτών των οποίων το ριζικό σύστημα αναπτύσσεται εκτός του φυσικού εδάφους, και η ημερήσια τροφοδοσία των φυτών με νερό και θρεπτικά στοιχεία

βασίζεται στην χορήγηση ενός τεχνητά παρασκευασμένου θρεπτικού διαλύματος (Sambo et al., 2019; Savvas and Gruda, 2018). Το θρεπτικό διάλυμα αποτελεί αραιό υδατικό διάλυμα που συγκεντρώνει όλα τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία για την φυσιολογική ανάπτυξη των φυτών και βρίσκονται διαλυμένα στο νερό κατά κανόνα ως ιόντα ανόργανων αλάτων (Σάββας, 2012; (Sonneveld, 1988). Τα πλεονεκτήματα αυτού του υδροπονικού συστήματος είναι: α) η απουσία παθογόνων που μεταδίδονται με το έδαφος, β) η ομοιόμορφη εφαρμογή των θρεπτικών στοιχείων και της άρδευσης στα φυτά, μειώνοντας έτσι τη σπατάλη νερού και θρεπτικών και παρέχοντας ιδανικές συνθήκες ανάπτυξης του ριζικού συστήματος, γ) η αυξημένη απόδοση, δ) η επίτευξη σχετικά υψηλών αποδόσεων και καλής ποιότητας, ακόμη και σε υποβαθμισμένα εδάφη ε) η ενίσχυση της πρώιμης της παραγωγής, λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών στη ριζόσφαιρα και στ) η δυνατότητα μηχανοποίησης και αυτοματοποίησης των καλλιεργητικών εργασιών (Σάββας, 2011). Τις τελευταίες δεκαετίες, η παροχή θρεπτικών διαλυμάτων στα φυτά για τη βελτιστοποίηση της θρέψης των καλλιεργειών αποτελεί συνήθης καλλιεργητική πρακτική στις καλλιέργειες εκτός εδάφους (Fageria et al., 2008; Papadopoulos, 1996).

1.5.1 Υποστρώματα και υποδοχείς υδροπονικών καλλιεργειών

Σε καλλιέργειες εκτός εδάφους, οι ρίζες των φυτών αναπτύσσονται είτε σε πορώδη μέσα είτε απευθείας σε θρεπτικό διάλυμα (όπως το σύστημα επιπλέουσας υδροπονίας και ρηχού ρεύματος θρεπτικού διαλύματος κα) χωρίς την χρήση υποστρώματος. Ένα από τα επικρατέστερα συστήματα υδροπονικής καλλιέργειας παγκοσμίως αποτελεί η καλλιέργεια σε διάφορους τύπους υποστρωμάτων (πορώδη μέσα) (Savvas and Gruda, 2018). Ως υποστρώματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλα τα πορώδη στερεά υλικά, εκτός του εδάφους, το οποίο είτε μόνα τους είτε σε μείγματα μπορεί να διασφαλίσουν ιδανικές συνθήκες ανάπτυξης των φυτών (Gruda, 2022). Τα υδροπονικά συστήματα που βασίζονται σε υπόστρωμα κυριαρχούν έναντι των συστημάτων υδροκαλλιέργειας, επειδή η ικανότητα του υποστρώματος να συγκρατεί νερό διασφαλίζει την τροφοδοσία των φυτών για ένα διάστημα ακόμα και αν παρουσιαστεί τεχνική βλάβη (van Os et al., 2019). Επιπλέον, τα υποστρώματα μπορούν να παρέχουν καλύτερο αερισμό των ριζών από τα συστήματα υδροκαλλιέργειας λόγω της πορώδους φύσης τους (Balliu et al., 2021). Η διάταξη των συστημάτων καλλιέργειας στα υποστρώματα μπορεί να ποικίλλει, ανάλογα τον υποδοχέα του υποστρώματος (Gruda, 2022; Sambo et al., 2019). Οι υποδοχείς του υποστρώματος μπορεί να είναι σάκοι ανάπτυξης, γλάστρες, ή διαφορετικοί τύποι φυτοδοχείων, ή ακόμη και τα ίδια τα κανάλια που απλώνονται κατά μήκος των γραμμών των φυτών για την συλλογή των απορροών (Εικόνα 4) (Papadimitriou et al., 2024; Savvas, et al., 2013). Τα υποστρώματα χρησιμοποιούνται τόσο για την παραγωγή νωπών λαχανικών όσο και για καλλωπιστικά είδη φυτών και μπορεί να είναι είτε

οργανικής είτε ανόργανης φύσης, ενώ μπορούν χημικά είτε να είναι ενεργά (δηλ. να έχουν ανταλλακτική ικανότητα) είτε αδρανή (Sabatino, 2020). Ωστόσο, όλα τα ανόργανα υποστρώματα προέρχονται από φυσικές πηγές και μόνο ένα μέρος αυτών υποβάλλονται σε βιομηχανική επεξεργασία πριν χρήση τους. Για παράδειγμα, ο περλίτης αποτελεί ένα εκτεταμένης χρήσης υπόστρωμα σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες, κυρίως σε αυτές στις οποίες υπάρχει εγχώρια παραγωγή του, λόγω του χαμηλότερου κόστους παραγωγής και διάθεσής του (Savvas and Gruda, 2018). Εκτός από τον περλίτη, ευρέως χρησιμοποιούμενα υποστρώματα αποτελούν ο πετροβάμβακας και η ελαφρόπετρα, ενώ πολύ πιο σπάνια χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα ο ξεόλιθος, η διογκωμένη άργιλος, ο βερμικουλίτης κ.α. (Bougoul et al., 2005; Marinou et al., 2013; Olle et al., 2012; Olymrios, 1993). Τα οργανικά υποστρώματα μπορεί να είναι συνθετικά όπως η πολυουρεθάνη ή να είναι οργανικής προέλευσης υλικά όπως η τύρφη, τα διάφορα compost και τα υποστρώματα με βάση το ξύλο (ξύλινες και πριονίδι) (Σάββας, 2011). Στην Ευρώπη, το σημαντικότερο οργανικό υπόστρωμα που χρησιμοποιείται για καλλιέργειες εκτός εδάφους είναι το κόμποστ από κοκοφοίνικα, ενώ πολύ πιο σπάνια χρησιμοποιείται η τύρφη, διάφορα άλλα κόμποστ, ο φλοιός δέντρων και τα υπολείμματα ξύλου (Al Naddaf et al., 2011; Carlile et al., 2015; Montagne et al., 2016). Η τύρφη και ο κοκοφοίνικας (κόκος) αντιπροσωπεύουν το 77-80% των οργανικών υποστρωμάτων που χρησιμοποιούνται ετησίως στην Ευρώπη για την καλλιέργεια κηπευτικών εκτός εδάφους (Carlile et al., 2015; Rubio-Asensio et al., 2018; Stolte et al., 2016). Ωστόσο, η τύρφη χρησιμοποιείται κυρίως σε φυτώρια και για την καλλιέργεια γλαστρικών ανθοκομικών ειδών, και πολύ λιγότερο για την παραγωγή νωπών λαχανικών και δρεπτών ανθέων (Σάββας, 2012). Αντίθετα ο κόκος χρησιμοποιείται κυρίως για παραγωγή βρώσιμων κηπευτικών και δρεπτών ανθέων στα θερμοκήπια και πολύ λιγότερο σε φυτώρια και θερμοκήπια με γλαστρικά φυτά.

Τα κριτήρια επιλογής του υποστρώματος για την επιτυχημένη καλλιέργεια εκτός εδάφους πολλές φορές ποικίλουν ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας και εξαρτώνται όχι μόνο από έναν αλλά από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες, οι οποίοι καθορίζουν την διαθεσιμότητα νερού, οξυγόνου και θρεπτικών στοιχείων για τα φυτά (Savvas and Gruda, 2018). Επομένως είναι σημαντικό να συνεκτιμώνται όλα τα χαρακτηριστικά τους πριν την τελική απόφαση για την εγκατάστασή τους στην καλλιέργεια. Το πιο ουσιώδες χαρακτηριστικό είναι η απουσία παθογόνων μικροοργανισμών, ζωικών εχθρών και σπόρων ζιζανίων που δυνητικά μπορούν να ζημιώσουν την καλλιέργεια και της παραγωγή, και για αυτό τον λόγο τα υποστρώματα θα πρέπει να απολυμαίνονται πριν την διάθεσή τους στην αγορά, αν δεν προέρχονται από υλικά ή από μεθόδους κατεργασίας που εγγυώνται την απουσία παθογόνων, ζωικών εχθρών και σπόρων ζιζανίων (Sabatino, 2020; Savvas, 2009). Επίσης,

ένα καλό υπόστρωμα θα πρέπει να συγκρατεί επαρκή ποσότητα εύκολα διαθέσιμου νερού και για αυτό τον σκοπό επιζητείται να υπάρχει ισορροπημένη σχέση μεταξύ νερού και αέρα στο πορώδες του, χωρίς να υπερτερεί το ένα σε βάρος του άλλου (Londra et al., 2018). Ένα ακόμη ουσιώδες χαρακτηριστικό είναι η ομοιογένεια στην σύστασή του ώστε να είναι προβλέψιμη η υδραυλική συμπεριφορά του (αναλυτική περιγραφή των υδραυλικών χαρακτηριστικών των υποστρωμάτων που καθορίζουν την διαθεσιμότητα νερού και αέρα γίνεται στο Κεφάλαιο III) το οποίο κατά συνέπεια καθορίζει την διαθεσιμότητα νερού και θρεπτικών στοιχείων για τα φυτά (Michel, 2009). Τέλος, σημαντικό χαρακτηριστικό αποτελούν η σταθερότητα της δομής του διασφαλίζοντας άριστες φυσικοχημικές ιδιότητες κατά την διάρκεια χρήσης του και παρατείνοντας έτσι τον χρόνο ωφέλιμης ζωής του (Σάββας, 2012). Τέλος, σημαντικά κριτήρια για τον παραγωγό αποτελούν επίσης, η ευκολία χρήσης τους (ελαφρύ και τυποποιημένο σε κατάλληλη συσκευασία) και το κόστος προμήθειάς τους.



Εικόνα 4. Υδροπονική καλλιέργεια ασκόλυμπρου σε μίγμα αδρανούς (περλίτης) και οργανικού (κοκοφοίνικας) υποστρώματος σε υποδοχέα υποστρώματος πλαστικό σάκο ή γλάστρα (προσωπικό αρχείο).

1.5.2 Θρεπτικά διαλύματα υδροπονιών καλλιεργειών

Το θρεπτικό διάλυμα, στην υδροπονία, αποτελεί υδατικό διάλυμα που περιέχει κυρίως ανόργανα ιόντα, που προέρχονται από πλήρως υδατοδιαλυτά λιπάσματα, απαραίτητων για την ανάπτυξη των φυτών. Επί του παρόντος, 16 στοιχεία θεωρούνται απαραίτητα για τα περισσότερα φυτά, τα οποία είναι ο άνθρακας, το υδρογόνο, το οξυγόνο, το άζωτο, ο φώσφορος, το κάλιο, το ασβέστιο, το μαγνήσιο, θείο, σίδηρος, χαλκός, ψευδάργυρος, μαγγάνιο, μολυβδαίνιο, βόριο, και το χλώριο (Savvas and Gruda, 2018). Η συνολική συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων στο υδατικό διάλυμα θεωρείται ένα από τα κρίσιμότερα χαρακτηριστικά των θρεπτικών διαλυμάτων (Σάββας, 2012). Τα πολύ υψηλά επίπεδα ενδέχεται να προκαλέσουν συμπτώματα τοξικότητα, ενώ οι πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις τους συνδέεται με τροφопενίες που έχουν σαν αποτέλεσμα την μειωμένη παραγωγή και την υποβάθμιση των φυσιολογικών χαρακτηριστικών του φυτού (Sonneveld and Voogt, 2009). Για αυτό τον λόγο, έχουν πραγματοποιηθεί εκτεταμένες έρευνες για την καθιέρωση βέλτιστων επιπέδων ολικής ιοντικής συγκέντρωσης στο θρεπτικό διάλυμα για μια σειρά βασικών κηπευτικών καλλιεργειών και ανθοκομικών φυτών (Du et al., 2022; Neocleous and Savvas, 2015; Savvas, et al., 2013; Sonneveld and Voogt, 2009). Διεθνώς, έχει καθιερωθεί η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) των θρεπτικών διαλυμάτων που αποτελεί έναν έμμεσο δείκτη της συγκέντρωσης ολικών διαλυτών αλάτων στο θρεπτικό διάλυμα και το οποίο μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα και εύκολα με την χρήση φορητών οργάνων. Αν και η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) δεν αποτελεί ουσιαστική πληροφορία για την συγκέντρωση και το είδος των αλάτων που βρίσκονται σε ένα διάλυμα, αποτελεί όμως πληροφορία για τη συνολική τους συγκέντρωση σε αυτό (Σάββας, 2012).

Η συνολική συγκέντρωση μακροθρεπτικών στοιχείων στα θρεπτικά διαλύματα (C , meq L^{-1}) μπορεί να υπολογίζεται ως συνάρτηση της EC (dS m^{-1}) με χρήση της σχέσης (Savvas and Adamidis, 1999):

$$C = 9,819 \times EC - 1,462 \quad (2)$$

Τιμές EC χαμηλότερες από ένα κατώτερο όριο υποδηλώνουν ότι η περιεκτικότητα του διαλύματος σε ορισμένα θρεπτικά στοιχεία είναι ανεπαρκής ενώ τιμές ανώτερες ενός κρίσιμου ορίου υποδηλώνει συνθήκες ωσμωτικής καταπόνησης για το φυτό. Για τα περισσότερα καλλιεργούμενα καρποδοτικά κηπευτικά είδη φυτών η ηλεκτρική αγωγιμότητα των χορηγούμενων θρεπτικών διαλυμάτων πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ $1,5-2,5 \text{ dS m}^{-1}$ ενώ στο περιβάλλον των ριζών από $2,5$ έως $3,5 \text{ dS m}^{-1}$, ενώ για τα περισσότερα ανθοκομικά φυτά η αγωγιμότητα στη ρίζα δεν πρέπει να υπερβαίνει τα $2,1 \text{ dS m}^{-1}$ (Sonneveld and Voogt, 2009). Γενικά, η EC στη ρίζα τείνει να αυξάνει με την πάροδο του χρόνου σε σχέση με το διάλυμα τροφοδοσίας και αυτό οφείλεται στη συσσώρευση

ορισμένων ιόντων (κυρίως δισθενή ιόντα και ιόντα νατρίου) στο υπόστρωμα καλλιέργειας, το οποίο ο παραγωγός καλείται να διορθώσει αναπροσαρμόζοντας κατάλληλα το διάλυμα τροφοδοσίας όπως επίσης αξιοποιώντας διαφορετικές τεχνικές μεθόδους όπως αυξάνοντας το κλάσμα απορροής, ή απορρίπτοντάς το περιοδικά στις περιπτώσεις κλειστών συστημάτων (περιπτώσεις συγκεντρώσεις ιόντων Na στο υπόστρωμα) ώστε να μην ξεπεραστεί το κατώφλι αλατότητας στο περιβάλλον των ριζών (Σάββας, 2012).

Το pH ενός θρεπτικού διαλύματος αποτελεί ένα ακόμη χαρακτηριστικό καθοριστικής σημασίας των θρεπτικών διαλυμάτων για την ανάπτυξη των φυτών, καθώς επηρεάζει τη διαθεσιμότητα των περισσότερων θρεπτικών συστατικών (Dickson et al., 2016; Willumsen, 1980), και επομένως θα πρέπει να διατηρείται εντός ενός βέλτιστου εύρους. Για αυτό τον λόγο το pH των θρεπτικών διαλυμάτων θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 5,0-6,0 (συνήθως 5,5) προκειμένου το pH του ριζοστρώματος να διατηρηθεί μεταξύ 6,0-6,5 (Nerlich and Dannehl, 2021). Το pH του διαλύματος στο ριζόστρωμα επηρεάζεται από την ιοντική του σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος και τείνει να αυξάνει κατά την εξέλιξη της καλλιεργητικής περιόδου ως αποτέλεσμα της άνισης απορρόφησης ανιόντων και κατιόντων σε σχέση με το pH στο διάλυμα τροφοδοσίας (Sonneveld and Voogt, 2009; Σάββας, 2011). Στην πράξη η διαχείριση του pH μπορεί να επιτευχθεί τόσο με την προσθήκη είτε νιτρικού, θεικού και φωσφορικού οξέος (σε κατάλληλες συγκεντρώσεις) είτε ρυθμίζοντας κατάλληλα την αναλογία νιτρικού και αμμωνιακού αζώτου στο θρεπτικό διάλυμα (Neocleous and Savvas, 2015).

1.5.3 Συγκεντρώσεις απορρόφησης και εκτίμηση απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων από το φυτό
Διεθνώς, οι αναλογίες απορρόφησης μεταξύ θρεπτικών στοιχείων και νερού αναφέρονται με τον όρο «συγκεντρώσεις απορρόφησης» (Sonneveld and Voogt, 2009). Οι συγκεντρώσεις απορρόφησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό ή την αναπροσαρμογή των επιθυμητών συγκεντρώσεων στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας μέσω της παρακάτω μαθηματικής σχέσης (Σάββας, 2012):

$$C_{it} = C_{iu} + a (C_{id} - C_{iu}) \quad (3)$$

όπου C_{it} είναι η επιθυμητή συγκέντρωση του i θρεπτικού στοιχείου στο διάλυμα τροφοδοσίας, C_{iu} είναι η συγκέντρωση απορρόφησης του i θρεπτικού στοιχείου σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα, a το μέσο κλάσμα διαλύματος απορροής που εφαρμόζεται στην συγκεκριμένη καλλιέργεια και C_{id} είναι η συγκέντρωση του i θρεπτικού στοιχείου στο διάλυμα απορροής. Όταν η C_{id} είναι η επιθυμητή συγκέντρωση του i θρεπτικού στοιχείου στο διάλυμα απορροής τότε η C_{it} είναι η επιθυμητή συγκέντρωση αναφοράς του i θρεπτικού στοιχείου στο διάλυμα τροφοδοσίας (τιμή

εκκίνησης). Αντίστοιχα, αν η C_{id} αποτελεί μία τρέχουσα τιμή που μετρήθηκε σε κάποια φάση της καλλιεργητικής περιόδου, η ίδια εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπροσαρμογή της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος, επιλύοντας την εξίσωση ως προς C_{iu} για την εκτίμηση της τρέχουσας. Στη συνέχεια, η ίδια εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό μίας επικαιροποιημένης τιμής C_{it} αφού πρώτα η μεταβλητή C_{iu} αντικατασταθεί με την τρέχουσα τιμή που υπολογίσθηκε προηγουμένως και η C_{id} με την σταθερή τιμή-στόχο.

Γενικά, ο ρυθμός απορρόφησης νερού και θρεπτικών στοιχείων παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις τόσο από μέρα σε μέρα όσο κατά την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου που είναι ανάλογες με το στάδιο ανάπτυξης του φυτού, την φυλλική επιφάνεια, την αναλογία νεαρών και γηρασμένων φύλλων, το μήκος και την πυκνότητα του ριζικού συστήματος και άλλα μορφολογικά χαρακτηριστικά των φυτών (Ho and Adams, 1995). Ωστόσο, τόσο η πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων όσο και του νερού φαίνεται να επηρεάζονται με παρόμοιο τρόπο από τους παραπάνω παράγοντες γεγονός που οφείλεται κυρίως στο ότι οι μηχανισμοί που καθορίζουν τις ανάγκες του φυτού σε θρεπτικά στοιχεία και νερό, (φωτοσύνθεση και διαπνοή) μοιράζονται την ίδια μεταφορική οδό μέσω των στομάτων των φύλλων (Hormans and Bristow, 2002). Επομένως, οι αναλογίες πρόσληψης θρεπτικών στοιχείων και νερού παρουσιάζουν πολύ μικρότερες χρονικές διακυμάνσεις σε σύγκριση με τις χρονικές διακυμάνσεις που παρουσιάζουν οι ρυθμοί πρόσληψης θρεπτικών στοιχείων ή νερού ξεχωριστά (Incrocci et al., 2006; Savvas and Lenz, 2000; Sonneveld and Voogt, 2009). Είναι επομένως εφικτό να προσδιοριστούν μέσες αναλογίες πρόσληψης θρεπτικών στοιχείων προς νερό για κάθε θρεπτικό στοιχείο (μάζα απορροφούμενου θρεπτικού στοιχείου ανά μονάδα όγκου απορροφούμενου νερού), οι οποίες είναι αντιπροσωπευτικές για κάθε συγκεκριμένο καλλιεργούμενο είδος φυτού, για κάθε ξεχωριστό στάδιο ανάπτυξης και εποχής καλλιέργειάς τους. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι ενώ τα φυτά απορροφούν μονοσθενή θρεπτικά ιόντα και ιδιαίτερα K^+ , $H_2PO_4^-$ και NO_3^- ακόμη και από χαμηλές συγκεντρώσεις στο διάλυμα ριζοστρώματος, όμως για να απορροφηθούν επαρκείς ποσότητες δισθενών θρεπτικών ιόντων και ειδικότερα Ca^{2+} , Mg^{2+} και SO_4^{2-} , οι συγκεντρώσεις αυτών στο περιβάλλον των ριζών πρέπει να είναι σχετικά υψηλές (Neocleous and Savvas, 2015; Sonneveld and Voogt, 2009). Αυτό σημαίνει ότι τα δισθενή ιόντα θρεπτικών μακροστοιχείων τείνουν πάντοτε να συσσωρεύονται στο περιβάλλον των ριζών των φυτών.

Η εκτίμηση των συγκεντρώσεων απορρόφησης (ΣA) των θρεπτικών στοιχείων μπορεί να γίνει με δύο μεθόδους, είτε με βάση τις μετρήσεις των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα και την αντίστοιχη κατανάλωση νερού για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα παραγωγής (κλειστά υδροπονικά συστήματα), όσο και με βάση την ανάκτηση

των θρεπτικών στοιχείων από τη παραγόμενη ξηρή φυτομάζα σε συνδυασμό με την κατανάλωση νερού (ανοικτά και κλειστά υδροπονικά συστήματα) (Neocleous and Savvas, 2015; Roupheal et al., 2004; Tzerakis et al., 2013). Ο δεύτερος τρόπος βασίζεται στη συλλογή όλης της παραγόμενης φυτομάζας συμπεριλαμβανόμενου και όλων των κλαδεμάτων (καρπών, φύλλων, βλαστών) και τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων και του ξηρού βάρους για να υπολογιστούν οι συγκεντρώσεις απορρόφησης όπως πιο κάτω:

$$UCx_u = (C_{xr} \times B_r + \sum C_{xsi} \times B_{si} + \sum C_{xli} \times B_{li} + \sum C_{xfi} \times B_{fi}) / Tr \quad (4)$$

όπου C_{xr} , C_{xsi} , C_{xli} , και C_{xfi} συμβολίζουν τις συγκεντρώσεις ($mmol\ g^{-1}$) των μακροστοιχείων ($x = K, Ca, Mg, N, P$) στη ρίζα, βλαστό, φύλλα και καρπό, αντίστοιχα, B_r , B_{si} , B_{li} , και B_{fi} συμβολίζουν το ξηρό βάρος ($g\ plant^{-1}$) της ρίζας, βλαστού, φύλλων και καρπού, αντίστοιχα, και Tr συμβολίζει την απορρόφηση νερού από το φυτό για ένα δεδομένο διάστημα καλλιέργειας ($L\ plant^{-1}$). Ο δείκτης i απεικονίζει τις διαδοχικές ημερομηνίες όπου γινόταν αφαίρεση φυτικού υλικού κατά τη διάρκεια του πειράματος. Αυτή η μέθοδος θεωρήθηκε κατάλληλη για την εκτίμηση της πρόσληψη των θρεπτικών στοιχείων σε κλειστό σύστημα υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας, πιπεριάς και πεπονιάς (Neocleous and Savvas, 2015; Ropokis et al., 2019; Savvas et al., 2005). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ΣΑ σε κλειστό υδροπονικό σύστημα καλλιέργειας (NFT) πεπονιάς, ο προσδιορισμός των μέσων συγκεντρώσεων απορρόφησης (ΣΑ) τόσο με βάση τις μετρήσεις στο θρεπτικό διάλυμα όσο με βάση τις μετρήσεις στην ξηρή βιομάζα (BM) δίνουν συγκρίσιμα και αξιόπιστα αποτελέσματα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό ώστε να αξιολογηθεί πληρέστερα η απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων από την πεπονιά σε κλειστό υδροπονικό σύστημα (Neocleous and Savvas, 2015). Αντίστοιχα, σε πείραμα που πραγματοποιήθηκαν σε Μεσογειακές συνθήκες, για την διερεύνηση της επίδρασης του υποκειμένου εμβολιασμένων σπορόφυτων τομάτας και πιπεριάς στις μέσες ΣΑ των φυτών έδειξε ότι είναι σημαντικά αυξημένες σε σχέση με τις αντίστοιχες ΣΑ φυτών που καλλιεργήθηκαν σε βόρειο-ευρωπαϊκές κλιματικές συνθήκες, υποδηλώνοντας την ύπαρξη σημαντικής επίδρασης των κλιματικών συνθηκών στην απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων που είτε μπορεί να προέρχεται από διαφορές στην ένταση του φωτός, (Adams, 1993), είτε στην μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων απορρόφησης (Neocleous et al., 2017; Ropokis et al., 2019; Tzerakis et al., 2013).

Σκοπός της διδακτορικής διατριβής

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι ο καθορισμός βέλτιστων καλλιεργητικών παραμέτρων για την παραγωγή ασκόλυμπρου (*Scolymus hispanicus* L.) σε ανοικτού τύπου συστήματα υδροπονικής καλλιέργειας. Μέσω της βελτιστοποίησης των παραμέτρων καλλιέργειας, επιδιώκεται η διατήρηση των οργανοληπτικών και άλλων ποιοτικών χαρακτηριστικών (αντιοξειδωτικά, φαινολικά και φλαβονοειδή) του παραγόμενου προϊόντος, με ταυτόχρονη μεγιστοποίηση κυρίως του εμπορεύσιμου τμήματος του φυτού, δηλαδή του ριζοκόνδυλου και του εδάδιμου κεντρικού νεύρου των φύλλων. Για αυτό τον σκοπό μελετήθηκαν πειραματικά σε τέσσερα ξεχωριστά πειράματα τα εξής ερευνητικά ερωτήματα:

- Επίδραση της σχέσης N/K και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του θρεπτικού διαλύματος στα ποσοτικά χαρακτηριστικά και την θρεπτική κατάσταση του φυτού (Πείραμα I).
- Επίδραση της αλατότητας του θρεπτικού διαλύματος στα ποσοτικά, ποιοτικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά του φυτού (Πείραμα II).
- Επίδραση του υποστρώματος και της γεωμετρίας του υποδοχέα στα ποσοτικά χαρακτηριστικά και τις φυσιολογικές παραμέτρους του φυτού (Πείραμα III)
- Επίδραση του επίπεδου ολικού αζώτου και της πηγής του αζώτου (αναλογία νιτρικού και αμμωνιακού αζώτου) στα ποσοτικά χαρακτηριστικά, τις συγκεντρώσεις απορρόφησης και τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά του φυτού (Πείραμα IV)

Για διερευνηθεί αν και σε ποιο βαθμό οι ερευνητικές υποθέσεις που μελετήθηκαν αληθεύουν, αξιοποιήθηκαν διαφορετικές μεθοδολογίες που αφορούσαν τόσο τον προσδιορισμό βασικών εμπορικών - ποσοτικών χαρακτηριστικών (όπως το νωπό και ξηρό βάρος των φυτών και ο αριθμός των φύλλων) και φυσιολογικών παραμέτρων του φυτού (σχετική πυκνότητα χλωροφύλλης - SPAD, φθορισμός χλωροφύλλης - Fv/Fm, στοματική αγωγιμότητα) όσο και τον προσδιορισμό ποιοτικών και θρεπτικών παραμέτρων του φυτού όπως η συγκέντρωση ολικών αντιοξειδωτικών, ολικά φαινολικά, και φλαβονοειδή και την συγκέντρωση μακροθρεπτικών στοιχείων (όπως N, P, K, Ca, Mg και Fe). Επίσης, με στόχο την διερεύνηση της επίδρασης του υποστρώματος και της γεωμετρίας του υποδοχέα στα εμπορικά χαρακτηριστικά του ασκόλυμπρου, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις υδραυλικών παραμέτρων των υπό διερεύνηση υποστρωμάτων (όπως η υδραυλική αγωγιμότητα και το εύκολα διαθέσιμο νερό) με χρήση καινοτόμου αναλυτικού εξοπλισμού προσδιορισμού υδραυλικών ιδιοτήτων εδάφους HYPROP2.

Κεφάλαιο 2. Επίδραση της αναλογίας N/K και ηλεκτρικής αγωγιμότητας θρεπτικού διαλύματος στην παραγωγή και την ποιότητα του ασκόλυμπρου (*Scolymus hispanicus* L.)

2.1 Εισαγωγή

Στα συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους, όλα τα θρεπτικά στοιχεία παρέχονται στα φυτά μέσω του θρεπτικού διαλύματος. Το θρεπτικό διάλυμα είναι ένα υδατικό διάλυμα που προκύπτει από την ανάμειξη και προκαθορισμένη αναλογία πλήρως υδατοδιαλυτών λιπασμάτων το οποίο πρέπει να πληροί τις ακόλουθες προϋποθέσεις: (1) να περιέχονται όλα τα απαραίτητα στοιχεία για την φυσιολογική ανάπτυξη και καρποφορία των φυτών, (2) όλα τα στοιχεία να παρέχονται σε μορφή ιόντων, (3) οι συγκεντρώσεις κάθε ιόντος και τα συνολικά ιόντα να βρίσκονται εντός προκαθορισμένων επιπέδων για την φυσιολογική ανάπτυξη των φυτών, (4) να μην περιέχονται επιβλαβείς ουσίες και παθογόνοι μικροοργανισμοί, και (5) το pH του διαλύματος να κυμαίνεται μεταξύ 5,5 - 6,5 (Savvas et al., 2009; Sonneveld and Voogt, 2009). Η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος αναφέρεται στη συγκέντρωση κάθε θρεπτικού ιόντος στο διάλυμα.

Η σύνθεση των θρεπτικών διαλυμάτων έχει διερευνηθεί εκτενώς βιβλιογραφικά, ως αποτέλεσμα των σχεδιασμό ενός πλήθους διαφορετικών συνθέσεων θρεπτικών διαλυμάτων (συνταγές θρέψης) (Neocleous and Savvas, 2015; Pardossi et al., 1999; Dimitrios Savvas et al., 2005). Κάθε συνταγή θρέψης επιλέγεται με βάση το φυτικό είδος, το στάδιο ανάπτυξης, την καλλιεργητική περίοδο, το σύστημα καλλιέργειας (ανοιχτό ή κλειστό σύστημα), τη χρήση υποστρώματος ή όχι, τον τύπο του υποστρώματος, κ.α. και η διαφορά τους έγκειται στην αναλογία των θρεπτικών στοιχείων και τη συγκέντρωσή τους στο διάλυμα τροφοδοσίας (Sonneveld and Voogt, 2009). Επομένως σε καλλιέργειες εκτός εδάφους, ακόμη και μια μικρή αλλαγή στη σύνθεση των θρεπτικών στοιχείων μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη των φυτών και στην ποιότητα του προϊόντος. Ωστόσο, η ορθή διαχείριση των θρεπτικών στοιχείων μπορεί να επιτευχθεί λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο τη σύνθεση και τη συγκέντρωση των ιόντων αλλά και άλλες παραμέτρους όπως η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου, η θερμοκρασία, το επιθυμητό pH και ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) κ.α. (Savvas and Gruda, 2018).

Το άζωτο είναι το πιο απαραίτητο μακροθρεπτικό στοιχείο για τα φυτά, και η διαθεσιμότητά του είναι καθοριστικής σημασίας για την ανάπτυξη και απόδοση των φυτών (Cárdenas-Navarro et al., 1999). Το νιτρικό (NO_3^-) και αμμωνιακό άζωτο (NH_4^+) είναι οι δύο κύριες μορφές αζώτου που απορροφώνται από τα φυτά (Randle, 2000; Savvas et al., 2003; Silva et al., 2013), αλλά και οι δύο

αυτές μορφές αζώτου βρίσκονται πλέον σε έλλειψη στα φυσικά οικοσυστήματα. Για την επίτευξη επαρκών αποδόσεων και την κάλυψη των παγκόσμιων απαιτήσεων σε τρόφιμα, περισσότερα από 110 kt αζωτούχων λιπασμάτων χορηγούνται στις καλλιέργειες ετησίως (Ahmed et al., 2020). Ωστόσο, η υπέρμετρη χρήση αζωτούχων λιπασμάτων και η ακατάλληλη εφαρμογή τους στον αγρό έχει ως αποτέλεσμα την χαμηλή απόδοση αξιοποίησης του αζώτου από τα φυτά (Nitrogen Use Efficiency), με αποτέλεσμα να χάνεται περίπου το 50-70% στο περιβάλλον, προκαλώντας σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως η οξίνιση του εδάφους και ο ευτροφισμός των επιφανειακών υδάτων (Williams et al., 2016). Παράλληλα, ενώ το άζωτο είναι ένα απαραίτητο μακροθρεπτικό συστατικό για την ανάπτυξη των φυτών, συνδέεται στενά με τις προσαρμογές των φυτών σε διάφορους αβιοτικούς παράγοντες (Geary et al., 2015; Ye et al., 2022). Για παράδειγμα, η αναλογία μεταξύ $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ μορφής αζώτου στο κυτταρόπλασμα των φυτικών ιστών, επηρεάζει την ανθεκτικότητα των φυτών σε στρεσογόνους παράγοντες όπως την αυξημένη συγκέντρωση NaCl στο νερό άρδευσης, την ανεπάρκεια θρεπτικών στοιχείων όπως το κάλιο στο έδαφος αλλά και συμπτώματα τοξικότητας που εμφανίζονται από την συσσώρευση βαρέων μετάλλων στους φυτικούς ιστούς (Montanari et al., 2008; Tabatabaei et al., 2006; Zhao et al., 2016). Καθώς το άζωτο θεωρείται το πιο σημαντικό θρεπτικό στοιχείο για την ανάπτυξη των φυτών, τα φυτά έχουν εξελίξει αποτελεσματικές μεθόδους διαχείρισης των επιπέδων δέσμευσης του αζώτου ως απόκριση στους στρεσογόνους βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες (Blom-Zandstra, 1989; Neumann and Kafkafi, 1985; Ye et al., 2022).

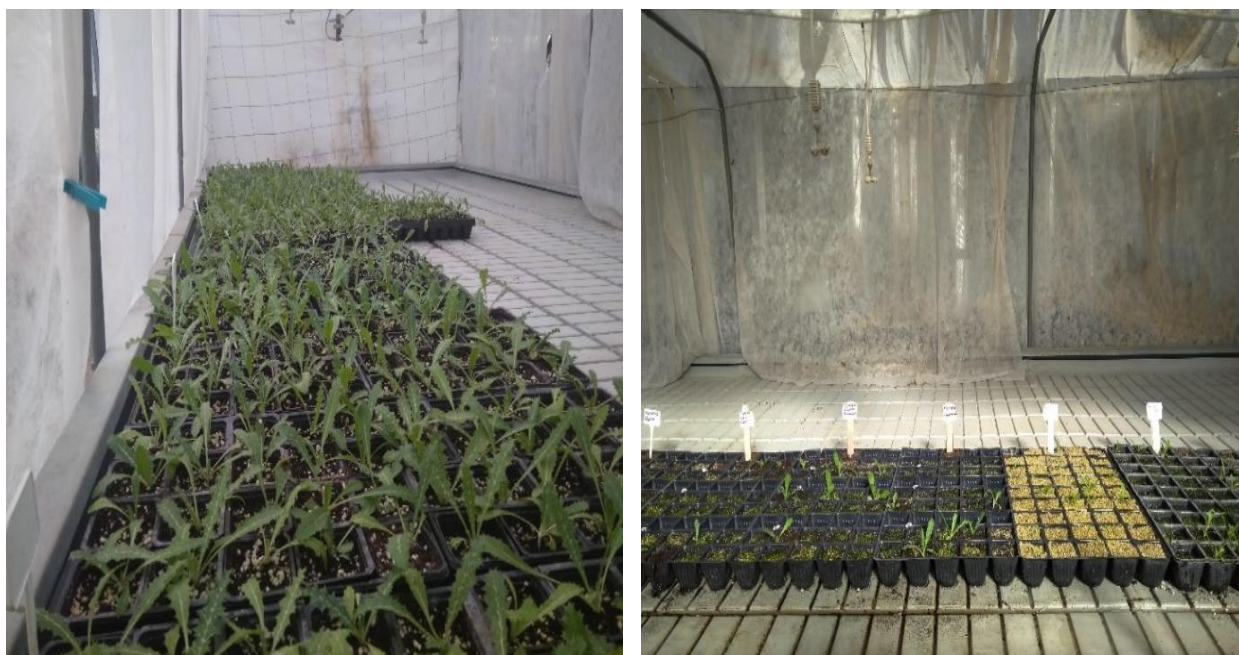
Εξίσου σημαντικές, εκτός από τις συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων, είναι και οι αναλογίες μεταξύ τους των στοιχείων στα θρεπτικά διαλύματα. Η αξία του καθορισμού άριστων αναλογιών μεταξύ των θρεπτικών στοιχείων έγκειται στο ότι αυτές μπορούν να διατηρούνται σταθερές ανεξάρτητα από την ολική συγκέντρωση αλάτων (Sonneveld and Voogt, 2009). Οι αναλογίες θρεπτικών στοιχείων που έχει διαπιστωθεί ότι επηρεάζουν τις αποδόσεις των φυτών που καλλιεργούνται εκτός εδάφους είναι κυρίως οι σχέσεις $\text{K}:\text{Ca}:\text{Mg}$, $\text{K}:\text{Ca}$, $\text{K}:\text{N}$ και $\text{NH}_4/(\text{NH}_4+\text{NO}_3)$, καθώς και η αναλογία των μακροανιόντων $\text{NO}_3:\text{SO}_4$ (Σάββας, 2012, Neocleous and Savvas, 2013). Οι αναλογίες που εφαρμόζονται στις καλλιέργειες εκτός εδάφους αποσκοπούν στην επίτευξη επιθυμητών τιμών στο περιβάλλον των ριζών (Sonneveld, 2002, Σάββας, 2012).

Για αυτό τον σκοπό σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε πείραμα με στόχο την διερεύνηση της επίδρασης της σχέσης $\text{N}:\text{K}$ και του επιπέδου ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) του θρεπτικού διαλύματος στην παραγωγή και την ποιότητα του εδώδιμου αυτοφυούς φυτού ασκόλυμπρου (*Scolymus hispanicus* L.).

2.2 Υλικά και μέθοδοι

2.2.1 Εγκατάσταση του πειράματος και πειραματικός σχεδιασμός

Σπόροι ασκόλυμπρου (*Scolymus hispanicus* L.) συλλέχτηκαν από την περιοχή της Μονής Αγκαράθου, νοτιοανατολικά του Ηρακλείου, σε υψόμετρο 538 m. Η σπορά πραγματοποιήθηκε την 28η Νοεμβρίου 2018, σε δίσκους-σπορεία πολλαπλών θηκών στο ριζωτήριο του θερμοκηπίου (Εικόνα 5) και δύο μήνες μετά (τέλος Ιανουαρίου 2019) έγινε μεταφύτευση των σπορόφυτων σε πλαστικούς σάκους χωρητικότητας 32 L, μήκους 100 cm και ύψους υποστρώματος 15 cm σε υπόστρωμα υδροπονικού περλίτη κοκκομετρίας 0,5-2,5 mm (Εικόνα 6). Ο υδροπονικός περλίτης επιλέχθηκε λόγω της βιομηχανικής του επεξεργασίας σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα την απουσία παθογόνων και σπόρων ζιζανίων, καθώς και λόγω της ομοιόμορφης κοκκομετρίας του που μπορεί να συγκρατήσει ικανοποιητικά ποσοστά υγρασίας, η οποία αποδίδεται εύκολα στα φυτά (Siomos et al., 2001). Κάθε σάκος φιλοξένησε συνολικά 4 φυτά ασκόλυμπρου. Οι σάκοι τοποθετήθηκαν σε οκτώ διπλές σειρές σε απόσταση $3,0 \times 0,45$ m σε υπερυψωμένα κανάλια, από γαλβανισμένη και προβαμμένη λαμαρίνα, πάχους 0,7 cm, πλάτους 30 cm και μήκους 300 cm.



Εικόνα 5. Δίσκοι σπορόφυτων ασκόλυμπρου ηλικίας 1 μηνός στο ριζωτήριο (Προσωπικό αρχείο).

Τα κανάλια διατάχθηκαν στο χώρο σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους με κατεύθυνση Βορρά-Νότο και ρυθμίστηκαν σε κατάλληλο ύψος, με κλίση 2% για την απορροή του πλεονάζοντος θρεπτικού διαλύματος, για να βοηθούν τους χειρισμούς του πειράματος (Εικόνα 5). Στη συνέχεια,

εγκαταστάθηκε το δίκτυο άρδευσης, και πραγματοποιήθηκε προενυδάτωση του υποστρώματος μέχρι το υπόστρωμα να κορεσθεί πλήρως με το αντίστοιχο θρεπτικό διάλυμα της κάθε μεταχείρισης του πειράματος.



Εικόνα 6. Σάκοι χωρητικότητας 30 L που χρησιμοποιήθηκαν ως υποδοχείς υποστρώματος (περλίτη) υδροπονικής καλλιέργειας του ασκόλυμπρου (πυκνότητας τεσσάρων φυτών ανά σάκο).

Δύο ημέρες μετά την προενυδάτωση των υποστρωμάτων, πραγματοποιήθηκαν τέσσερις οπές στο κάτω μέρος κάθε σάκου ώστε να επιτρέπεται η ελεύθερη απορροή του θρεπτικού διαλύματος μετά από κάθε πότισμα. Για τη θρέψη των φυτών παρασκευάστηκε θρεπτικό διάλυμα χρησιμοποιώντας αυτόματο σύστημα ανάμιξης πυκνών διαλυμάτων (ALAGRO IQ60, Αθήνα, Ελλάδα). Οι συγκεντρώσεις των μακρο- και μικρο-θρεπτικών στοιχείων του θρεπτικού διαλύματος παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 2. Το διάλυμα τροφοδοτήθηκε στα φυτά με στάγδην άρδευση από ένα διανεμητή ανά φυτό με ρυθμό ροής 4 L h^{-1} . Το κλάσμα απορροής μετά από κάθε άρδευση ήταν 0,30-0,40 ρυθμίζοντας τη συχνότητα και τη διάρκεια σύμφωνα με τις κλιματολογικές συνθήκες. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα πέντε έως επτά αρδευτικές εφαρμογές ανά ημέρα σε κάθε πειραματική μονάδα (υπερυψωμένο κανάλι). Για να εκτιμηθεί η επίδραση της αγωγιμότητας και της σχέσης N/K του θρεπτικού διαλύματος στην ανάπτυξη και απόδοση των

φυτών, εφαρμόστηκαν 4 μεταχειρίσεις θρεπτικών διαλυμάτων με δύο επίπεδα αγωγιμότητας (2,2 και 2,8 dS m⁻¹) σε δύο σχέσεις N/K, χαμηλή και υψηλή σχέση (1,45 και 2,25 mol mol⁻¹, αντίστοιχα) στην αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος 2,2 dS m⁻¹ και αντίστοιχα χαμηλή και υψηλή σχέση (1,09 και 1,69 mol mol⁻¹, αντίστοιχα) στην αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος 2,8 dS m⁻¹.

Για τις ανάγκες του πειράματος και την κατάρτιση των θρεπτικών διαλυμάτων (μεταχειρίσεων) πραγματοποιήθηκε ανάλυση νερού σε όλα τα μακροθρεπτικά στοιχεία και ιχνοστοιχεία (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Χημική σύσταση και χαρακτηριστικά του νερού άρδευση.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
EC	0,51 dS m ⁻¹	Fe	0,00 μmol L ⁻¹
pH	8,02	Mn ⁺⁺	0,00 μmol L ⁻¹
Ca ²⁺	1,52 mmol L ⁻¹	Zn ⁺⁺	2,29 μmol L ⁻¹
Mg ²⁺	0,76 mmol L ⁻¹	Cu ⁺⁺	0,00 μmol L ⁻¹
K ⁺	0,03 mmol L ⁻¹	B	1,85 μmol L ⁻¹
NH ₄ ⁺	0,00 mmol L ⁻¹	Mo	0.00 μmol L ⁻¹
Na ⁺	0,31 mmol L ⁻¹		
SO ₄ ²⁻	0,84 mmol L ⁻¹		
NO ₃ ⁻	0,10 mmol L ⁻¹		
H ₂ PO ₄ ⁻	0,00 mmol L ⁻¹		
HCO ₃ ⁻	2,75 mmol L ⁻¹		

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τη σύνθεση των τεσσάρων θρεπτικών διαλυμάτων που παρασκευάστηκαν για τις ανάγκες του πειράματος. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το θρεπτικό διάλυμα S1N1, που χαρακτηρίζεται από χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και χαμηλή συγκέντρωση ολικού αζώτου, το διάλυμα S1N2 που χαρακτηρίζεται από χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και υψηλή συγκέντρωση ολικού αζώτου, το διάλυμα S2N1 που χαρακτηρίζεται από υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και χαμηλή συγκέντρωση ολικού αζώτου, και το διάλυμα S2N2 που χαρακτηρίζεται από υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και υψηλή συγκέντρωση ολικού αζώτου. Σε όλες τις λιπαντικές επεμβάσεις το pH ρυθμίστηκε στο 5,6 μέσω της αντίστοιχης ρύθμιση της υδροπονικής κεφαλής προσαρμόζοντας κατάλληλα την προσθήκη νιτρικού οξέος στο θρεπτικό διάλυμα.

Πίνακας 3. Σύνθεση θρεπτικών διαλυμάτων των τεσσάρων μεταχειρίσεων σύμφωνα με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά μικροστοιχείων και ιχνοστοιχείων (mM και μM , αντίστοιχα) του θρεπτικού διαλύματος σε δύο σχέσεις N/K (χαμηλή και υψηλή) και δύο επίπεδα ηλεκτρικής αγωγιμότητας (2,2 και 2,8 dS m⁻¹).

Παράμετρος	S1N1	S1N2	S2N1	S2N2
EC (dS m ⁻¹)	2,20	2,20	2,8	2,8
pH	5,60	5,60	5,60	5,60
K ⁺ (mM)	6,21	6,21	8,24	8,24
Ca ²⁺ (mM)	3,98	3,98	5,23	5,23
Mg ²⁺ (mM)	2,24	2,24	2,94	2,94
SO ₄ ²⁻ (mM)	4,44	1,94	7,38	4,88
NO ₃ ⁻ (mM)	9,00	14,00	9,00	14,00
NH ₄ ⁺ (mM)	1,00	1,00	1,00	1,00
H ₂ PO ₃ ⁻ (mM)	1,30	1,30	1,30	1,30
Fe (μM)	20,00	20,00	20,00	20,00
Mn (μM)	10,00	10,00	10,00	10,00
Zn (μM)	7,00	7,00	7,00	7,00
Cu (μM)	0,80	0,80	0,80	0,80
B (μM)	25,00	25,00	25,00	25,00
Mo (μM)	0,60	0,60	0,60	0,60
Si (μM)	0,00	0,00	0,00	0,00

2.3 Μετρήσεις και στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων

Την ημέρα της συλλογής και εξαγωγής τους από το θρεπτικό υπόστρωμα, 120 ημέρες μετά την μεταφύτευση (HMM), πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις τόσο στον νωπό όσο και ξηρό φυτικό ιστό με σκοπό την αξιολόγηση της απόδοσης και της φυσιολογικής λειτουργίας του φυτού (Εικόνα 6). Πιο συγκεκριμένα, προσδιορίστηκε ο σχετικός φθορισμός χλωροφύλλης προσαρμοσμένο στο σκοτάδι (Fv/Fm) με την χρήση φθοριόμετρου OS-30p (Opti-Sciences, ΗΠΑ) ο οποίος έχει αναφερθεί ως ένα χρήσιμο εργαλείο για τη σχετική εκτίμηση της μέγιστης φωτοχημικής απόδοσης του φωτοσυστήματος II και η σχετική συγκέντρωση χλωροφύλλης SPAD-502 (Minolta, Ιαπωνία), σε πλήρως αναπτυγμένα φύλλα (Baker, 2008). Κατά τη συγκομιδή, ολόκληρο το φυτό εκριζώθηκε, και το υπέργειο μέρος διαχωρίστηκε από τη ρίζα. Οι παράμετροι που μετρήθηκαν κατά την συγκομιδή ήταν ο αριθμός των φύλλων, το νωπό και ξηρό βάρος των φυτών [g], η διάμετρος της ροζέτας [cm], καθώς και το νωπό και ξηρό βάρος του ριζοκόνδυλου [g].



Εικόνα 7. Μέτρηση σχετικής πυκνότητας χλωροφύλλης και φθορισμού χλωροφύλλης σε πλήρως εκπτυγμένα φύλλα του φυτού ασκολύμπρου (προσωπικό αρχείο)

Οι συγκεντρώσεις ανόργανων στοιχείων πραγματοποιήθηκε σε ξηρό φυτικό ιστό που συλλέχθηκε από ένα φυτό (ολόκληρο) από κάθε πειραματικό τεμάχιο κατά την συγκομιδή (120 HMM) (**Εικόνα 8**). Οι ξεροί φυτικοί ιστοί των φύλλων και κονδυλόριζας αλέστηκαν χωριστά σε μύλο τύπου Willey και περάστηκαν από κόσκινο διαμέτρου 20 mm. Στη συνέχεια, λήφθηκε δείγμα 0.5 g από κάθε δείγμα ιστού για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων ολικού-N, K^+ , P, Ca^{2+} και Mg^{2+} . Το άζωτο προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο Kjeldahl μετά από ανοργανοποίηση με H_2SO_4 . Ο φώσφορος, το K^+ , το Ca^{2+} και το Mg^{2+} προσδιορίστηκαν σε υδατικό εκχύλισμα που προέκυψε από ξηρή καύση στους 400 °C για 24 ώρες. Επιπλέον, προστέθηκαν 10 mL υδροχλωρικού οξέος 2N (HCl) για να υγρανθεί η τέφρα και τα δείγματα μεταφέρθηκαν σε θερμή πλάκα στους 80°C για λίγα λεπτά. Στη συνέχεια, τα διαλύματα διηθήθηκαν και μεταφέρθηκαν σε φιάλες των 100 mL όπου προστέθηκε απεσταγμένο νερό. Οι συγκεντρώσεις των K^+ , P, Ca^{2+} και Mg^{2+} στα παραγόμενα υδατικά εκχυλίσματα προσδιορίστηκαν με τη χρήση οργάνου φασματομετρίας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (ICP-MS 7500cx coupled with Autosampler Series 3000, Agilent Technologies). Παράλληλα, τρεις φορές την εβδομάδα πραγματοποιούνταν μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ($dS\ m^{-1}$) και pH και ογκομέτρηση του κλάσματος απορροής κάθε πειραματικής μονάδας με χρήση ψηφιακού μετρητή pH/EC HI 8621 (Hanna Instruments, ΗΠΑ) και ογκομετρητή 20 L.



Εικόνα 8. Αναπτυγμένα φυτά ασκόλυμπρου κατά τη διάρκεια καλλιέργειας σε ανοικτό σύστημα καλλιέργειας εκτός εδάφους, 60 (αριστερά) και 120 (δεξιά) ΗΜΜ, αντίστοιχα.

Το πειραματικό σχέδιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Σχέδιο Τυχαιοποιημένων Πλήρων Ομάδων (Εικόνα 8) σε ένα πείραμα συνδυασμένων παραγόντων 2×2 με 4 επαναλήψεις ανά μεταχείριση και αναλύθηκε στατιστικά με ανάλυση διακύμανσης διπλή κατεύθυνσης (two-way ANOVA). Τα αποτελέσματα αναλύθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος στατιστικής ανάλυσης SPSS, έγινε ανάλυση διακύμανσης των τιμών και ο έλεγχος σημαντικότητας (significance test) των διαφορών των μέσων όρων με το κριτήριο Duncan σε επίπεδο σημαντικότητας 5%.

2.4 Αποτελέσματα

2.4.1 Αποτελέσματα ποσοτικών και φυσιολογικών παραμέτρων

Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των τεσσάρων μεταχειρίσεων θρεπτικών διαλυμάτων, οι οποίες διαφέρουν στην σχέση N/K και στην αγωγιμότητα του διαλύματος τροφοδοσίας. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του πειράματος θρέψης προέκυψε ότι δεν υπήρξαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο επιπέδων αγωγιμότητας ($2,2$ και $2,8 \text{ dS m}^{-1}$) του θρεπτικού διαλύματος στο νωπό βάρος, την διάμετρο και τον αριθμό των φύλλων, ενώ αντίθετα η υψηλή σχέση N/K αύξησε σημαντικά τον αριθμό και το νωπό βάρος των φύλλων, τη διάμετρο του ρόδακα των φύλλων καθώς και το νωπό βάρος της κονδυλόριζας χωρίς την ύπαρξη αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο παραγόντων ηλεκτρικής αγωγιμότητας και συγκέντρωσης ολικού αζώτου (Πίνακας 4). Επίσης, οι επεμβάσεις του πειράματος δεν επηρέασαν σημαντικά την σχετική πυκνότητα της χλωροφύλλης (SPAD), τον σχετικό φθορισμό της χλωροφύλλης (F_v/F_m) των φύλλων του φυτού.

Πίνακας 4. Αποτελέσματα των μετρήσεων της επίδρασης των 4 θρεπτικών διαλυμάτων στον αριθμό των φύλλων, του νωπού βάρους των φύλλων και των ριζών (g), της διαμέτρου της ροζέτας των φύλλων, του σχετικού φθορισμού και της πυκνότητας της χλωροφύλλης των φύλλων. Οι μέσοι όροι της ίδιας στήλης ακολουθούνται από διαφορετικά γράμματα διαφέροντα στατιστικά σημαντικά με βάση το κριτήριο Duncan ($p=0,05$)

Επίπεδα κύριων δράσεων	Αριθμός φύλλων	Νωπό βάρος φύλλων v (g)	Νωπό βάρος ρίζας (g)	Διάμετρος ροζέτας φύλλων (cm)	Σχετικός φθορισμός χλωροφύλλης (Fv/Fm)	Σχετική πυκνότητα χλωροφύλλης (SPAD)
Σχέση N/K (mM)	$p \leq 0,05$	$p \leq 0,05$	$p \leq 0,05$	$p \leq 0,05$	$p \geq 0,05$	$p \geq 0,05$
Χαμηλή	30,75 b	269,96 b	147,50 b	57,24 b	0,735 a	50,78 a
Υψηλή	37,62 a	358,94 a	175,40 a	64,05 a	0,739 a	54,74 a
Ηλεκτρική αγωγιμότητα (dS m ⁻¹)	$p \geq 0,05$	$p \geq 0,05$	$p \geq 0,05$	$p \geq 0,05$	$p \geq 0,05$	$p \geq 0,05$
Χαμηλή	33,38 a	308,72 a	188,52 a	62,09 a	0,747 a	57,07 a
Υψηλή	35,00 a	320,18 a	170,22 a	59,19 a	0,757 a	57,52 a
Αλληλεπίδραση (Σχέση N/K × EC)	$p \geq 0,05$	$p \geq 0,05$	$p \geq 0,05$	$p \geq 0,05$	$p \geq 0,05$	$p \geq 0,05$

2.4.2 Συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων φυτικού ιστού σε φύλλα και κονδυλόριζα

Όπως δείχνει ο Πίνακας 5, η συγκέντρωση του ολικού αζώτου στα φύλλα του ασκόλυμπρου ήταν σημαντικά αυξημένη στις επεμβάσεις της υψηλής σχέσης N/K και στις δύο ηλεκτρικές αγωγιμότητες του θρεπτικού διαλύματος (2,2 και 2,8 dS m⁻¹), ενώ δεν υπήρξαν σημαντικές διαφορές στη συγκέντρωση των θρεπτικών μακροστοιχείων K⁺, P, Ca²⁺ και Mg²⁺ στα φύλλα. Αντίστοιχα, από τα αποτελέσματα της συγκέντρωσης των θρεπτικών στοιχείων των ριζοκόνδυλων προέκυψε ότι το ολικό άζωτο ήταν αυξημένο στις επεμβάσεις της υψηλής σχέσης N/K στο θρεπτικό διάλυμα και για τις δύο ηλεκτρικές αγωγιμότητες, ενώ δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στην περιεκτικότητα των ριζοκόνδυλων στα θρεπτικά μακροστοιχεία K⁺, P, Ca²⁺ και Mg²⁺.

Πίνακας 5. Συγκέντρωση θρεπτικών μακροστοιχείων των φύλλων και ριζοκόνδυλων σε χειμερινή καλλιέργεια ασκόλυμπρου για τις μεταχειρίσεις S1: Χαμηλή αγωγιμότητα, S2: Υψηλή αγωγιμότητα, N1: Χαμηλή σχέση N/K, N2: Υψηλή σχέση N/K. Οι μέσοι όροι της ίδιας στήλης ακολουθούμενοι από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά με βάση το κριτήριο Duncan ($p=0,05$)

Τμήμα	Επέμβαση		N %	P %	K %	Ca %	Mg %
Φύλλα	S1	N1	2,87 b	3,11 a	8,03 a	1,40 a	0,16 a
		N2	3,79 a	2,87 a	6,92 a	1,78 a	0,21 a
	S2	N1	2,70 b	2,93 a	8,16 a	1,40 a	0,14 a
		N2	3,85 a	2,92 a	6,12 a	1,35 a	0,15 a
Ριζοκόνδυλοι	S1	N1	2,27 b	3,75 a	1,40 a	0,50 a	0,05 a
		N2	2,79 a	3,41,a	1,41 a	0,48 a	0,06 a
	S2	N1	2,42 b	3,87 a	1,35 a	0,41 a	0,07 a
		N2	2,89 a	3,62 a	1,33 a	0,42 a	0,06 a

2.5 Συζήτηση

Στην παρούσα ερευνητική εργασία μελετήθηκε η επίδραση 4 θρεπτικών διαλυμάτων τα οποία διαφέρουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος (χαμηλή: 2,2 και υψηλή: 2,8 dS m^{-1}) και στη σχέση N/K (χαμηλή σχέση: 1.61 και 1.31 mol mol^{-1} και υψηλή σχέση: 2,40 και 1,82 mol mol^{-1} , αντίστοιχα στις δύο αγωγιμότητες) στην υδροπονική καλλιέργεια ασκόλυμπρου ανοικτού συστήματος με υπόστρωμα υδροπονικό περλίτη.

Μετά από 4 μήνες καλλιέργειας μετρήθηκαν ο αριθμός των φύλλων, η διάμετρος του ρόδακα (cm), η σχετική πυκνότητα (SPAD) και ο σχετικός φθορισμός χλωροφύλλης (Fv/Fm), καθώς και το νωπό και ξηρό βάρος (g) του υπέργειου και υπόγειου τμήματος των φυτών και έγινε επίσης ανάλυση των ανόργανων θρεπτικών στοιχείων των φυτικών ιστών στα φύλλα και τους ριζοκόνδυλους των φυτών.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι ο αριθμός των φύλλων και η διάμετρος της ροζέτας του φυτού καθώς επίσης το νωπό βάρος τόσο των φύλλων όσο και των ριζοκόνδυλων ήταν σημαντικά αυξημένα στις μεταχειρίσεις των δύο θρεπτικών διαλυμάτων με την υψηλή σχέση N/K (S1N2 και S2N2), ενώ δεν επηρεάστηκαν από την αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) από το 2,2 στο 2,8 χωρίς να υπάρξει αλληλεπίδραση μεταξύ της σχέσης N/K και EC. Παράλληλα, η συγκέντρωση και ο σχετικός φθορισμός της χλωροφύλλης (Fv/Fm) των φύλλων (λειτουργικότητα του φωτοσυστήματος II της χλωροφύλλης) δεν επηρεάστηκε από τις επεμβάσεις του πειράματος και

κυμάνθηκε σε φυσιολογικά επίπεδα, γεγονός που καταδεικνύει ότι καμιά από τις επεμβάσεις δεν είχε αρνητική επίδραση στην φωτοσυνθετική λειτουργία των φύλλων των φυτών. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν κατά τους (Cavarianni et al., 2008) όπου η αύξηση της συγκέντρωσης του αζώτου στο θρεπτικό διάλυμα καλλιέργειας ρόκας είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ψηλότερων φυτών ενώ επίσης επηρέασε θετικά το νωπό και ξηρό βάρος φύλλων και ρίζας. Επίσης, σε άλλη εργασία η συγκέντρωση και η αναλογία των διαφορετικών πηγών αζώτου ($\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$) στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας είχε σημαντική επίδραση στην αύξηση της νωπής και ξηρής βιομάζας σε υδροπονική καλλιέργεια μαρουλιού (Savvas et al., 2006), ωστόσο το σταμναγκάθι (*Cichorium spinosum* L.) δεν φάνηκε να επηρεάζεται σημαντικά από τη συγκέντρωση του ολικού αζώτου (4 και 16 mM) και το ποσοστό αμμωνιακού αζώτου (5, 25 και 50%) στο θρεπτικό διάλυμα σε ανοικτό υδροπονικό σύστημα καλλιέργειας (Chatzigianni et al., 2018). Επίσης, σε πείραμα με φυτά πατάτας (*Solanum tuberosum* var. Sava), μια μικρή αύξηση της συγκέντρωσης αζώτου (σε σχέση με το κάλιο) στο θρεπτικό διάλυμα προκάλεσε σημαντική αύξηση στους βλαστούς των φυτών, ενώ δεν φάνηκε να επηρεάζει σημαντικά την ανάπτυξη των κονδύλων (Davis et al., 2022; Silva et al., 2013). Αντιθέτως, η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα ($3,5 \text{ dS m}^{-1}$) του θρεπτικού διαλύματος επηρέασε σημαντικά τα ποσοτικά χαρακτηριστικά μαρουλιού μειώνοντας τόσο το νωπό όσο και το ξηρό βάρος των φυτών (g) καθώς και την φυλλική τους επιφάνεια σε υδροπονικό σύστημα επίπλευσης δύο διαδοχικών καλλιεργητικών περιόδων (Conversa et al., 2021).

Στην παρούσα μελέτη, η συγκέντρωση του ολικού N τόσο στα φύλλα όσο και στους ριζοκόνδylους του ασκόλυμπρου αυξήθηκε στις επεμβάσεις της υψηλής σχέσης N/K χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά από το επίπεδο της αγωγιμότητας του θρεπτικού διαλύματος, ενώ δεν υπήρξαν σημαντικές διαφορές στην περιεκτικότητα των φύλλων και ριζοκόνδylων στα θρεπτικά στοιχεία K^+ , P, Ca^{2-} και Mg^{2-} μεταξύ των επεμβάσεων του πειράματος.

Κεφάλαιο 3. Επίδραση αλατότητας του θρεπτικού διαλύματος σε αγρονομικά χαρακτηριστικά του ασκόλυμπρου καλλιεργούμενου σε ανοικτό υδροπονικό σύστημα

3.1 Εισαγωγή

Ανάλογα το επίπεδο αντοχής των φυτών στο NaCl, τα επίπεδα αλατότητας που απαντώνται συνήθως στις καλλιέργειες κηπευτικών επηρεάζουν την ανάπτυξη και την απόδοση τους κυρίως λόγω ωσμωτικών επιδράσεων ή θρεπτικών ανισορροπιών. Η μειωμένη ανάπτυξη των φυτών συνήθως συνδέεται με το υδατικό στρες (ωσμωτική επίδραση) που μεταβάλλει τις φυσιολογικές λειτουργίες του φυτού με αποτέλεσμα τη μειωμένη απόδοση της καλλιέργειας. Το αβιοτικό στρες που προκαλεί η υψηλή αγωγιμότητα του νερού άρδευσης επηρεάζει αρνητικά την ανάπτυξη των φυτών, αρχικά αναστέλλοντας την πρόσληψη νερού και εν συνεχεία λόγω της τοξικότητας ως αποτέλεσμα της ανισορροπίας στην συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων στο κυτταρόπλασμα (Munns, 2002). Επιπλέον, η υψηλή συγκέντρωση NaCl μπορεί να προκαλέσει οξειδωτικό στρες ως αποτέλεσμα της επίδρασης των δραστικών μορφών οξυγόνου με συνέπεια το σημαντικό ενεργειακό κόστος για τα φυτά με στόχο είτε να αποκλείσουν τα ιόντα Na⁺ και Cl⁻ στο ριζικό σύμπλασμα είτε να τα απομονώσουν μέσα στα χυμοτόπια, αποφεύγοντας την μετατόπιση τους στα φωτοσυνθετικά ενεργά φύλλα (Munns and Tester, 2008; Volkmar et al., 1998). Ως αποτέλεσμα του αβιοτικού στρες από την αλατότητα, οι παραγωγοί κηπευτικών καλλιεργειών αναγκάζονται συχνά να αλλάξουν το είδος της καλλιέργειας με φυτικά είδη που είναι περισσότερο ανεκτικά σε μέτρια και υψηλά επίπεδα αλατότητας ώστε να μπορούν να επιτύχουν οικονομικά βιώσιμες αποδόσεις (Cuevas et al., 2019).

Η καλλιέργεια άγριων εδώδιμων λαχανευόμενων ειδών αποτελεί μια σύγχρονη και οικονομικά ελκυστική δραστηριότητα, δεδομένης της υψηλής διατροφικής και γαστρονομικής τους σημασίας, με αυξανόμενη ζήτηση από τους καταναλωτές. Πρόσφατα ερευνητικά δεδομένα αναφέρουν ότι τα άγρια λαχανευόμενα είδη όπως το *Chenopodium album* L. (Chenopodiaceae), το *Plantago coronopus* (Plantaginaceae), το *Portulaca oleraceae* (Portulacaceae) και το *Cichorium spinosum* L. (Asteraceae), αποτελούν ιδανική επιλογή καλλιέργειας σε περιοχές που πλήττονται από τις επιπτώσεις συσσώρευσης αλάτων στο έδαφος και σε περιοχές όπου το νερό άρδευσης είναι υποβαθμισμένο από την υψηλή συγκέντρωση NaCl (Klados and Tzortzakis, 2014; Petropoulos et al., 2017; Salonikioti et al., 2015). Επίσης, σύμφωνα με τους (Chatzigianni et al., 2019; Ntatsi et al., 2017) το σταμναγκάθι (*Cichorium spinosum* L.) αποτελεί ακόμα ένα λαχανευόμενων φυτό με ανθεκτικότητα σε μέτρια επίπεδα αλατότητας. Πιο συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι οι

παραθαλάσσιοι οικότυποι σταμναγκαθίου παρουσιάζουν υψηλότερο βαθμό ανοχής στο αλάτι από τους ορεινούς οικότυπους, ενώ επίσης οι Ntatsi et al. (2017) αναφέρουν ότι μεταχειρίσεις μέτριας αγωγιμότητας θρεπτικού διαλύματος μείωσαν το νωπό βάρος και την περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη στο σταμναγκάθι κυρίως ως αποτέλεσμα του επιπέδου του ωσμωτικού στρες και δευτερευόντως της πηγής των αλάτων (NaCl, KCl, Na₂SO₄, CaCl₂).

Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιήθηκε πείραμα με στόχο τη διερεύνηση της δυνατότητας καλλιέργειας του ασκόλυμπρου σε επίπεδα αγωγιμότητας αντίστοιχα με τα μέτρια επίπεδα αλατότητας-αγωγιμότητας που απαντώνται συχνά στο νερό άρδευσης των νησιωτικών περιοχών της Μεσογείου. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν τέσσερις συγκεντρώσεις NaCl (0,5, 5,0, 10,0 και 15,0 mM) στο θρεπτικό διάλυμα ανοικτού συστήματος υδροπονικής καλλιέργεια ασκόλυμπρου, για να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις τους στην απόδοση, στις φυσιολογικές παραμέτρους, στη συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων, καθώς και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των φυτών, 90 και 120 HMM.

3.2 Υλικά και μέθοδοι

3.2.1 Πειραματικό σχέδιο

Έξι εβδομάδες μετά τη σπορά, τα σπορόφυτα στο στάδιο των τεσσάρων πραγματικών φύλλων μεταφυτεύθηκαν σε σάκους καλλιέργειας που περιείχαν περλίτη σε ανοιχτό υδροπονικό σύστημα. Η πειραματική καλλιέργεια εγκαταστάθηκε σε αμφικλινές πολλαπλό θερμοκήπιο συνολικής έκτασης 120 m² (10 × 12 m) καλυμμένο με φιλμ πολυαιθυλενίου και συνολικά διήρκεσε 120 ημέρες. Οι σάκοι ανάπτυξης τοποθετήθηκαν σε οκτώ διπλές σειρές σε απόσταση 3.0 m × 0.45 m μεταξύ τους. Κάθε σάκος ανάπτυξης (90 cm μήκος × 24 cm πλάτος) περιείχε 27 L περλίτη και φιλοξένησε τέσσερα φυτά ασκόλυμπρου. Μια ημέρα μετά την πλήρωση των σάκων με θρεπτικό διάλυμα, πραγματοποιήθηκαν τέσσερις οπές στο κάτω μέρος κάθε σάκου καλλιέργειας για να επιτραπεί η ελεύθερη αποστράγγιση. Τα φυτά αναπτύχθηκαν μέχρι την ολοκλήρωση της καλλιέργειας χωρίς καμία ανάγκη εφαρμογής φυτοπροστατευτικών προϊόντων. Επίσης γινόταν περιοδική καταγραφή (ανά 15 λεπτά) της θερμοκρασίας [°C], της σχετικής υγρασίας RH [%] και η ακτινοβολία στο ορατό και υπεριώδες φάσμα [Wm⁻²] καθ' όλη την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (Εικόνα 9).



Εικόνα 9. Διακύμανση της θερμοκρασίας [$^{\circ}\text{C}$], της σχετικής υγρασίας RH [%] και της ακτινοβολίας στο ορατό (Vis) και υπεριώδες (UV) φάσμα [Wm^{-2}], καθ' όλη την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, 90 ημέρες μετά τη μεταφύτευση (HMM).

3.2.2 Σύνθεση θρεπτικού διαλύματος

Για τις ανάγκες του πειράματος υπολογίστηκε θρεπτικό διάλυμα σύμφωνα με τους Savvas and Adamidis, (1999) χρησιμοποιώντας το λογισμικό NUTRISENSE (Savvas et al., 2021) (www.nutrisense.online) και παρασκευάστηκε χρησιμοποιώντας ένα αυτόματο σύστημα ανάμειξης θρεπτικών διαλυμάτων (ALAGRO IQ60, Αθήνα, Ελλάδα). Ο Πίνακας 6. παρουσιάζει τις συγκεντρώσεις μακρο-θρεπτικών και ιχνοστοιχείων. Το διάλυμα τροφοδοτήθηκε στα φυτά μέσω στάγδην άρδευσης με ένα διανεμητή ανά φυτό και ρυθμό ροής 4 L h^{-1} . Το κλάσμα διαλύματος απορροής διατηρήθηκε εντός του εύρους 0,35-0,45 μετά από κάθε γεγονός άρδευσης, προσαρμόζοντας τη συχνότητα και τη διάρκεια σύμφωνα με τις κλιματικές συνθήκες του θερμοκηπίου. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα πέντε έως επτά εφαρμογές άρδευσης την ημέρα σε κάθε πειραματική μονάδα. Για να εκτιμηθεί η επίδραση της αλατότητας του νερού άρδευσης στην ανάπτυξη των φυτών και την απόδοση βιομάζας, το επίπεδο αλατότητας στο θρεπτικό διάλυμα προσαρμόστηκε χρησιμοποιώντας NaCl σε τέσσερις συγκεντρώσεις, και πιο συγκεκριμένα 0,5, 5,0, 10,0 και 15,0 mM. Οι συγκεντρώσεις NaCl στο θρεπτικό διάλυμα αντιστοιχούσαν σε ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) ίση με 2,2, 2,8, 3,2 και 3,8 dS m^{-1} , αντίστοιχα, εκ των οποίων η πρώτη μεταχείριση αποτελούσε τον μάρτυρα. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε Σχέδιο Τυχαιοποιημένων Πλήρων Ομάδων με τέσσερις μεταχειρίσεις (συγκεντρώσεις NaCl στο θρεπτικό διάλυμα) και τέσσερις

επαναλήψεις ανά μεταχείριση ($4 \times 4 = 16$ πειραματικά τεμάχια), τυχαιοποιημένα σε τέσσερις ομάδες (blocks).

Πίνακας 6. Σύνθεση θρεπτικού διαλύματος

	Θρεπτικά	Συγκέντρωση [mmol lt⁻¹]
Μακρο-θρεπτικά	NH ₄ ⁺ -N	1,00
	K ⁺	6,38
	Ca ²⁺	4,10
	Mg ²⁺	2,28
	NO ₃ ⁻ -N	14,00
	SO ₄ ²⁻ -S	2,16
	H ₂ PO ₄ ⁻ -P	1,30
Μικρο-θρεπτικά	Fe	0,0200
	Mn	0,0100
	Zn	0,0070
	Cu	0,0008
	B	0,0250
	Mo	0,0006

3.2.3 Καταγραφή ποσοτικών παραμέτρων των φυτών

Στις 30, 60, 90 και 120 HMM (μεταξύ 07:00 και 09:00 π.μ.), μετρήθηκε ο σχετικός φθορισμός χλωροφύλλης (Fv/Fm) και η σχετική συγκέντρωση χλωροφύλλης (SPAD), σε φωτοσυνθετικά ενεργά και πλήρως αναπτυγμένα φύλλα. Ο φθορισμός χλωροφύλλης (προσαρμοσμένο στο σκοτάδι Fv/Fm) έχει αναφερθεί ως ένα χρήσιμο εργαλείο για τη σχετική εκτίμηση της μέγιστης φωτοχημικής απόδοσης του φωτοσυστήματος II και της απόκρισης αβιοτικού στρες σε ένα ευρύ φάσμα φυτικών ειδών (Baker, 2008). Η σχετική συγκέντρωση χλωροφύλλης μετρήθηκε με χλωροφυλλόμετρο SPAD-502 (Minolta, Ιαπωνία) και ο σχετικός φθορισμός χλωροφύλλης με την χρήση φθοριόμετρο OS-30p (Opti-Sciences, ΗΠΑ) (Baker and Rosenqvist, 2004) και (Jiang et al., 2017). Συνολικά πραγματοποιήθηκαν δύο συγκομιδές, στις 23 Ιανουαρίου (90 HMM) και στις 23 Φεβρουαρίου (120 HMM), αντίστοιχα. Στις 90 HMM, τα φυτά ασκόλυμπρου εμφάνισαν ιδανικά εμπορικά χαρακτηριστικά (δηλαδή, φύλλα σε σπαργή και αναπτυγμένη κονδυλώδη ρίζα), ωστόσο, στις 120 HMM, αυτά τα χαρακτηριστικά είχαν ήδη αγρονομικά υποβαθμιστεί για αυτό τον λόγο, θεωρήθηκε ότι το κρίσιμο στάδιο συγκομιδής του φυτού είναι πριν από τις 120 HMM

και πιθανώς πιο κοντά στις 90 HMM. Κατά τη συγκομιδή, ολόκληρο το φυτό εκριζώθηκε, και το υπέργειο μέρος διαχωρίστηκε από τη ρίζα. Ο συνολικός αριθμός των φυτών που εκριζώθηκαν και αξιολογήθηκαν ήταν 4 φυτά ανά πειραματικό τεμάχιο και 16 φυτά ανά μεταχείριση. Επομένως, συνολικά συλλέχθηκαν 64 φυτά σε κάθε ημερομηνία συγκομιδής (90 και 120 HMM). Αναλυτικότερα οι παράμετροι που μετρήθηκαν κατά την συγκομιδή ήταν ο αριθμός των φύλλων, το νωπό και ξηρό βάρος των φυτών [g], η διάμετρος της ροζέτας [cm], καθώς και το νωπό και ξηρό βάρος του ριζοκόνδυλου [g].

3.2.4 Προσδιορισμός ποιοτικών παραμέτρων των φυτών

Οι συγκεντρώσεις ανόργανων στοιχείων πραγματοποιήθηκε σε ξηρό φυτικό ιστό που συλλέχθηκε από ένα φυτό (ολόκληρο) από κάθε πειραματικό τεμάχιο κατά την πρώτη συγκομιδή (90 HMM). Οι ξηροί φυτικοί ιστοί των φύλλων και κονδυλόριζας αλέστηκαν χωριστά σε μύλο τύπου Willey και περάστηκαν από κόσκινο διαμέτρου 20 mm. Στη συνέχεια, λήφθηκε δείγμα 0.5 g από κάθε δείγμα ιστού για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων ολικού-N, K⁺, P, Ca²⁺ και Mg²⁺. Το άζωτο προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο Kjeldahl μετά από ανοργανοποίηση με H₂SO₄. Ο φώσφορος, το K⁺ Ca²⁺ και Mg²⁺ προσδιορίστηκαν σε υδατικό εκχύλισμα που προέκυψε από ξηρή καύση στους 400°C για 24 ώρες. Επιπλέον, προστέθηκαν 10 mL υδροχλωρικού οξέος 2 N (HCl) για την εκχύλιση της τέφρας και τα δείγματα μεταφέρθηκαν σε θερμή πλάκα στους 80°C για λίγα λεπτά. Στη συνέχεια, τα διαλύματα διηθήθηκαν και μεταφέρθηκαν σε φιάλες των 100 mL όπου προστέθηκε απεσταγμένο νερό. Οι συγκεντρώσεις των K⁺, P, Ca²⁺ και Mg²⁺ στα υδατικά διαλύματα προσδιορίστηκαν με τη χρήση οργάνου φασματομετρίας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (ICP-MS 7500cx coupled with Autosampler Series 3000, Agilent Technologies). Οι συγκεντρώσεις ιόντων χλωρίου προσδιορίστηκαν με τιτλοδότηση με AgNO₃ παρουσία K₂CrO₄ (Eaton and Ganson, 2005). Με στόχο τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης νιτρικών ιόντων στον νωπό φυτικό ιστό συλλέχθηκε νωπή μάζα (40 g) από ένα φυτό ανά πειραματικό τεμάχιο, τοποθετείται σε μείκτη (mixer) με αποσταγμένο νερό σε αναλογία 1:9, και ομογενοποιήθηκε για περίπου 1 min. Από το αιώρημα που προέκυψε λήφθηκαν 50 g, τα οποία τοποθετήθηκαν σε δοκιμαστικό σωλήνα των 120 mL. Οι δοκιμαστικοί σωλήνες τοποθετήθηκαν σε υδατόλουτρο σε θερμοκρασία 100 °C για 60 min. Στην συνέχεια, σε κάθε δείγμα προστέθηκε 1 mL διαλύματος K₄Fe(CN)₆*3H₂O (περιεκτικότητας 15%) και 1 mL διαλύματος ZnSO₄*7H₂O περιεκτικότητας 30%. Τέλος, όλα τα δείγματα διηθήθηκαν μέσω αναδιπλούμενου διηθητικού χαρτιού No 595 ½, διαμέτρου 150 mm. Το NO₃-N προσδιορίστηκε χρωματομετρικά στα 540 nm σύμφωνα με την μέθοδο του καδμίου (Vogtmann et al., 1984). Παράλληλα, στο κλάσμα απορροής πραγματοποιήθηκε μέτρηση της ηλεκτρική

αγωγιμότητα (dS m^{-1}) και του pH, τρεις φορές την εβδομάδα, σε κάθε ξεχωριστή πειραματική μονάδα χρησιμοποιώντας ψηφιακό μετρητή pH/EC HI 8621 (Hanna Instruments, USA).

Για τον προσδιορισμό των ολικών φαινολικών, φλαβονοειδών και αντιοξειδωτικών ουσιών λήφθηκαν 5 g νωπού φυτικού ιστού (φύλλα και ρίζα) και του κεντρικού νεύρου των φύλλων (3 φυτά ανά επανάληψη). Ο νωπός ιστός (5 g) ομογενοποιήθηκε και στην συνέχεια λήφθηκε 1 g ιστού το οποίο εκχυλίστηκε με 10 mL μεθανόλης 80% (ανακίνηση σε μηχανικό αναδευτήρα στους 4°C στο σκοτάδι). Εν συνεχεία, τα εκχυλίσματα διηθήθηκαν με φίλτρα σύριγγας των 0,45 mm (Puradisk, Whatman) και διατηρήθηκαν στους -18°C μέχρι την ανάλυσή τους. Η συνολική περιεκτικότητα σε φαινολικά συστατικά προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Folin-Ciocalteu (Singleton et al., 1999). Εν συντομία, 50 μL του δείγματος αναμείχθηκαν με 2 mL Na_2CO_3 (2% w/v) και, μετά από 2 λεπτά, προστέθηκαν 0,1 mL αντιδραστηρίου Folin-Ciocalteu. Το μίγμα παρέμεινε στο σκοτάδι για 30 λεπτά και η απορρόφηση προσδιορίστηκε στα 765 nm χρησιμοποιώντας απιονισμένο νερό ως μάρτυρα. Η συγκέντρωση της συνολικής περιεκτικότητας σε φαινολικά εκτιμήθηκε με καμπύλη βαθμονόμησης που υπολογίστηκε σύμφωνα με γνωστές συγκεντρώσεις γαλλικού οξέος (0,05 - 0,50 mM). Τα αποτελέσματα εκφράστηκαν σε $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ νωπού βάρους (FW) ισοδύναμου γαλλικού οξέος (GAE) (Lamuella-ravents, 1999). Η συνολική περιεκτικότητα σε φλαβονοειδή προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας χρωματομετρική μέθοδο (aluminum chloride colorimetric method), όπως περιγράφεται από τους (Pekal and Pyrzyńska, 2014). Εν συντομία, 1 mL του δείγματος αναμείχθηκε με 0,3 mL NaNO_2 (5% w/v) και μετά από 5 λεπτά προστέθηκαν 0,5 mL AlCl_3 (2% w/v). Μετά από 6 λεπτά, το μίγμα εξουδετερώθηκε με 0,5 mL διαλύματος NaOH 1 M και αφέθηκε για 10 λεπτά σε θερμοκρασία δωματίου. Η απορρόφηση των δειγμάτων προσδιορίστηκε στα 510 nm χρησιμοποιώντας νερό ως μάρτυρα. Η συγκέντρωση της συνολικής περιεκτικότητας σε φλαβονοειδή υπολογίστηκε με χρήση καμπύλης βαθμονόμησης, που παρασκευάστηκε απεικονίζοντας γραφικά γνωστές συγκεντρώσεις διαλύματος κατεχίνης (0,05 - 0,50 mM). Τα αποτελέσματα εκφράστηκαν σε $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ FW σε ισοδύναμα κατεχίνης (CE).

Για το προσδιορισμό της ολικής αντιοξειδωτικής ικανότητας, χρησιμοποιήθηκε η φασματομετρική μέθοδος DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl). Πιο συγκεκριμένα, ένα δείγμα (25 μL) αραιωμένου δείγματος αναμείχθηκαν με 975 μL διαλύματος DPPH (60 μM σε μεθανόλη). Το μείγμα αφού αναδευτήκε καλά παρέμεινε σε σκοτάδι για 30 λεπτά έως ότου μετρηθεί η απορρόφησή τους από φασματοφωτόμετρο στα 517 nm. Αντίστοιχα, χρησιμοποιήθηκε δείγμα ως μάρτυρας αποτελούμενο από 25 μL αραιωμένου δείγματος και 975 μL μεθανόλης. Η συνολική αντιοξειδωτική δράση υπολογίστηκε από καμπύλη βαθμονόμησης, που καταρτίστηκε από γνωστές

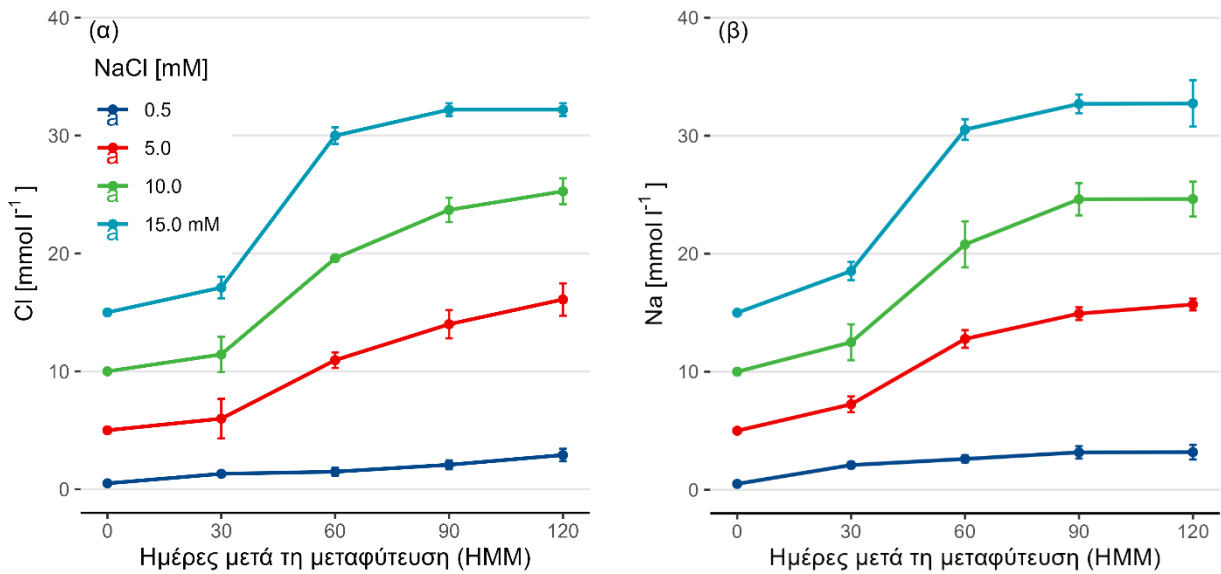
συγκεντρώσεις διαλύματος Trolox στα 515 nm ($R^2 = 0,999$). Τα αποτελέσματα εκφράστηκαν σε $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ νωπής μάζας, αντίστοιχης αντιοξειδωτικής ικανότητας του Trolox (TEAC).

3.2.5 Στατιστική ανάλυση

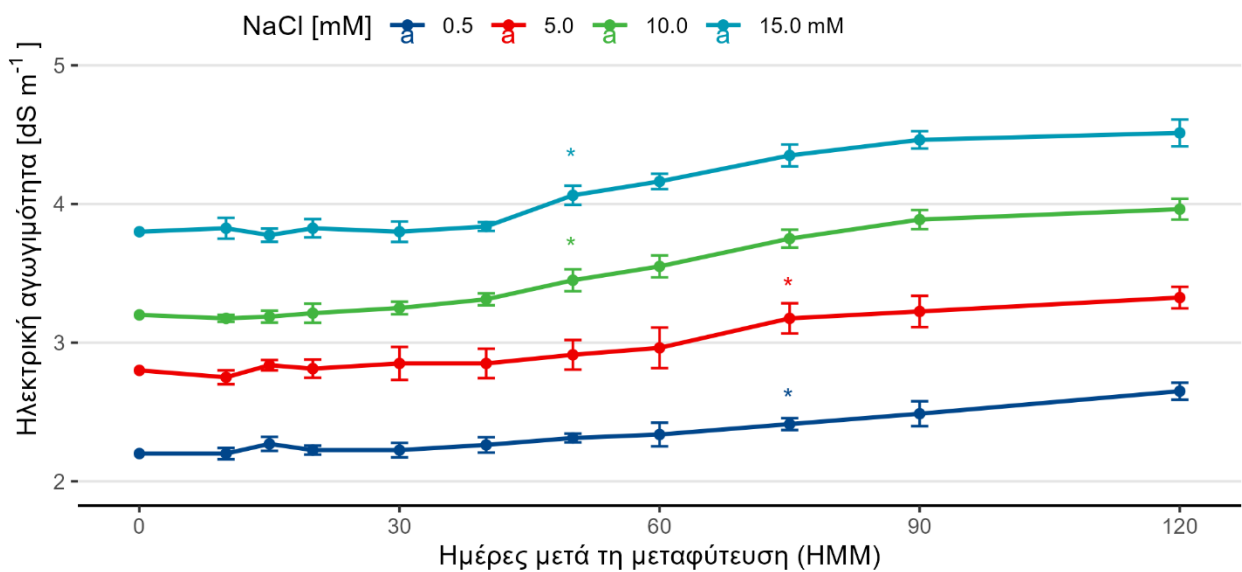
Πραγματοποιήθηκε μονόδρομη ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για την αξιολόγηση της επίδραση των μεταχειρίσεων στις συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων και στα αγρονομικά χαρακτηριστικά των φύλλων και της εδώδιμης ρίζας. Όταν η ANOVA παρουσίασε σημαντική επίδραση των μεταχειρίσεων αλατότητας σε μια συγκεκριμένη παράμετρο, χρησιμοποιήθηκε η δοκιμή πολλαπλού εύρους Duncan για τον εντοπισμό σημαντικών διαφορών μεταξύ της των επεμβάσεων. Επίσης, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της κανονικότητας και ομοιογένειας της διασποράς των τιμών για κάθε στατιστική δοκιμή που εφαρμόστηκε (Shapiro-Wilk, και Levene test, αντίστοιχα). Για να απορρίψουμε τη μηδενική υπόθεση, επιλέχθηκε το όριο 0,05. Η στατιστική ανάλυση έγινε χρησιμοποιώντας το στατιστικό πακέτο της R (R Foundation, 2020).

3.3 Αποτελέσματα

Οι συγκεντρώσεις Na^+ στο διάλυμα απορροής παρέμειναν κάτω από $1,3 \pm 0,37$, $6,13 \pm 0,58$, $11,25 \pm 0,88$, και $16,77 \pm 0,86 \text{ mmol L}^{-1}$ έως τις 30 HMM. Ομοίως, τα επίπεδα του Cl^- ήταν $0,9 \pm 0,18$, $5,49 \pm 0,78$, $10,72 \pm 0,75$, και $16,05 \pm 0,6 \text{ mmol L}^{-1}$ για τις συγκεντρώσεις 0,5, 5,0, 10,0 και 15,0 mM NaCl, αντίστοιχα. Ωστόσο, στις 90 και 120 HMM, οι συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- αυξήθηκαν σημαντικά και στις 3 μεταχειρίσεις αλατότητας του πειράματος. Ως εκ τούτου, στις 120 HMM, οι συγκεντρώσεις Na^+ στο κλάσμα απορροής ήταν $15,7 \pm 0,49$, $24,63 \pm 1,47$ και $32,74 \pm 1,96 \text{ mM}$, ενώ η συγκέντρωση του Cl^- ήταν $16,10 \pm 1,37$, $25,27 \pm 1,10$ και $32,20 \pm 0,54 \text{ mM}$ για τις τρεις μεταχειρίσεις 5,0, 10,0 και 15,0 mM NaCl, αντίστοιχα. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του κλάσματος απορροής στον μάρτυρα (0,5 mM NaCl) αυξήθηκε από $2,20 \text{ dS m}^{-1}$ σε $2,65 \pm 0,06 \text{ dS m}^{-1}$, ενώ στις τρεις μεταχειρίσεις αλατότητας (5,0, 10,0 και 15,0 mM) η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξήθηκε από 2,80 στο $3,33 \pm 0,08$, από 3,20 στο $3,96 \pm 0,07$ και από 3,80 dS m^{-1} στο $4,51 \pm 0,10 \text{ dS m}^{-1}$, αντίστοιχα. Στο Εικόνα 10, οι αστερίσκοι υποδηλώνουν την ακριβή ημέρα μετά την μεταφύτευση όπου παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική αύξηση της ηλεκτρική αγωγιμότητας (EC) στο διάλυμα απορροής. Για τον μάρτυρα και την μεταχείριση των 5,0 mM NaCl αυτή η διαφορά παρατηρήθηκε στις 75 HMM, ενώ στις επεμβάσεις των 10,0 και 15,0 mM NaCl σημαντική αύξηση παρατηρήθηκε σχετικά νωρίτερα δηλαδή στις 50 HMM.



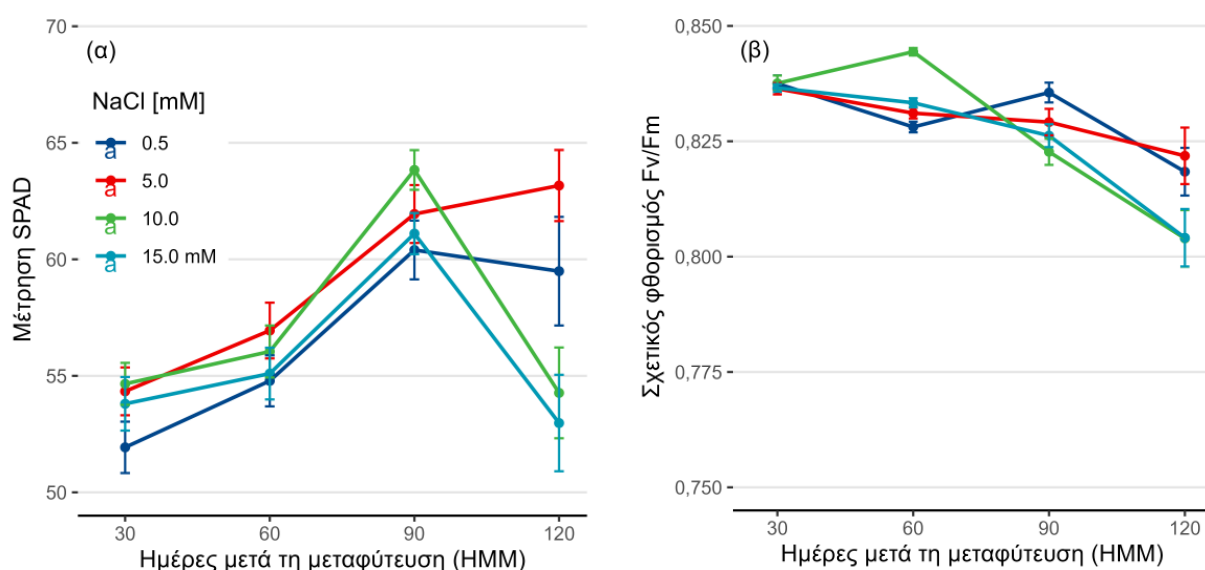
Εικόνα 10. Συγκεντρώσεις Na⁺ [mmol L⁻¹] (α) και Cl⁻ [mmol L⁻¹] (β) στο διάλυμα απορροής στις 30, 60, 90 και 120 ημέρες μετά την μεταφύτευση (HMM). Οι κάθετες γραμμές σφάλματος υποδεικνύουν το τυπικό σφάλμα και τα χρώματα τις διαφορετικές επεμβάσεις.



Εικόνα 11. Καμπύλη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) του κλάσματος απορροής από την έναρξη του πειράματος (0 HMM) έως την συγκομιδή (90 και 120 HMM). Οι γραμμές σφάλματος υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα και τα διαφορετικά χρώματα τις μεταχειρίσεις του πειράματος. Οι αστερίσκοι (*) υποδηλώνουν στατιστικά σημαντική αύξηση της αγωγιμότητας συγκρίνοντας τις μετρήσεις της ίδιας μεταχείρισης κατά την πάροδο του χρόνου.

Οι μεταχειρίσεις αλατότητας του πειράματος δεν επηρέασαν σημαντικά τις μετρήσεις της σχετικής περιεκτικότητας χλωροφύλλης των φύλλων (SPAD, Εικόνα 11) και του σχετικού φθορισμού χλωροφύλλης (Fv/Fm, Εικόνα 12) μέχρι τις 90 HMM. Ωστόσο, στις 120 HMM, οι διαφορές των τιμών SPAD και Fv/Fm μεταξύ των μεταχειρίσεων παρουσιάστηκαν σημαντικές σε επίπεδο

σημαντικότητας 5%. Συνεπώς, 120 HMM, ο δείκτης SPAD στις επεμβάσεις των 0,5 και 5,0 mM NaCl στο τροφοδοτούμενο θρεπτικό διάλυμα ήταν κατά μέσο όρο 59,49 και 65,16, αντίστοιχα, ενώ τις επεμβάσεις 10,0 και 15,0 mM NaCl ήταν κατά μέσο όρο 54,27 και 50,77, αντίστοιχα (Εικόνα 12). Κατά την ίδια ημερομηνία (120 HMM), ο σχετικός φθορισμός χλωροφύλλης (Fv/Fm) στις επεμβάσεις 0,5 και 5,0 mM NaCl ήταν κατά μέσο όρο 0,789 και 0,809, αντίστοιχα, και ήταν σημαντικά αυξημένος σε σχέση με τις επεμβάσεις των 10,0 και 15,0 mM NaCl, οι οποίες κατά μέσο όρο ήταν 0,774 και 0,767, αντίστοιχα (Εικόνα 12).



Εικόνα 12. Μετρήσεις σχετικής πυκνότητας χλωροφύλλης SPAD (α) και σχετικού φθορισμού χλωροφύλλης (Fv/Fm) (β) στις 30, 60, 90 και 120 HMM σε όλες τις μεταχειρίσεις. Οι κάθετες μπάρες υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα και τα διαφορετικά χρώματα τις μεταχειρίσεις του πειράματος.

Η αύξηση του NaCl έως το 15,0 mM στο θρεπτικό διάλυμα δεν επηρέασε σημαντικά τον αριθμό των φύλλων, το νωπό και ξηρό βάρος των φύλλων και των ριζών, 90 HMM (Πίνακας 7). Ωστόσο, 120 HMM, το υψηλό επίπεδο αλατότητας (15,0 mM NaCl) μείωσε σημαντικά το νωπό και ξηρό βάρος των φύλλων και του ριζοκόνδυλου σε σχέση με το χαμηλό επίπεδο αλατότητας (5,0 mM NaCl), ενώ σε σύγκριση με τον μάρτυρα (0,5 mM NaCl), το υψηλότερο επίπεδο αλατότητας (15,0 mM) μείωσε μόνο τα νωπό και ξηρό βάρος της ρίζας αλλά όχι των φύλλων. Επίσης, οι τιμές του νωπού βάρους των φύλλων και του νωπού και ξηρού βάρους της ρίζας στην μεταχείριση αλατότητας των 10,0 mM, κυμάνθηκαν μεταξύ των αντίστοιχων τιμών των επεμβάσεων 5,0 και 15,0 mM, χωρίς να διαπιστωθούν σημαντικές διαφορές σε καμία από αυτές τις μεταχειρίσεις, αντιθέτως, το ξηρό βάρος της ρίζας παρουσιάστηκε σημαντικά υψηλότερο στα 5,0 mM NaCl σε σύγκριση με τα 10,0 mM NaCl.

Πίνακας 7. Επίδραση των μεταχειρίσεων στα ποσοτικά χαρακτηριστικά του φυτού, αριθμό φύλλων (N_L), νωπό βάρος φύλλων (WF_L), νωπό βάρος κονδυλόριζας (WDR), ξηρό βάρος φύλλων (WD_R), ξηρό βάρος κονδυλόριζας (WD_L), 90 και 120 ημέρες μετά τη μεταφύτευση (HMM)

	NaCl [mM]	N_L	WF_L [g plant ⁻¹]	WF_R [g plant ⁻¹]	WD_L [g plant ⁻¹]	WDR [g]
90 HMM	0.5	28.44 a	298.38 a	72.76 a	25.91 a	9.03 a
	5.0	24.94 a	344.81 a	85.95 a	30.48 a	10.76 a
	10.0	24.56 a	326.98 a	86.64 a	28.25 a	10.59 a
	15.0	25.75 a	289.08 a	80.53 a	24.66 a	9.84 a
Επίπεδο σημαντικότητας		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
120 HMM	0.5	18.06 a	217,83 ab	146,44 ab	25.79 ab	14.89 a
	5.0	21.88 a	245,97 a	153.47 a	29.55 a	14.99 a
	10.0	17.94 a	189,64 ab	118.68 bc	25.07 ab	11.26 ab
	15.0	18.44 a	161,43 b	97,53 c	22.41 b	9.86 b
Επίπεδο σημαντικότητας		n.s.	*	*	*	*

Κανένα από τα επίπεδα αλατότητας που εφαρμόστηκαν στο πείραμα δεν φάνηκε να επηρεάζει σημαντικά τις συγκεντρώσεις των K^+ , Ca^{2+} και ολικού-P στα φύλλα, ωστόσο, τα επίπεδα 10,0 και 15,0 mM NaCl μείωσαν σημαντικά τις συγκεντρώσεις ολικού-N ($33,70 \pm 1,11$ και $3,23 \pm 0,66$ g kg⁻¹, αντίστοιχα) και NO_3^- -N ($32,86 \pm 1,26$ και $2,69 \pm 0,26$ g kg⁻¹, αντίστοιχα) στα φύλλα, 90 HMM (

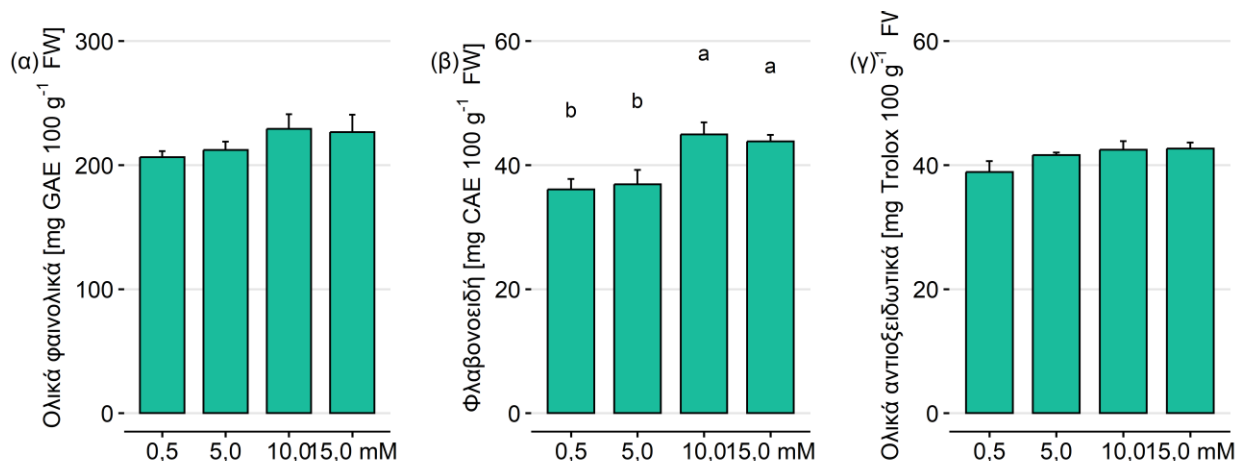
Πίνακας 8). Οι συγκεντρώσεις Na^+ στα φύλλα αυξήθηκαν σημαντικά στις τρεις μεταχειρίσεις αλατότητας ($13,60 \pm 2,78$, $13,80 \pm 1,17$ και $17,15 \pm 3,23$ g kg⁻¹) σε σύγκριση με τον μάρτυρα ($6,23 \pm 2,18$ g kg⁻¹). Ομοίως, τα επίπεδα αλατότητας 10,0 και 15,0 mM αύξησαν τη συσσώρευση Cl^- στα φύλλα ($6,58 \pm 1,21$ και $9,33 \pm 3,28$ g kg⁻¹, αντίστοιχα). Αντίστοιχα, η αλατότητα δεν είχε σημαντική επίδραση στις συγκεντρώσεις των Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} , ολικού-N και NO_3^- -N στις ρίζες. Αντιθέτως, η μεταχείριση των 15,0 mM NaCl αύξησε σημαντικά την συγκέντρωση ολικού φωσφόρου στην ρίζα ($9,10 \pm 2,92$ g kg⁻¹), ενώ η συγκέντρωση K^+ μειώθηκε σημαντικά στις μεταχειρίσεις των 5,0, 10,0 και 15,0 mM NaCl ($17,08 \pm 3,83$, $16,18 \pm 2,34$ και $16,83 \pm 2,82$ g kg⁻¹, αντίστοιχα) σε σύγκριση με τον μάρτυρα ($22,85 \pm 2,46$ g kg⁻¹), 90 HMM.

Πίνακας 8. Συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων του ασκόλυμπρου σε φύλλα (L) και ρίζα (R) για τα 4 επίπεδα αλατότητας, 90 ημέρες μετά την μεταφύτευση (HMM). Διαφορετικά μικρά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά

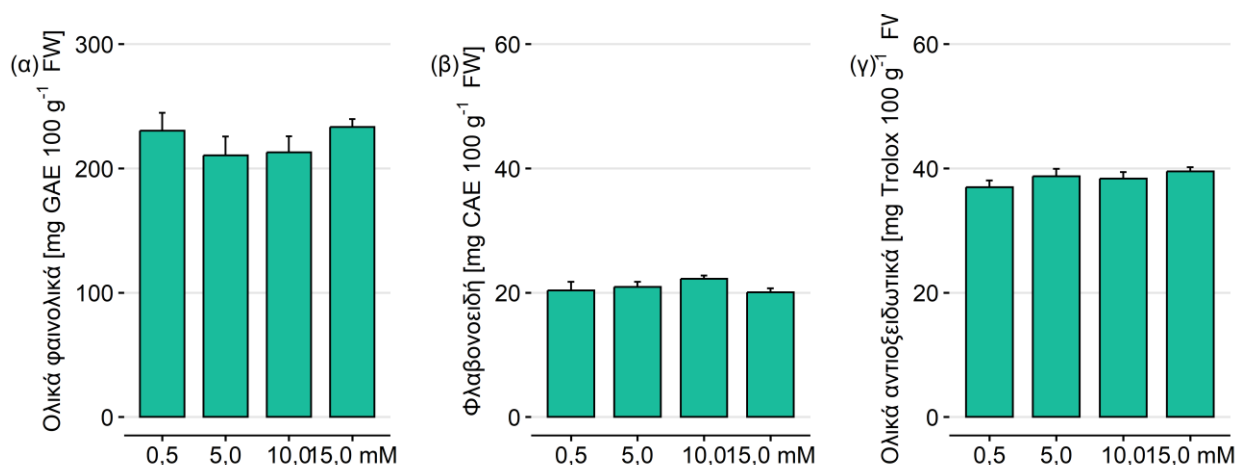
σημαντικές διαφορές σε επίπεδο σημαντικότητας 5%.

Παράμετρος	Τμήμα	NaCl [mM]			
		0,5	5,0	10,0	15,0
Na [g kg ⁻¹]	L	6,23 b	13,60 a	13,80 a	17,15 a
	R	21,56 a	18,90 a	18,08 a	19,60 a
Cl [g kg ⁻¹]	L	3,88 b	6,10 ab	6,58 ab	9,33 a
	R	1,78 a	2,50 a	2,38 a	2,23 a
Mg [g kg ⁻¹]	L	4,43 a	4,38 a	3,90 a	3,83 a
	R	1,53 a	1,43 a	1,35 a	1,28 a
K [g kg ⁻¹]	L	103,88 a	102,93 a	97,18 a	93,83 a
	R	22,85 a	17,08 b	16,18 b	16,83 b
Ca [g kg ⁻¹]	L	10,83 a	9,95 a	9,38 a	8,75 a
	R	3,50 a	2,85 a	3,38 a	2,93 a
P [g kg ⁻¹]	L	4,30 a	5,13 a	5,58 a	5,03 a
	R	4,88 b	4,60 b	5,83 ab	9,10 a
Organic N [g kg ⁻¹]	L	36,73 a	34,93 ab	33,70 bc	32,86 c
	R	32,80 a	28,60 a	27,60 a	27,62 a
Nitrate [g kg ⁻¹ FW]	L	3,50 ab	3,75 a	3,23 ab	2,69 b
	R	2,30 a	2,42 a	2,17 a	1,75 a

Η συγκέντρωση των ολικών αντιοξειδωτικών και φαινολικών ουσιών στα φύλλα και την ρίζα δεν επηρεάστηκαν από τα επίπεδα αλατότητας που εφαρμόστηκαν. Ωστόσο, η αύξηση του επιπέδου NaCl στο θρεπτικό διάλυμα (10,0 και 15,0 mM NaCl) αύξησε σημαντικά τη συνολική περιεκτικότητα σε φλαβονοειδή στο κεντρικό νεύρο των φύλλων-βρώσιμο μέρος (κατά $44,95 \pm 1,95$ και $40,43 \pm 1,31$ mg CAE 100 g⁻¹ νωπής μάζας, αντίστοιχα) σε σύγκριση με τα 5,0 και 0,5 mM NaCl. Επιπλέον, τα επίπεδα αλατότητας που εξετάστηκαν δεν φάνηκε να επιδρούν σημαντικά στη συνολική συγκέντρωση φλαβονοειδών στην ρίζα σε σύγκριση με τον μάρτυρα ($20,35 \pm 1,4$ mg CAE 100 g⁻¹ νωπής μάζας), 90 HMM. Τέλος, ενώ η συγκέντρωση ολικών φαινολικών και ολικών αντιοξειδωτικών στα φύλλα και τις ρίζες ήταν αντίστοιχη, τα ολικά φλαβονοειδή ήταν σχετικά πιο αυξημένα στα φύλλα, σε σχέση με την ρίζα (Εικόνα 13), το οποίο δικαιολογεί την ευρύτερη κατανάλωση φύλλων που είναι πιο εύγευστα σε νεανικό στάδιο (π.χ., 90 HMM).



Εικόνα 13. (α) Ολικά φαινολικά [mg GAE 100 g⁻¹ FW], (β) φλαβονοειδή [mg CAE 100 g⁻¹ FW], και ολικά αντιοξειδωτικά [mg Trolox 100 g⁻¹ FW] στα φύλλα. Οι κάθετες μπάρες υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα και τα διαφορετικά γράμματα σημαντικές διαφορές σύμφωνα με την δοκιμή Duncan σε επίπεδο σημαντικότητας $p \leq 0.05$.



Εικόνα 14. (α) Ολικά φαινολικά [mg GAE 100 g⁻¹ FW], (β) φλαβονοειδή [mg CAE 100 g⁻¹ FW], και ολικά αντιοξειδωτικά [mg Trolox 100 g⁻¹ FW] στη ρίζα. Οι κάθετες μπάρες υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα και τα διαφορετικά γράμματα σημαντικές διαφορές σύμφωνα με την δοκιμή Duncan σε επίπεδο σημαντικότητας $p \leq 0.05$.

3.4 Συζήτηση

Ο ασκόλυμπος φάνηκε να είναι ανθεκτικός σε μέτρια επίπεδα αλατότητας, καθώς τόσο το νωπό όσο και το ξηρό βάρος του κεντρικού νεύρου των φύλλων και του ριζοκόνδυλου δεν περιορίστηκαν από τις συγκεντρώσεις NaCl στο διάλυμα τροφοδοσίας έως και τα 15,0 mM NaCl στο θρεπτικό διάλυμα (EC: 4,51 dS m⁻¹ στη ζώνη ρίζας), σε σύγκριση το θρεπτικό διάλυμα χαμηλής συγκέντρωσης NaCl-μάρτυρας (0,5 mM NaCl). Ωστόσο, το πιο ενδιαφέρον εύρημα είναι ότι στις 120 HMM, το νωπό και ξηρό βάρος ήταν υψηλότερα κατά 11,4% και 12,7% στα φύλλα και 4,6% και 0,7% στη ρίζα, στην μεταχείριση αλατότητας των 5,0 mM NaCl, σε σύγκριση με τον μάρτυρα

(0,5 mM NaCl). Αυτή η αύξηση του νωπού και ξηρού βάρους, αν και ασήμαντη, οδήγησε στη σημαντική μείωση του νωπού και ξηρού βάρους στα φύλλα και τη ρίζα όταν τα φυτά εκτέθηκαν στα 15,0 mM NaCl σε σύγκριση με 5,0 mM NaCl. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα υποδεικνύει ότι μια μικρή αύξηση της συγκέντρωσης Na^+ και/ή Cl^- της τάξης των 5,0 mM στην ριζόσφαιρα είναι ευεργετική για τον ασκόλυμτρο.

Συγκεντρώσεις NaCl στο θρεπτικό διάλυμα, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, φάνηκε να επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση καλλιεργειών με χαμηλή ανθεκτικότητα στην αλατότητα. Για παράδειγμα, οι (Gas et al., 2005) έδειξαν ότι το μαρούλι (*Lactuca sativa* L., Asteraceae, var. longifolia) είναι ευαίσθητο σε υψηλά αλλά και μέτρια επίπεδα αλατότητας, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση στο νωπό αλλά όχι και στο ξηρό βάρος των φύλλων και της ρίζας. Επίσης, οι (Carillo et al., 2020) εξέτασαν την επίδραση τεσσάρων επιπέδων αλατότητας (1, 10, 20 και 30 mM NaCl) σε πράσινο και κόκκινο μαρούλι (*Lactuca sativa* L. var. acerphala) σε επιπέδουσα υδροπονία, και σύμφωνα με τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της νωπής και ξηρής βιομάζας σε όλες τις επεμβάσεις αλατότητας (10, 20, 30 mM NaCl) σε σύγκριση με τον μάρτυρα (1 mM NaCl), 47 ημέρες μετά τη σπορά.

Αντίστοιχα, πρόσφατες ερευνητικά δεδομένα παρουσιάζουν την επίδραση των επιπέδων μέτριας αλατότητας στα αγρονομικά χαρακτηριστικά φυτών που αναπτύσσουν κονδυλόριζα, παρόμοιων με το *S. hispanicus*. Για παράδειγμα, οι (Petrooulos et al., 2009) αναφέρουν ότι τα μέτρια επίπεδα NaCl του νερού άρδευσης (1,5, 3,0 και 4,5 dS m^{-1}) μείωσαν σημαντικά το νωπό βάρος των φύλλων του πετροσέλινου (*Petroselinum crispum*, Mill.) σε σύγκριση με τον μάρτυρα (0,5 dS m^{-1}), αλλά ο αριθμός των φύλλων και το νωπό βάρος της ρίζας δεν φάνηκε να επηρεάζονται σημαντικά, 98 ημέρες μετά την έναρξη των επεμβάσεων. Αντίστοιχα, οι (Dias et al., 2016) αξιολόγησαν την επίδραση μέτριου (3,9 dS m^{-1}) και υψηλού επιπέδου αλατότητας (6,6, 9,3 και 12,0 dS m^{-1}) στην ανάπτυξη, την συγκέντρωση ανόργανων θρεπτικών στοιχείων και την απόδοση της πασσαλώδους ρίζας του φυτού *Helianthus tuberosus* L. (Asteraceae). Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι, στις 128 HMM, η μέτρια αλατότητα δεν είχε καμία επίδραση στο ύψος, τα φύλλα, το στέλεχος και το νωπό βάρος των ριζών, ενώ το υψηλό επίπεδο αλατότητας (9 dS m^{-1}) στο νερό άρδευσης μείωσε σημαντικά την απόδοση των φύλλων και ριζών σε σύγκριση με τον μάρτυρα (1,2 dS m^{-1}).

Συχνά αναφέρονται διάφορες διαταραχές των φυσιολογικών και μορφολογικών παραμέτρων των φυτών που προκαλούνται από την υπερβολική συγκέντρωση NaCl στο νερό άρδευσης. Αντίστοιχα, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας διαπιστώνεται η σημαντική μείωση του σχετικού φθορισμού χλωροφύλλης των φύλλων (Fv/Fm) και της σχετικής συγκέντρωσης χλωροφύλλης

(SPAD) σε επίπεδα αλατότητας 10,0 και 15,0 mM σε σύγκριση με τον μάρτυρα (0,5 mM) και τα 5,0 mM NaCl στις 120 HMM. Παρόμοια δεδομένα έχουν αναφερθεί και από άλλες αντίστοιχες εργασίες σε πολλά είδη κηπευτικών φυτών. Ως εκ τούτου, οι (Carillo et al., 2020) αναφέρουν σημαντική μείωση στη συγκέντρωση χλωροφύλλης στο μαρούλι (*Lactuca sativa* L. var. *acephala*) σε μέτρια επίπεδα αλατότητας (10,0 και 20,0 mM NaCl), 47 ημέρες μετά τη σπορά. Αντιθέτως, οι (Adhikari et al., 2019), διαπίστωσαν ότι η αλατότητα αύξησε τον δείκτη σχετικής πυκνότητας χλωροφύλλης (SPAD) κατά 4-26% σε ανθεκτικούς γονότυπους στο αλάτι και 5-14% στις ευαίσθητες ποικιλίες μαρουλιού, 28 HMM. Επιπλέον, οι (Shin et al., 2020) εξέτασε τη φυσιολογική απόκριση φυτών μαρουλιού (*Lactuca sativa* L.) τα οποία αναπτύχθηκαν σε διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl (0, 50, 100, 200, 300 και 400 mM) στο θρεπτικό διάλυμα και αναφέρει σημαντική μείωση της μέγιστης λειτουργικής φωτοχημικής ικανότητας (Fv/Fm) στο επίπεδο αλατότητας 400 mM σε σύγκριση με την μεταχείριση που δεν είχε επιβαρυνθεί με NaCl (μάρτυρας), 6 ημέρες μετά την έναρξη των επεμβάσεων. Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές, αυτή η μείωση της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αφομοίωσης του φωτοσυνθετικού άνθρακα και κατά συνέπεια τη μείωση των φωτοσυνθετικών προϊόντων και τον καταμερισμό τους (π.χ. πρωτεΐνες και υδατάνθρακες) κατά τη διαδικασία κονδυλοποίησης του φυτού (Dahal et al., 2019). Η θεωρία αυτή μπορεί να εξηγήσει τη μείωση του νωπού και ξηρού βάρους της ρίζας [g φυτού⁻¹] του *Scolymus hispanicus* L. σε επίπεδο αλατότητας 10,0 και 15,0 mM, σε σύγκριση με τα 5,0 mM NaCl.

Συχνά η αλατότητα έχει ως συνέπεια την ιοντική ανισορροπία, η οποία μεταβάλλει την συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων των φυτών. Οι μεταχειρίσεις μέτριας αλατότητας προκάλεσαν σημαντική αύξηση στις συγκεντρώσεις νατρίου και χλωρίου στα φύλλα αλλά όχι στην κονδυλώδη ρίζα του *S. hispanicus* σε σύγκριση με τον μάρτυρα, 90 HMM. Πολλά γλυκοαλόφυτα (glycohalophytes), υπό συνθήκες αλατότητας, συσσωρεύουν υψηλά επίπεδα ιόντων νατρίου και χλωρίου στο κυτταρόπλασμα για να διατηρήσουν την ικανότητα πρόσληψης νερού από το ριζικό σύστημα (Volkmar et al., 1998). Η μέτρια συγκέντρωση Na⁺ πολλές φορές είναι ευεργετική για ορισμένα φυτικά είδη ανθεκτικά στο αλάτι, καθώς μπορούν να διεγείρουν την ανάπτυξη όταν η διαθεσιμότητα K⁺ δεν είναι επαρκής (Wu et al., 2018). Επιπλέον, μικρές ποσότητες νατρίου μπορεί να συμβάλλουν στην ωσμωρύθμιση εντός των φυτικών ιστών, αν και η περίσσεια νατρίου μπορεί να γίνει τοξική για τα φυτά (Munns and Tester, 2008). Σε συμφωνία με την προηγούμενη αναφορά, η σημαντική μείωση του σχετικού φθορισμού της χλωροφύλλης των φύλλων (Fv/Fm) στην μεταχείριση με την υψηλότερη αλατότητα (15 mM NaCl) πιθανώς υποδηλώνει ότι συγκέντρωση Na⁺ στα 13,80 g kg⁻¹ ξηρού ιστού των φύλλων του *S. hispanicus* (Πίνακας 7) είναι το ειδικό όριο

εμφάνισης τοξικότητας- Na^+ για αυτό το είδος φυτού. Ομοίως, οι (Carillo et al., 2020) αναφέρουν σημαντική συσσώρευση Na^+ στα φύλλα δύο ποικιλιών μαρουλιού (*Lactuca sativa* L. var. acephala) αλλά χωρίς να παρατηρηθεί κάποια ειδική τοξικότητα νατρίου, 47 ημέρες μετά την φύτευση, σε αντίθεση με τις παρατηρήσεις μας όπου οι μεταχειρίσεις αλατότητας φαίνεται να προκαλούν περιφερειακά καψίματα στις άκρες των φύλλων του *Scolymus hispanicus* L. (Εικόνα 15). Επιπλέον, οι (Borgognone et al., 2014) διερεύνησαν την επίδραση της συγκέντρωσης NaCl στο θρεπτικό διάλυμα για την παραγωγή βιομάζας και τη συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων της αγριαγκινάρας (*C. cardunculus* L. var. altilis) και της αγκινάρας (*C. cardunculus* L. subsp. scolymus) σε σύστημα επιπέδου υδροπονίας. Σύμφωνα με την ανάλυσή τους, παρουσιάστηκε σημαντική αύξηση στην πρόσληψη νατρίου σε σύγκριση με τον μάρτυρα (82 ημέρες μετά τη σπορά) με αποτέλεσμα την συνολική μείωση του βάρους των φύλλων. Παρόλο που αυτά, τα ευρήματα σχετίζονταν με την έντονη μείωση της πρόσληψης Ca^{2+} , ως συνέπεια του ιοντικού ανταγωνισμού, τα αποτελέσματά μας δεν υποστηρίζουν την ίδια υπόθεση εφόσον η συγκέντρωση ασβεστίου στα φύλλα (mM) δεν μειώθηκε σημαντικά σε καμία από τις μεταχειρίσεις μέτριας αλατότητας.

Αντίστοιχες συνέπειες έχει η αλατότητα στην πρόσληψη καλίου καθώς το Na^+ ανταγωνίζεται το K^+ (λόγω των παρόμοιων φυσικοχημικών ιδιοτήτων τους) σε βασικές μεταβολικές διεργασίες στο κυτταρόπλασμα, όπως ενζυματικές αντιδράσεις, την σύνθεση πρωτεϊνών και τις λειτουργίες του ριβοσώματος (Botella et al., 1997). Επιπλέον, όταν θετικά φορτισμένο Na^+ διασχίζει την πλασματική μεμβράνη, παρατηρείται σημαντική εκπόλωση της μεμβράνης και αυτή η εκπόλωση καθιστά την παθητική πρόσληψη K^+ θερμοδυναμικά αδύνατη. Τέλος, η σύνθεση διαλυμένων ουσιών, που αξιοποιούνται για την ωσμωπροστασία του φυτού υπό συνθήκες αλατούχου στρες, μειώνει σημαντικά τη διαθέσιμη ενέργεια υπό μορφή ATP, καθιστώντας ακόμη πιο δύσκολη την πρόσληψη του K^+ (Shabala and Cuin, 2008). Σε συμφωνία με αυτή τη διαπίστωση αυτή, όλες οι μεταχειρίσεις άνω του 0,5 mM NaCl αύξησαν τη συγκέντρωση Na^+ στα φύλλα και μείωσαν σημαντικά τη συγκέντρωση K^+ στις κονδυλόριζες όχι όμως και στα φύλλα του *S. hispanicus*. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρουν οι (Inal et al., 2009), οι οποίοι παρουσίασαν σημαντική μείωση της συγκέντρωσης K^+ στους βλαστούς και στο ριζοκόνδυλο του καρότου στις επεμβάσεις όπου είχαν εκτεθεί σε αλατότητα γλωριούχου νατρίου (180 HMM).

Η συγκέντρωση φωσφόρου αυξήθηκε σημαντικά στην κονδυλώδη ρίζα του ασκόλυμπρου στο υψηλότερο επίπεδο αλατότητας (15,0 mM NaCl), αλλά αυτή η διαφορά δεν ήταν ανάλογη της συγκέντρωσης φωσφόρου στα φύλλα του φυτού. Παρόλο που, σε καλλιέργειες εκτός εδάφους, η αλατότητα έχει αναφερθεί ότι μειώνει τις συγκεντρώσεις φωσφόρου στους φυτικούς ιστούς, αυτά τα αποτελέσματα έχουν αποδοθεί στην μειωμένη διαλυτότητα του φωσφόρου στην εδαφική μήτρα

(Sharpley et al., 1992). Από την άλλη πλευρά, αρκετές εργασίες αναφέρουν ότι η αύξηση του επιπέδου αλατότητας, υπό υψηλή διαθεσιμότητα φωσφόρου, όπως συμβαίνει στις υδροπονικές καλλιέργειες, ενισχύει τον ρυθμό πρόσληψης φωσφόρου σε επίπεδα εμφάνισης μορφών τοξικότητας (Mohammad et al., 2008; Roberts et al., 1984). Στις μεταχειρίσεις αλατότητας παρατηρήθηκε αντίστοιχα αυξημένη πρόσληψη φωσφόρου και στην παρούσα μελέτη. Ωστόσο, η αλατότητα από το NaCl δεν οδήγησε σε ορατά συμπτώματα τοξικότητας, ανεξάρτητα από το επίπεδο NaCl.



Εικόνα 15. Απεικόνιση επάκριου καψίματος στο έλασμα των φύλλων ως αποτέλεσμα του υψηλού επιπέδου αλατότητας (στ, ζ, η) σε σχέση με τον μάρτυρα (α, β, γ, δ, ε), 120 ημέρες μετά την μεταφύτευση (HMM).

Είναι ευρέως γνωστό ότι η περιεκτικότητα των φυτών σε νιτρικά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ανισορροπία μεταξύ του ρυθμού απορρόφησης και του ρυθμού αφομοίωσης των νιτρικών ιόντων (Cárdenas-Navarro et al., 1999). Παρόλο που οι μηχανισμοί πρόσληψης και αφομοίωσης νιτρικών είναι γενετικά καθορισμένοι, η απορρόφηση νιτρικών εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα

θρεπτικών ουσιών και η αφομοίωση των νιτρικών εξαρτάται αποκλειστικά από το φως, καθώς η μεταφορά ενέργειας για τη μετατροπή των νιτρικών σε νιτρώδη συνδέεται στενά με τη φωτοσυνθετική λειτουργία σε πολλά φυτά (Maynard et al., 1976). Ωστόσο, στο παρόν πείραμα, η μειωμένη συγκέντρωση του οργανικού-N των φύλλων μπορεί να αποδοθεί σε μειωμένους ρυθμούς πρόσληψης NO_3^- -N από των ασκόλυμπρο, πιθανώς λόγω της ανταγωνιστικής αλληλεπίδρασης πρόσληψης με το Cl^- (Martínez and Cerdá, 2008; Urić et al., 2017).

Οι μηχανισμοί ανοχής στην αλατότητα των φυτών συνδέονται με αντιοξειδωτικούς μηχανισμούς οι οποίοι μετριάζουν, σε κάποιο βαθμό, τις τοξικές συνέπειες των ενεργών μορφών οξυγόνου, που παράγονται κατά τη διάρκεια του οσμωτικού στρες (Gill and Tuteja, 2010). Σε αυτό το πλαίσιο, οι (Yazici et al., 2007) αναφέρουν ότι η ανοχή στην αλατότητα του λαχανευόμενου φυτού γλιστρίδας (*Portulaca oleraceae* L.), σχετίζεται άμεσα με την αυξημένη ικανότητα του αντιοξειδωτικού συστήματος να εξουδετερώνει τις ενεργές μορφές οξυγόνου. Επίσης, οι (Neocleous et al., 2014), διερεύνησαν την επίδραση του επιπέδου αλατότητας στη θρέψη και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του πράσινου και του κόκκινου μαρουλιού. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης αποκάλυψαν σημαντική αύξηση των συνολικών φλαβονοειδών [mg rutin/g νωπού βάρους], των ολικών φαινολικών [GAE/g νωπού βάρους] και της ικανότητας εξουδετέρωσής των ελεύθερων ριζών (DPPH) σε επίπεδο αλατότητας 20 mM NaCl σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Αντίστοιχα, οι (Maggini et al., 2021) ανέφεραν ότι, 6 εβδομάδες μετά τη μεταφύτευση, η αντιοξειδωτική ικανότητα του άγριου λαχανευόμενου φυτού *Reichardia picroides* L., το οποίο καλλιεργήθηκε σε επιπλέον υδροπονία, αυξήθηκε σημαντικά στα επίπεδα αλατότητας από 25 έως 100 mM NaCl σε σύγκριση με τον μάρτυρα (1,7 mM NaCl). Ωστόσο, οι διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ήταν πιο εμφανείς με τη δοκιμή FRAP (14,68±3,22, 14,45±3,93 και 16,25±3,94 mmol Fe(II) kg⁻¹ νωπού βάρους, αντίστοιχα) σε σύγκριση με αυτές που παρατηρήθηκαν με τη δοκιμή DPPH (42,58±8,18, 42,80±11,58 και 47,82±10,08 % αναστολή/g νωπού βάρους), ιδιαίτερα σε πιο νεαρά φυτά (4 εβδομάδες μετά τη μεταμόσχευση). Παρόμοιο πείραμα διεξήχθη για τη διερεύνηση της επίδρασης του επιπέδου αλατότητας (20 και 40 mM NaCl) στην παραγωγή και στη λειτουργική ποιότητα στο σταμναγκάθι (*Cichorium spinosum* L.). Σε συμφωνία με τις προαναφερθείσες αναφορές, τα επίπεδα των συνολικών φλαβονοειδών αυξήθηκαν με την έκθεση των φυτών στα 10.0 και 15.0 mM NaCl σε σύγκριση με τα 0.5 και 5.0 mM NaCl. Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις των ολικών φαινολικών και η αντιοξειδωτική ικανότητα του φυτού δεν αυξήθηκαν σημαντικά με τις επεμβάσεις αλατότητας του θρεπτικού διαλύματος. Η έλλειψη σημαντικής επίδρασης οσμωτικού στρες από το NaCl στα ολικά φαινολικά και την αντιοξειδωτική ικανότητα μπορεί να αποδοθεί στην εφαρμογή μέτρων επιπέδων αλατότητας της παρούσας μελέτης (που αντιπροσωπεύουν τα επίπεδα

αλατότητας του νερού άρδευσης που χρησιμοποιείται συνήθως την νησιωτική Μεσόγειο). Αντίθετα, οι σημαντικές διαφορές που συχνά αναφέρονται από αντίστοιχες ερευνητικές εργασίες σχετίζονται με την έκθεση σε επίπεδα αλατότητας υψηλότερα από 20 mM NaCl στο θρεπτικό διάλυμα.



Εικόνα 16. Κεφαλή υδρολίπανσης (αριστερά) τύπου ALAGRO IQ60 και δεξαμενές πυκνών διαλυμάτων (δεξιά).

Κεφάλαιο 4. Επίδραση υδραυλικών ιδιοτήτων υποστρώματος και γεωμετρίας υποδοχέα σε εκτός εδάφους καλλιέργειας του ασκόλυμπρου

4.1 Εισαγωγή

Η καλλιέργεια εκτός εδάφους αποτελεί μια βιώσιμη πρακτική καλλιέργειας για την κάλυψη των διατροφικών απαιτήσεων σε χώρες που πλήττονται από σημαντική έλλειψη νερού άρδευσης όπως το Κατάρ, το Μαρόκο και την Τυνησία (Bouadila et al., 2023; Karanisa et al., 2021; Maaoui et al., 2021). Το κύριο πλεονέκτημα της υδροπονικής καλλιέργειας είναι η αντικατάσταση του εδάφους, που έχει ετερογενείς φυσικοχημικές ιδιότητες και μπορεί να φιλοξενεί παθογόνα μεταδιδόμενα με το έδαφος, αξιοποιώντας διαφορετικά πορώδη υλικά για την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος (υποστρώματα) ή υποδοχείς υποστρωμάτων που παρέχουν ιδανικές συνθήκες ανάπτυξης και ομοιογενή φυσικοχημικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά, απαλλάσσοντας παράλληλα την καλλιέργεια από παθογόνα και ζιζάνια (Savvas et al., 2009). Γενικά, η παραγωγή κηπευτικών καλλιεργειών σε υποστρώματα προτιμάται από τα συστήματα υδροκαλλιέργειας (NFT, Deep flow technique, κ.α.), επειδή τα πρώτα παρέχουν υψηλότερη ρυθμιστική ικανότητα (buffering capacity) και καλύτερες συνθήκες αερισμού της ρίζας (Giller et al., 2021; Langenfeld et al., 2022). Ωστόσο, ο πιο κρίσιμος παράγοντας στην επιλογή του υποστρώματος είναι η ισορροπία μεταξύ της διαθεσιμότητας νερού και του αερισμού της ρίζας που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις φυσικές και υδραυλικές ιδιότητες του υποστρώματος (Gizas and Savvas, 2007; Gruda et al., 2019). Η ανάμειξη οργανικών με αδρανή υποστρώματα, τα οποία διαθέτουν ετερογενή φυσικά (φαινόμενο ειδικό βάρος, ενεργό πορώδες) και υδραυλικά χαρακτηριστικά μπορεί να βελτιστοποιήσει αυτή την ισορροπία σε σύγκριση με το κάθε ένα από τα υπόστρωμα ξεχωριστά (Gohardoust et al., 2020; Gruda, 2022; Posidonia et al., 2012).

Οι υδραυλικές ιδιότητες που καθορίζουν τη διαθεσιμότητα νερού και την επάρκεια σε οξυγόνο στα υποστρώματα περιλαμβάνουν την υδραυλική αγωγιμότητα (K), το ενεργό πορώδες (Effective Pore Space - EPS), την αεροπερατότητα και το εύκολα διαθέσιμο νερό (EAW) (Brunetti et al., 2016; Fields et al., 2016; Gizas et al., 2012; Savvas, 2009), τα οποία εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο του υποστρώματος και τη γεωμετρία του υποδοχέα (Bilderback and Fonteno, 1987; Heller et al., 2015). Ιδιαίτερα, η υδραυλική αγωγιμότητα, η οποία αντικατοπτρίζει τη σχετική ευκολία ροής του νερού στο πορώδες του υποστρώματος, και το εύκολα διαθέσιμο νερό, μια έννοια που εισήχθη από τους (de Boodt and Verdonck, 1972) για να εκφράσει το ποσοστό νερού εδαφική μήτρα που είναι άμεσα διαθέσιμο στα φυτά (Gizas et al., 2012), είναι οι πιο σημαντικές υδραυλικές

ιδιότητες που καθορίζουν την «ευκολία ροής» του νερού και τη διαθεσιμότητά του στα υποστρώματα. Παρόλο που ο προσδιορισμός του K μπορεί εύκολα να ποσοτικοποιηθεί μέσω του νόμου του Darcy σε συνθήκες κορεσμού (K_s), σε ακόρεστες συνθήκες (δηλαδή σε αυτές που επικρατούν συνήθως στα σε υποστρώματα), η εκτίμηση του K είναι ιδιαίτερα δύσκολη λόγω της χρονοβόρας και δαπανηρής αναλυτικής διαδικασίας (Lipovetsky et al., 2020; van Genuchten, 1980). Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό να μοντελοποιηθεί η χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας (δηλαδή η σχέση μεταξύ της σχετικής περιεκτικότητας του υποστρώματος θ σε νερό και της μύζησης h), εφεξής (Moisture Retention Curve - MRC) μέσω μαθηματικής εξίσωσης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της σχετικής υδραυλικής αγωγιμότητας (K_r), επομένως έμμεσα, και για την εκτίμηση της ακόρεστης υδραυλικής αγωγιμότητας. Επιπλέον, η MRC επιτρέπει τον ποσοτικό προσδιορισμό όλων των κρίσιμων υδραυλικών ιδιοτήτων (όπως EPS, EAW, WBC) για την αποδοτικότητα των υποστρωμάτων υδροπονικής καλλιέργειας (Wallach and Raviv, 2005).

Ενώ η θρεπτική και γαστρονομική αξία των άγριων λαχανευόμενων ειδών έχει αναφερθεί εδώ και δεκαετίες (Murray and Stratton, 1944; Sengupta and Pal, 1970), η εμπορική τους αξιοποίηση δεν είναι ακόμα ευρέως διαδεδομένη, κυρίως λόγω της μικρής έκτασης των κλήρων που μπορούν να καλλιεργηθούν με επιτυχία, κοντά σε περιοχές που τα συγκεκριμένα είδη αυτοφύονται (νησιωτική Μεσόγειος). Η δυνατότητα αύξησης της απόδοσης αξιοποιώντας εναλλακτικά συστήματα εντατικής καλλιέργειας όπως η υδροπονία και εν συνεχεία η αποτελεσματική οργάνωση της διάθεσής τους στην αγορά (Chatzopoulou et al., 2020; Ondoño et al., 2015) έχει προκαλέσει νέο ενδιαφέρον τόσο για τον παραγωγό όσο και για τον καταναλωτή. Ωστόσο, τα περισσότερα ενδημικά είδη δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς όσον αφορά τις ανάγκες τους σε θρέψη και καταλληλότητα υποστρωμάτων που μπορούν να εξασφαλίσουν τη βέλτιστη διαθεσιμότητα νερού και αεροπερατότητα στη ριζόσφαιρα. Έτσι, η ενσωμάτωσή τους σε συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους εξακολουθεί να συνδέεται με επενδυτική αβεβαιότητα για τους παραγωγούς και αποτελεί αντικείμενο έρευνας. Έτσι, τα τελευταία χρόνια έχει προταθεί η χρήση αρκετών οργανικών και ανόργανων υποστρωμάτων για την καλλιέργεια εκτός εδάφους άγριων ενδημικών λαχανευόμενων φυτών, όπως το *Cichorium spinosum L.*, *Taraxacum officinale L.*, *Reichardia picroides L.* και *Scolymus hispanicus L.* (Chatzigianni et al., 2019; Papadimitriou et al., 2022; Paschoalinotto et al., 2023; Petropoulos and Karapanos, 2021).

Ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας για την επιτυχή εγκατάσταση και την υψηλή απόδοση των άγριων λαχανευόμενων ειδών και ριζοματωδών φυτών σε συστήματα υδροπονικής καλλιέργειας εκτός από την σωστή επιλογή του τύπου υποστρώματος και η κατάλληλη επιλογή της γεωμετρίας

του υποδοχέα (Du et al., 2022; Giménez et al., 2020; Gizas and Savvas, 2007; Heller et al., 2015). Οι Bilderback και Fonteno, 1987) αναφέρουν ότι η επαρκής διαθεσιμότητα νερού και αέρα σε ένα υπόστρωμα καλλιέργειας εξαρτώνται από το βάθος και το πλάτος του φυτοδοχείου. Έτσι, ο σωστός χειρισμός της γεωμετρίας του υποδοχέα μπορεί να βελτιστοποιήσει την ισορροπία μεταξύ της διαθεσιμότητας αέρα και νερού στη ριζόσφαιρα, αυξάνοντας έτσι τον ρυθμό ανάπτυξης των φυτών και κατά συνέπεια την παραγωγή (Wallach, 2019). Επιπλέον, παρόλο που αρκετές επιστημονικές αναφορές αξιολογούν τον αντίκτυπο του υποστρώματος και του φυτοδοχείου στα χαρακτηριστικά ανάπτυξης και απόδοσης των φυλλωδών λαχανικών, ελάχιστες δημοσιευμένες έρευνες εξετάζουν την επίδραση των υδραυλικών ιδιοτήτων του υποστρώματος και της γεωμετρίας του υποδοχέα στην απόδοση και στα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των φυτών (Choi et al., 2019; Heiskanen, 1995; Heller et al., 2015; Kingston et al., 2020; Lee et al., 2022; Moschou et al., 2022).

Στόχος της παρούσας μελέτης ήταν (α) η διερεύνηση της επίδρασης της γεωμετρίας του υποδοχέα (ύψους 15 και 25 cm) και του υποστρώματος (κοκκοφοίνικας, περλίτης και μίγματα τους) στην απόδοση της καλλιέργειας και τη φυσιολογία του άγριου λαχανευόμενου φυτού, *S. hispanicus* L, (β) τον καθορισμό του βέλτιστου συνδυασμού υποδοχέα και υποστρώματος σύμφωνα με τους επιθυμητούς παραμέτρους απόδοσης και τελικά (γ) την διερεύνηση εναλλακτικών και πιο αποδοτικών πρακτικών καλλιέργειας εκτός εδάφους για λαχανευόμενα είδη, με στόχο την μείωση της ανθρωπογενούς πίεσης στο φυσικό περιβάλλον.

4.2 Υλικά και μέθοδοι

4.2.1 Πειραματικός σχεδιασμός

Σπόροι ασκόλυμπρου (ημιορεινός οικότυπος) συγκομίστηκαν από αυτοφυή πληθυσμό από την περιοχή της μονής Αγκαράθου (υψόμετρο 354 m) του νομού Ηρακλείου και φυτεύτηκαν σε δίσκους σποράς (30 × 50 cm) και υπόστρωμα μείγματος κοκοφοίνικας και περλίτη (3:1). Στις 20 Ιανουαρίου 2021 (4 εβδομάδες μετά τη σπορά), τα σπορόφυτα μεταφυτεύθηκαν σε σάκους (90 cm μήκος και 15 cm ύψος) και γλάστρες (25 cm ύψος και 10 cm πλάτος) που περιείχαν τις 5 μεταχειρίσεις υποστρωμάτων, υπόστρωμα κοκοφοίνικας, περλίτη και τρεις αναλογίες τους (3:1, 1:1, και 1:3). Οι σάκοι και οι γλάστρες φιλοξένησαν τρία και ένα φυτά, αντίστοιχα, που αντιστοιχούσαν σε 10 L υποστρώματος ανά φυτό και στα δύο δοχεία. Ο Πίνακας 9 παρουσιάζει αναλυτικά τις μεταχειρίσεις των υποστρωμάτων και τις συντομογραφίες τους.

Πίνακας 9. Μεταχειρίσεις υποστρωμάτων και οι αναλογίες του στο μίγμα.

Επέμβαση	Αναλογίες μιγμάτων
4Π0Κ (Μάρτυρας)	100% Περλίτης
3Π1Κ	75% Περλίτης : 25% Κοκοφοίνικας
2Π2Κ	50% Περλίτης : 50% Κοκοφοίνικας
1Π3Κ	25% Περλίτης : 75% Κοκοφοίνικας
0Π4Κ	100% Κοκοφοίνικας

Οι σάκοι και οι γλάστρες τοποθετήθηκαν σε ανοιχτό υδροπονικό σύστημα καλλιέργειας έκταση 120 m², σε μη θερμαινόμενο θερμοκήπιο καλυμμένο με φιλμ πολυαιθυλενίου. Το υδροπονικό σύστημα βασίστηκε σε υπερυψωμένα λούκια καλλιέργειας για τη συλλογή και καταγραφή του ημερήσιου όγκου απορροής κάθε μεταχείρισης ξεχωριστά όπου στη συνέχεια απορριπτόταν για να αποφευχθεί ενδεχόμενη ανισορροπία πρόσληψης θρεπτικών στοιχείων και η ασαφής ερμηνεία των αποτελεσμάτων που μπορεί να προκύψει από τις διαφορετικές χημικές ιδιότητες των μελετώμενων υποστρωμάτων. Δύο ημέρες μετά τη μεταφύτευση (HMM), πραγματοποιήθηκαν τέσσερις οπές αποστράγγισης και από τις δύο πλευρές του σάκου καλλιέργειας, για να επιτραπεί η ελεύθερη αποστράγγιση της περίσσειας του θρεπτικού διαλύματος. Τόσο οι σάκοι όσο και οι γλάστρες τοποθετήθηκαν σε 8 διπλές γραμμές καλλιέργειας με απόσταση 3,0 m × 0,45 m μεταξύ τους, σε Σχέδιο Τυχαιοποιημένων Πλήρων Ομάδων με 5 επεμβάσεις υποστρωμάτων, 2 μεταχειρίσεις φυτοδοχείων και 4 επαναλήψεις ανά επέμβαση ($5 \times 2 \times 4 = 40$ πειραματικά τεμάχια). Αυτή η διάταξη φύτευσης είχε ως αποτέλεσμα μια πυκνότητα καλλιέργειας 8 φυτών m⁻². Στην Εικόνα 17 απεικονίζεται η ανάπτυξη των φυτών από τις 10 έως τις 100 HMM (30 Απριλίου, 2021).



Εικόνα 17. Πειραματική απεικόνιση στην οποία παρουσιάζεται η ανάπτυξη των φυτών στις (α) 10, (β) 30, (γ) 60 και (δ) 100 ημέρες μετά την μεταφύτευση (HMM).

Πριν από την μίξη των υποστρωμάτων, ο κοκοφοίνικας υποβλήθηκε σε επεξεργασία με θρεπτικό διάλυμα συγκέντρωσης 0.5 mM $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ και 1.5 mM $5[Ca(NO_3)_2 \cdot 2H_2O]:NH_4NO_3$ για την μερική αντικατάσταση του Na και K με Ca και Mg, όπως περιγράφεται από τους (de Kreij and Van Leeuwen, 2001) και την αποφυγή ανισορροπία θρέψης των φυτών. Μετά την εγκατάσταση της καλλιέργειας στα υποστρώματα, και καθ' όλη την καλλιεργητική περίοδο, στα φυτά γινόταν τροφοδοσία με θρεπτικό διάλυμα σύνθεσης με εκείνη που αναφέρεται από τους Papadimitriou et al., (2020) και Papadimitriou et al., (2022) (Πίνακας 3) με χρήση του λογισμικού NUTRISENSE (Savvas et al., 2021) και παρασκευάστηκε με χρήση συστήματος αυτόματης ανάμειξης θρεπτικών διαλυμάτων (ALAGRO IQ60, Αθήνα, Ελλάδα). Η παροχή του διαλύματος στα φυτά γινόταν ημερησίως με στάγδην άρδευση από έναν μεμονωμένο διανεμητή παροχής $4 L h^{-1}$. Η συχνότητα και η διάρκεια της παροχής θρεπτικού διαλύματος προσαρμοζόταν τακτικά έτσι ώστε το κλάσμα ημερήσιας απορροής να διατηρείται εντός του εύρους 0,30-0,40 και η ημερήσια συνολική ποσότητα παροχής θρεπτικού διαλύματος να είναι ίση σε όλες τις επεμβάσεις υποστρωμάτων.

4.2.2 Προσδιορισμός των υδραυλικών χαρακτηριστικών

Θεωρητικά, η σχετική υδραυλική αγωγιμότητα K_r ενός υποστρώματος μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση του (van Genuchten, 1980), η οποία ορίζεται ως η αναλογία μεταξύ της ακόρεστης υδραυλικής αγωγιμότητας (K), σε μια δεδομένη μύζηση, και της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας (K_s). Η εκτίμηση της K_r με χρήση της εξίσωσης του van Genuchten έχει αναφερθεί για μια σειρά υποστρωμάτων, όπως η σκωρία (Wallach and Raviv, 2005), η τύρφη (da Silva et al., 1993), ο πετροβάμβακας (Bougoul et al., 2005), μίξη κόμποστ με περλίτη (Al Naddaf et al., 2011), κοκοφοίνικα (Londra et al., 2018; Londra, 2010) και φυτικά υπολείμματα του ανθοκομικού φυτού Ποσειδωνίας η ωκεάνιος (Gizas et al., 2012). Ωστόσο, οι μέθοδοι προσδιορισμού των υδραυλικών ιδιοτήτων των υποστρωμάτων είναι συνήθως χρονοβόρες λόγω του αργού ρυθμού εξισορρόπησης της καμπύλης σε χαμηλές τιμές μύζησης της εδαφικής μήτρας. Η χρήση του αναλυτή Hyprop Hydraulic Properties Analyzer (HYPROP2, Meter Group, USA) αποτελεί μια εναλλακτική μέθοδο που παρέχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις κλασικές τεχνικές προσδιορισμού υδραυλικών ιδιοτήτων. Η πιο σημαντική παράμετρος είναι ότι μπορούν να δημιουργηθούν δεδομένα συγκράτησης νερού υψηλής ανάλυσης (περίπου 100 σημεία δεδομένων συγκράτησης νερού στην περιοχή 0-100 kPa) σε λίγες μόνο ημέρες. Το HYPROP2 έχει χρησιμοποιηθεί προηγουμένως για αξιολόγηση της υδραυλικής συμπεριφοράς των υποστρωμάτων (Brunetti et al., 2016) και για τον προσδιορισμό των κρίσιμων σημείων πλήρωσης του υποστρώματος με νερό με στόχο την βελτιστοποίηση του προγραμματισμού άρδευσης σε υδροπονική καλλιέργεια βασιλικού (Montesano et al., 2018).

Στην παρούσα ερευνητική εργασία, για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας (ΧΚΥ) για τις 5 μεταχειρίσεις υποστρωμάτων, χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός αναλυτής HYPROP2 όπως περιγράφεται από τους (Shokrana and Ghane, 2020) με μικρές τροποποιήσεις. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε απιονισμένο νερό στο οποίο αφαιρέθηκε ο εγκλωβισμένος αέρας χρησιμοποιώντας αντλία κενού στα 0,85 bar για 24 ώρες και εν συνεχεία χρησιμοποιήθηκε για την πλήρωση της μονάδας HYPROP2 και των тенσιόμετρων. Τέσσερα αδιατάρακτα δείγματα υποστρώματος (επαναλήψεις) συλλέχθηκαν από κάθε μεταχείριση με την χρήση δακτυλίων δειγματοληψίας (250 mL) και αφού εμποτίστηκαν με νερό ($EC \leq 0,5 \text{ dS m}^{-1}$) έως τον κορεσμό, τοποθετήθηκαν στη μονάδα HYPROP2 η οποία με τη σειρά της τοποθετήθηκε σε βαθμονομημένη ζυγαριά ακριβείας.

Σε διάρκεια τεσσάρων ημερών, τα тенσιόμετρα κατέγραψαν την μεταβολή του υδατικού δυναμικού και παράλληλα ο ζυγός ακριβείας κατέγραφε την μεταβολή στο βάρος του δείγματος σε σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες μέχρι την ολοκλήρωση της μέτρησης (Daliakopoulos et al., 2021; Zheng et al., 2018). Μετά το τέλος του πειράματος, για κάθε δείγμα προσδιορίστηκε το φαινόμενο ειδικό βάρος (BD) και με την χρήση του λογισμικού LABROS SoilView-Analysis (Meter Group, USA) υπολογίστηκε η μέση περιεκτικότητα σε νερό θ_i και η μέση μύζηση που προέκυψε από τις καταγραφές των δύο тенσιόμετρων με χρονικό βήμα 10 δευτερολέπτων. Για τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας, θεωρήθηκε ότι η ροή του νερού q_i στο οριζόντιο επιπέδου που βρίσκεται ακριβώς στη μέση των δύο тенσιόμετρων μεταξύ των χρονικών βημάτων t_{i-1} και t_i ήταν:

$$q_i = 1/2 \left(\frac{\Delta V_i}{\Delta t_i} \right) / A \quad (1)$$

όπου ΔV_i η εξάτμιση του νερού [cm^3] κατά τη μεταβολή της μάζας, Δt_i το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο χρονικών σημείων καταγραφής και A το εμβαδόν διατομής [cm^2] του δείγματος. Η εξίσωση της υδραυλικής αγωγιμότητας υπολογίστηκε αντιστρέφοντας την εξίσωση του Darcy:

$$K_i(h_i) = \frac{-q_i}{\left(\frac{\Delta h_i}{\Delta z} \right) - 1} \quad (2)$$

όπου h_i η μέση χρονική και χωρική μύζηση, Δh_i η διαφορά των δύο επιπέδων μύζησης στα δύο επίπεδα μέτρησης και Δz η απόσταση των επιπέδων μέτρησης. Συνεπώς, οι συναρτήσεις $\theta_i(h_i)$ και $K_i(h_i)$ προσαρμόστηκαν στα σημεία μέτρησης $\theta(h)$ και $K(h)$ που μοντελοποιήθηκαν με μη γραμμική βελτιστοποίηση. Το φαινόμενο ειδικό βάρος (BD) υπολογίστηκε ως ο λόγος ξηρού βάρους δείγματος προς τον όγκο του [g cm^{-3}]. Οι ΧΚΥ των 5 υποστρωμάτων που εξετάστηκαν απεικονίστηκαν γραφικά παρουσιάζοντας τόσο τον μέσο όρο των τριών επαναλήψεων των τιμών

του θ σε κάθε επίπεδο μύζησης όσο και τις αντίστοιχες βελτιστοποιημένες καμπύλες που προσαρμόστηκαν πάνω στα δεδομένα σύμφωνα με το μοντέλο του van Genuchten (1980):

$$S_e = [1 + (\alpha h)^n]^m \quad (3)$$

όπου h η μύζηση σε cm, α και n οι αντίστοιχοι παράμετροι σύμφωνα με τα φυσικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος, οι οποίες προσδιορίστηκαν εμπειρικά με μη γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης, $m = 1 - 1/n$ και S_e ο ενεργός κορεσμός, η οποία, εξ ορισμού, δίνεται από την εξίσωση:

$$S_e = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \quad (4)$$

Στην εξ. (4), το θ απεικονίζει την εκατοστιαία κατ' όγκο περιεκτικότητα του υποστρώματος σε νερό και οι δείκτες s και r απεικονίζουν την υπολειμματική περιεκτικότητα σε νερό και την περιεκτικότητα σε νερό σε κατάσταση κορεσμού, αντίστοιχα. Από την αντικατάσταση του (4) και (3) προκύπτει:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (5)$$

Η εξίσωση (5) χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει τη σχέση μεταξύ της μύζησης (h) και της εκατοστιαίας περιεκτικότητας σε νερό (θ) για κάθε μεταχείριση υποστρώματος.

Με βάση την XKY, εκτιμήθηκαν οι ακόλουθες υδραυλικές ιδιότητες για κάθε ένα από τα μελετώμενα υποστρώματα σύμφωνα με τους (Bunt, 1988): (i) ενεργό πορώδες (EPS: ποσοστό του συνολικού όγκου των πόρων που μπορεί να γεμίσουν με νερό, που αντιστοιχεί σε θ_s), (ii) το ποσοστό συγκράτησης νερού σε μύζηση 10 cm, εφεξής καλούμενη υδατοχωρητικότητα (WC), (iii) η ποσοστιαία περιεκτικότητα σε αέρα σε τιμές μύζησης 10 cm, εφεξής καλούμενη αεροπερατότητα (AC), η οποία προκύπτει από την διαφορά μεταξύ θ_s και WC (iv) το εύκολα διαθέσιμο νερό (EAW: διαφορά στην ποσοστιαία περιεκτικότητα σε νερό μεταξύ 10 και 50 cm μύζησης) και (v) ρυθμιστική χωρητικότητα σε νερό (WBC: διαφορά στην ποσοστιαία περιεκτικότητα νερού μεταξύ 50 και 100 cm μύζησης). Η ίδια εξίσωση χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της υδατοχωρητικότητας του φυτοδοχείου (AWC), μια έννοια που εισήχθη από τους (Bilderback and Fonteno, 1987) για να εκφράσει τη διαφορά της εκατοστιαίας περιεκτικότητας νερού όταν τα υποστρώματα τοποθετούνται σε φυτοδοχεία διαφορετικού ύψους, και υπολογίζεται ενσωματώνοντας στην εξίσωση (5) τιμές μύζησης από 0 έως ένα ορισμένο ύψος φυτοδοχείου (H) και διαιρώντας με το ακριβές ύψος του (Σάββας, 2009) όπως εκφράζεται στην εξίσωση (6). Συνεπώς, η αεροπερατότητα φυτοδοχείου (AAC) των υποστρωμάτων που δοκιμάστηκαν, σε ένα ορισμένο ύψος υποδοχέα, υπολογίστηκε αφαιρώντας την AWC από το θ_s .

$$AWC = \frac{1}{H} \int_0^H \theta(h) dh \quad (6)$$

Η σχετική υδραυλική αγωγιμότητα (Kr), η οποία ορίζεται ως η αναλογία μεταξύ της πραγματικής ακόρεστης υδραυλικής αγωγιμότητας K σε συγκεκριμένες τιμές μύζησης h και της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας Ks , υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την εξίσωση van Genuchten (1980) για υποστρώματα ως εξής:

$$K_r = \frac{[1 - (\alpha h)^{n-1} (1 + (\alpha h)^n)^{-m}]^2}{(1 + (\alpha h)^n)^{m/2}} \quad (7)$$

Η εξ. (7), η οποία προκύπτει από την εξ. (3) για $m = 1-1/n$, επιτρέπει την βελτιστοποίηση της εκτίμησης του Kr σε υποστρώματα εκτός εδάφους καλλιέργειας κηπευτικών, όπως αναφέρουν οι (Wallach et al., 1992) για σκωρία, κομποστοποιημένα γεωργικά υπολείμματα και μείγματά τους, (da Silva et al., 1993) για την τύρφη και η μίξη της με σκωρία, (Heiskanen, 1995) για μείγματα τύρφης με περλίτη (Londra et al., 2018) καθώς και υπόστρωμα κοκοφοίνικα.

4.2.3 Κριτήρια αξιολόγησης

Η βελτιστοποίηση του μοντέλου του van Genuchten με τις μετρήσεις HYPROP2 εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας R^2 και υπολογίστηκε ως:

$$R^2 = \left(\frac{N \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{N \sum x^2 - (\sum x)^2} \sqrt{N \sum y^2 - (\sum y)^2}} \right)^2 \quad (8)$$

όπου x_i η παρατηρούμενη μεταβλητή, y_i η υπολογιζόμενη μεταβλητή και N ο αριθμός των παρατηρήσεων. Το R^2 αντιπροσωπεύει την ποσοστιαία αβεβαιότητα που αποδίδεται στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε. Η απόκλιση μεταξύ των παρατηρούμενων και των υπολογισμένων τιμών εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας την τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (9)$$

με την οποία αποδίδεται με ευκρίνεια το σφάλμα του μοντέλου στις μονάδες της μελετώμενης μεταβλητής. Η τέλεια προσαρμογή μεταξύ των παρατηρούμενων και των υπολογισμένων τιμών, η οποία είναι απίθανο να συμβεί, θα είχε $RMSE = 0$ και $R^2 = 1$.

4.2.4 Ανάπτυξη φυτών και προσδιορισμός φωτοσυνθετικής λειτουργίας

Στις 100 HMM (μεταξύ 07:00-09:00 π.μ.), προσδιορίστηκε ο σχετικός φθορισμός (μέγιστη φωτοχημική απόδοση του φωτοσυστήματος II), στα πιο πρόσφατα πλήρως ανεπτυγμένα φύλλα τριών φυτών ανά πειραματική μονάδα, χρησιμοποιώντας φθοριόμετρο OS-30p (Opti-Sciences,

Η.Π.Α.). Ο σχετικός φθορισμός (μέγιστη φωτοχημική απόδοση του φωτοσυστήματος II, Fv/Fm) έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την ανίχνευση διαταραχών που προκαλούνται από το αβιοτικό στρες, (Baker, 2008). Στις 100 HMM, όταν τα φυτά του *S. hispanicus* εμφάνισαν τα βέλτιστα εμπορικά χαρακτηριστικά, συλλέχθηκε ολόκληρο το φυτό. Αρχικά, όλα τα φύλλα από 3 φυτά ανά πειραματική μονάδα αφαιρέθηκαν και τοποθετήθηκαν σε λευκή πλαστική επιφάνεια γνωστών διαστάσεων (1 m²) για τον προσδιορισμό της φυλλικής επιφάνειας (LA) [cm²] σύμφωνα με τη μέθοδο της Ψηφιακής Ανάλυσης των Valle et al., (2017) με χρήση λογισμικού ImageJ 1.52n (National Institute Bethesda, MD, ΗΠΑ). Μετά τον διαχωρισμό του υπέργειου μέρους του φυτού από τη ρίζα, ο αριθμός των φύλλων (N_L), το νωπό βάρος των φύλλων (WFL) [g], το νωπό βάρος της ρίζας (WFR) [g], το συνολικό νωπό βάρος (WFL) [g], το μήκος ρίζας (L_R) [cm] και η διάμετρος της ροζέτας (RD_L) [cm] μετρήθηκαν απευθείας. Επιπλέον, δείγματα φύλλων που συλλέχθηκαν από 3 φυτά ανά πειραματικό τεμάχιο χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της θρεπτικής κατάστασης του φυτού. Τα δείγματα των φύλλων ξεπλύθηκαν με απεσταγμένο νερό, και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε ξήρανση τοποθετώντας τα σε ξηραντήρα στους 65°C για 72 ώρες μέχρι την σταθεροποίηση του βάρους τους και στη συνέχεια κονιορτοποιήθηκαν και περάστηκαν από κόσκινο 20 mesh. Εν συνεχεία, χρησιμοποιήθηκε 0,5 g του αλεσμένου φυτικού ιστού για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Cu, B και Zn με χρήση φασματομετρίας οπτικής εκπομπής επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (Avio 560Max ICP-OES, PerkinElmer, ΗΠΑ). Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν 0,5 g ξηρού φυτικού ιστού για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ολικού αζώτου σύμφωνα με τη μέθοδο Kjeldahl μετά από ανοργανοποίηση με H₂SO₄.

Για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη, 100 HMM, συλλέχθηκαν 5 g νωπού ιστού φύλλων από 3 φυτά ανά πειραματικό τεμάχιο. Ο φυτικός ιστός τοποθετήθηκε σε γουδί με μεθανόλη 90% και τα ομογενοποιημένα δείγματα φυγοκεντρήθηκαν στις 3.000 στροφές για 15 λεπτά. Η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη α και β προσδιορίστηκε με την φασματοφωτόμετρο UV-Vis (Specord 250, Jena, Γερμανία). Η απορρόφηση μετρήθηκε στα 666 και 653 nm για τη χλωροφύλλη-α και τη χλωροφύλλη-β, αντίστοιχα, και η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη-α και τη χλωροφύλλη-β και ολική χλωροφύλλη υπολογίστηκε σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\text{Chlorophyll } a = (12.7 \times A_{663}) - (2.69 \times A_{645}) \quad (10)$$

$$\text{Chlorophyll } b = (22.9 \times A_{645}) - (4.68 \times A_{663}) \quad (11)$$

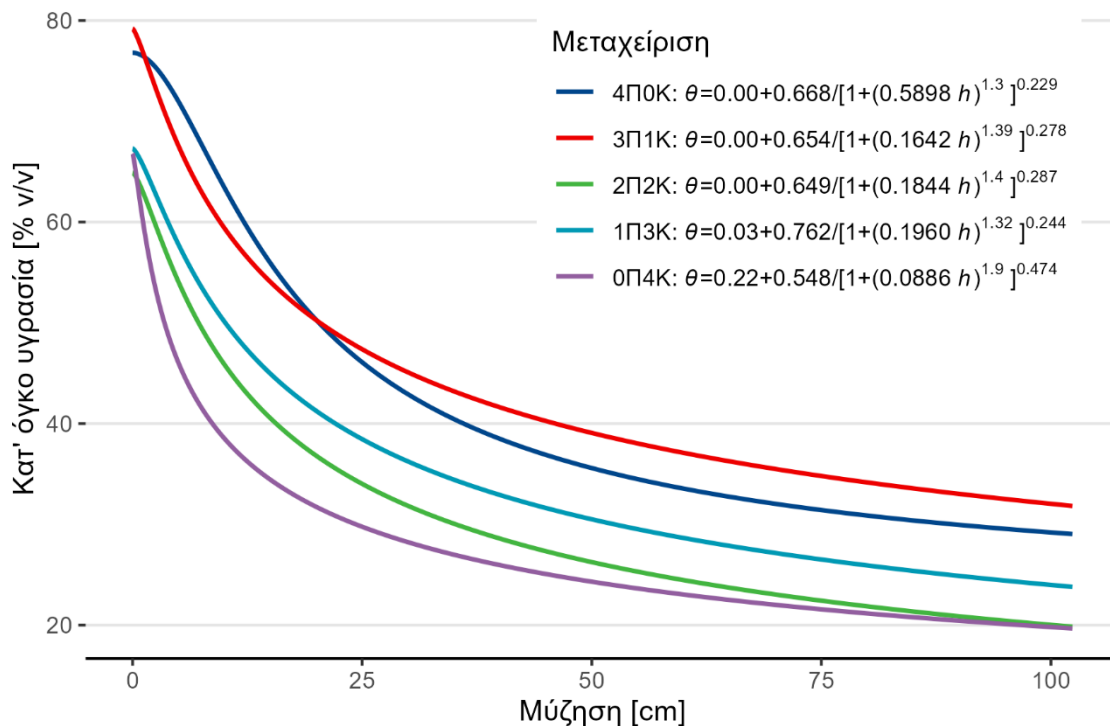
$$\text{Chlorophyll } a + b = (0.28 \times A_{665.2}) + (27.64 \times A_{652.4}) \quad (12)$$

4.2.5 Στατιστική ανάλυση

Τα πειραματικά δεδομένα απόδοσης και η περιεκτικότητα σε ανόργανα θρεπτικά στοιχεία αναλύθηκαν με δίδρομη ANOVA και χρησιμοποιήθηκε η δοκιμή πολλαπλού εύρους Duncan για να εντοπιστούν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μέσων των μεταχειρίσεων σε επίπεδο σημαντικότητας $P \leq 0,05$. Επίσης πραγματοποιήθηκε έλεγχος κανονικότητας της κατανομής των δεδομένων και ομοιογένειας των διασπορών για κάθε δοκιμή που εφαρμόστηκε (Shapiro-Wilk και Levene test, αντίστοιχα). Με βάση την περιεκτικότητα σε νερό και την μύζηση από πολλαπλά δείγματα υπολογίστηκαν τα θ_r , θ_s , α , n και m , καθώς και η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων, σε ποσοστά 2,5 και 97,5%. Για να ανιχνευθούν σημαντικές διαφορές στις παραμέτρους του van Genuchten μεταξύ των μεταχειρίσεων, λήφθηκαν 10 ομοιόμορφα κατανεμημένα δείγματα από τον σύνολο των παραμέτρων και χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο για την εκτίμηση του θ σε h 0, 10, 50 και 100 cm. Οι διαφορές σε AC, EAW και WBC μεταξύ των μεταχειρίσεων αξιολογήθηκαν χρησιμοποιώντας τη δοκιμή πολλαπλού εύρους Duncan. Η συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων απόδοσης φυτών και των υδραυλικών ιδιοτήτων του υποστρώματος αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας R^2 μοντέλων γραμμικής και λογαριθμικής παλινδρόμησης. Το κριτήριο Akaike (Sakamoto and Akaike, 1978) χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή μεταξύ γραμμικών και λογαριθμικών μοντέλων. Η στατιστική ανάλυση και η γραφική απεικόνιση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το στατιστικό πακέτο R (R Development Core Team, 2017).

4.3 Αποτελέσματα

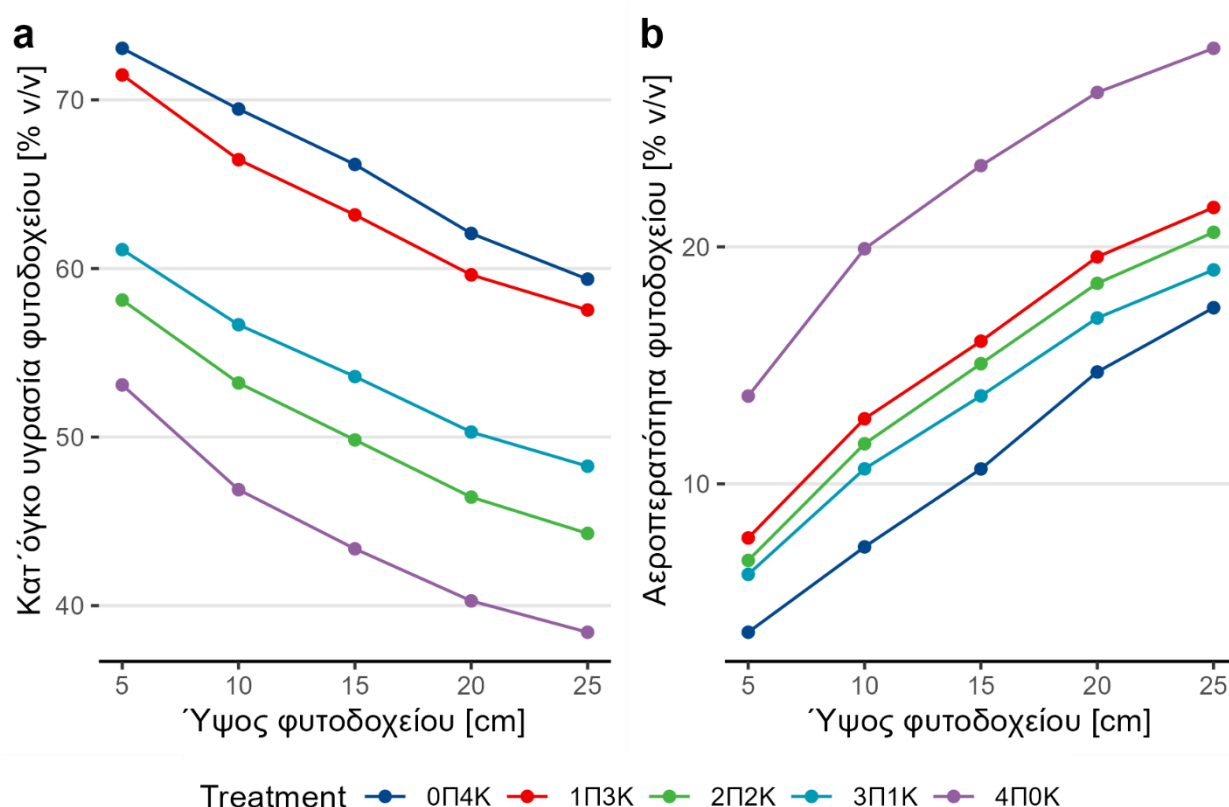
Οι επεμβάσεις των υποστρωμάτων (0Π4Κ, 1Π3Κ, 2Π2Κ, 3Π1Κ και 4Π0Κ) και οι καμπύλες συγκράτησης νερού προσαρμόστηκαν μέσω ανάλυσης μη γραμμικής παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας το μοντέλο του (van Genuchten, 1980) (Εικόνα 2). Οι τιμές του ποσοστού υγρασίας σε κάθε επίπεδο μύζησης αντιστοιχούσαν σε καλό βαθμό με τις μοντελοποιημένες καμπύλες $\theta(h)$, όπως παρουσιάζεται από το σχετικά χαμηλό RMSE (0.05, 0.02, 0.02, 0.02 και 0.03 %, για τις μεταχειρίσεις 0Π4Κ, 1Π3Κ, 2Π2Κ, 3Π1Κ και 4Π0Κ, αντίστοιχα) που παρέχει μια ένδειξη της μέσης απόκλισης ενός σημείου δεδομένων την μοντελοποιημένη εξίσωση. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές της καμπύλης συγκράτησης νερού (MRC) των μεταχειρίσεων υποστρώματος 0Π4Κ, 1Π3Κ, 2Π2Κ, 3Π1Κ και 4Π0Κ ήταν 4.9, 2.4, 2.2, 2.4 και 3.3%, αντίστοιχα.



Εικόνα 18. Εκτίμηση της ΧΚΥ των υποστρωμάτων κοκοφοίνικα (0Π4Κ), περλίτη (4Π0Κ) και των μιγμάτων τους (3Π1Κ, 2Π2Κ και 1Π3Κ) σύμφωνα με το μοντέλο van Genuchten. Τα σύμβολα υποδηλώνουν τους μέσους όρους τεσσάρων επαναλήψεων της κάθε επέμβασης.

Όπως φαίνεται στο Εικόνα 18, η ποσοστιαία περιεκτικότητα σε νερό [% v/v] μειώθηκε σημαντικά όταν η μύζηση αυξήθηκε από 0 σε περίπου 40 cm. Επιπλέον, η μίξη του κοκοφοίνικα (4Κ0Π) με περλίτη (0Κ4Π), άλλαξε σημαντικά το μοτίβο της ΧΚΥ ιδιαίτερα σε τιμές μύζησης που κυμαίνονται από 10-50 cm. Σε χαμηλό επίπεδο μύζησης 0-10 cm, η ΧΚΥ του κοκοφοίνικα (0Π4Κ) και η μίξη 3Κ1Π εμφάνισαν παρόμοια μείωση στην ποσοστιαία περιεκτικότητα σε νερό, οδηγώντας έτσι σε μη σημαντική μείωση των παραμέτρων EPS και WC. Σε υψηλότερες τιμές μύζησης (10-50 cm) η ΧΚΥ του 3Κ1Π έδειξε πιο έντονη μείωση της περιεκτικότητας σε νερό, μειώνοντας έτσι σημαντικά το εύκολα διαθέσιμο νερό (EAW) σε σύγκριση με το 4Κ0Π. Επιπλέον, η ποσοστιαία περιεκτικότητα σε νερό στον κορεσμό (θ_s) και η περιεκτικότητα σε νερό σε επίπεδο μύζησης 10 cm των 4Κ0Π και 3Κ1Π παρουσιάστηκαν σημαντικά αυξημένες σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις 2Π2Κ, 3Π1Κ και 4Π0Κ, καθιστώντας σημαντική τη μείωση των υδραυλικών παραμέτρων EPS και WC των τελευταίων μεταχειρίσεων Εικόνα 19. Η σύγκριση των υδραυλικών ιδιοτήτων μεταξύ του κοκοφοίνικα (4Κ0Π), του περλίτη (4Π0Κ) και των μιγμάτων τους (3Κ1Π, 2Κ2Π, 1Κ3Π) σε επίπεδα μύζησης που κυμαίνονται από 10 έως 100 cm αποκάλυψε ότι ο ρυθμός μείωσης του θ τείνει να είναι υψηλότερος με την αύξηση στο ποσοστό του περλίτη στο μίγμα του υποστρώματος με αποτέλεσμα σημαντικά χαμηλότερες τιμές EAW και WBC. Αντίθετα, το AC

έτεινε να αυξάνεται καθώς το κλάσμα του κοκοφοίνικα μειώθηκε στο μίγμα (Πίνακας 11). Ωστόσο, η ΧΚΥ του 2Π2Κ παρουσιάζει μια πιο απότομη μείωση από αυτή των 1Π3Κ και 3Π1Κ καθώς η μύζηση αυξάνεται σε υψηλότερα επίπεδα από 25 cm (Εικόνα 18), με αποτέλεσμα σημαντικά υψηλότερο ποσοστό του WBC στις μεταχειρίσεις 3Π1Κ και 1Π3Κ σε σύγκριση με το 2Π2Κ (Πίνακας 11). Επιπλέον, ο περιλίτης ήταν σημαντικά ελαφρύτερος σε σύγκριση με τον κοκοφοίνικα με μέσο φαινόμενο ειδικό βάρος (BD) 0.093 ± 0.003 και $0.136 \pm 0.002 \text{ g cm}^{-3}$, αντίστοιχα, ενώ τα μίγματά τους εμφάνισαν ενδιάμεσες τιμές BD με αυξανόμενη τάση καθώς το κλάσμα του κοκοφοίνικα αυξάνεται στο μίγμα (Πίνακας 11).



Εικόνα 19. Υδατοχωρητικότητα φυτοδοχείου (α) και αεροπερατότητα φυτοδοχείου (β) σε στα υποστρώματα κοκοφοίνικα (4Κ0Π), περιλίτη (0Κ4Π) 0.5 - 5.0 mm και των μιγμάτων τους (1Π3Κ, 2Π2Κ, 3Π1Κ), όπως επηρεάζεται από το ύψος του υποστρώματος στον υποδοχέα. Οι εκτιμήσεις βασίστηκαν στις εξισώσεις της ΧΚΥ, και προσδιορίστηκαν με βάση τέσσερις επαναλήψεις από κάθε επίπεδο μύζησης.

Σύμφωνα με το Εικόνα 19, η υδατοχωρητικότητα φυτοδοχείου (AWC), όπως ορίζεται από τους (Bilderback and Fonteno, 1987) και (Savvas, 2009), μειώνεται σημαντικά καθώς το ύψος του δοχείου αυξάνεται από 5-25 cm σε όλες τις μεταχειρίσεις υποστρώματος. Ωστόσο, όταν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της αεροπερατότητας φυτοδοχείου (AAC) των υπό διερεύνηση υποστρωμάτων στο ίδιο ύψος, ο κοκοφοίνικας (4Κ0Π) και το μίγμα 3Κ1Π τείνει να συγκρατεί

περισσότερο νερό σε σύγκριση με τις άλλες τρεις επεμβάσεις υποστρωμάτων, δηλαδή 2Κ2Π, 3Π1Κ και 4Π0Κ. Ωστόσο, η AAC στον κορεσμό ήταν χαμηλότερη στον κοκοφοίνικα (4Κ0Π) και στο μίγμα 3Κ1Π σε σύγκριση με τις άλλες τρεις επεμβάσεις (2Κ2Π, 3Π1Κ και 4Π0Κ), όπως φαίνεται στο Εικόνα 19. Πιο συγκεκριμένα, το υπόστρωμα 4Π0Κ παρουσίασε τις υψηλότερες τιμές αεροπερατότητας φυτοδοχείου (με ποσοστό που κυμαίνεται από 13.70 έως 28.38 % v/ v) σε σχέση με τις μεταχειρίσεις 3Π1Κ, 2Π2Κ, 3Κ1Π και 4Κ0Π (οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 6.18-19.03, 6.77-20.61, 7.72-21.66 και 3.74-17.43 % v/v, αντίστοιχα). Επιπλέον, η AAC αυξήθηκε αισθητά με την αύξηση του ύψους του υποδοχέα από 5 σε 25 cm. Γενικά, η αύξηση τόσο του κλάσματος περλίτη στο μίγμα όσο και του ύψους του υποδοχέα αύξησε την AAC και μείωσε την AWC.

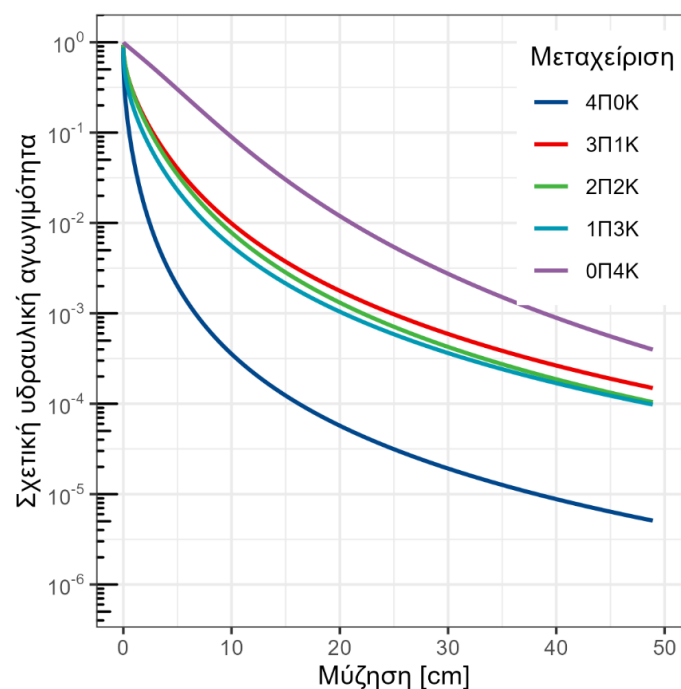
Πίνακας 10. Ειδικό φαινόμενο βάρος (BD), ενεργό πορώδες (EPS), υδατοϊκανότητα (WC; ποσοστιαία περιεκτικότητα νερού σε μύζηση 10 cm), εύκολα διαθέσιμο νερό (EAW; ποσοστιαία περιεκτικότητα νερού σε μύζηση μεταξύ 10 και 50 cm), ρυθμιστική χωρητικότητα σε νερό (WBC; Ποσοστιαία περιεκτικότητα νερού σε μύζηση 50 και 100 cm) και αεροπερατότητα (AC; ποσοστιαία περιεκτικότητα σε νερό μεταξύ 0 και 10 cm μύζησης) στα υποστρώματα κοκοφοίνικα (4Κ0Π), περλίτη (0Κ4Π) και μιγμάτων τους (3Κ1Π, 2Κ2Π, και 1Κ3Π)

Υποστρώματα	BD [g cm ⁻³]	EPS [%]	WC [%]	EAW [%]	WBC [%]	AC [%]
4Π0Κ	0.093 c	0.668 b	0.385 c	0.127 d	0.039 c	0.296 a
3Π1Κ	0.096 c	0.673 b	0.501 b	0.184 c	0.067 a	0.169 c
2Π2Κ	0.111 b	0.649 b	0.459 b	0.178 c	0.050 b	0.242 b
1Π3Κ	0.117 b	0.792 a	0.594 a	0.197 b	0.068 a	0.189 c
0Π4Κ	0.136 a	0.768 a	0.634 a	0.277 a	0.066 a	0.134 d

Οι τιμές σχετικής υδραυλικής αγωγιμότητας (K_r) παρουσιάζουν μια απότομη μείωση της K_r καθώς η μύζηση αυξήθηκε από 0 σε περίπου 10 cm (Εικόνα 20). Ο σκέτος περλίτης (4Ρ0C) παρουσίασε τον μεγαλύτερο ρυθμό πτώσης του K_r με την παράλληλη αύξηση της μύζησης, ενώ ο κοκοφοίνικας (4C0P) παρουσίασε τον μικρότερο ρυθμό πτώσης του K_r με την αύξηση του θ . Επιπλέον, ο ρυθμός πτώσης της K_r με την αύξηση της μύζησης για τα μίγματα υποστρώματος 3P1C, 2C2P και 3C1P κυμάνθηκε μεταξύ των υποστρωμάτων 4C0P και 4P0C, αλλά οι διαφορές μεταξύ τους ήταν σχετικά μικρές. Σύμφωνα με την Εικόνα 20 γίνεται προφανές ότι τα μίγματα υποστρωμάτων που εξετάστηκαν είχαν πολύ μικρές διαφορές μεταξύ τους ενώ ο κοκοφοίνικας είχε γενικά καλύτερη υδραυλική απόδοση.

Όπως δείχνει ο Πίνακας 11, τα φυτά που αναπτύχθηκαν στα υποστρώματα 4Κ0Π, 1Π3Κ και 2Π2Κ εμφάνισαν σημαντικά υψηλότερο νωπό βάρος φύλλων (WFL: 467.65±26.46, 426.01±26.06, και

407.80±26.06 g φυτό⁻¹, αντίστοιχα), σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις υποστρώματος 3Π1Κ και 4Π0Κ (317.31±26.46 και 164.64±26.46 g φυτό⁻¹, αντίστοιχα). Επιπλέον, η μεταχείριση 4Κ0Π παρουσίασε σημαντική αύξηση στο νωπό βάρος ρίζας (WFR: 123,65±5,85 g φυτό⁻¹) σε σύγκριση με τις επεμβάσεις 2Κ2Π, 3Π1Κ και 4Π0Κ (105.02±5.85, 102.04 g και ± 5.85 g φυτό⁻¹, αντίστοιχα), όχι όμως και με την επέμβαση 3Κ1Π (117.50±5.85 g φυτό⁻¹). Αντίστοιχα, το μήκος της ρίζας (LR) αυξήθηκε σημαντικά στο υπόστρωμα 4Κ0Π σε σύγκριση με το 4Π0Κ (17.27±0.53 και 15.15±0.53 cm, αντίστοιχα) όπως επίσης στο φυτοδοχείο σε σύγκριση με τον σάκο (18.01±0.33 και 14.52±0.33 cm, αντίστοιχα). Επίσης παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της διαμέτρου της ροζέτας (RD_L) στις επεμβάσεις 4Κ0Π, 3Κ1Π και 2Κ2Π (94.00±2.09, 91.00±2.09, και 88.54±2.09 cm φυτό⁻¹, αντίστοιχα) σε σύγκριση με τις επεμβάσεις 3Π1Κ και 4Π0Κ (77.40±2.09 και 58.88±2.09 cm φυτό⁻¹, αντίστοιχα). Ωστόσο, η φυλλική επιφάνεια (LA) παρουσιάστηκε σημαντικά αυξημένη μόνο στην επέμβαση 4Κ0Π (88.81±2.09 cm²) σε σύγκριση με τον μάρτυρα-περλίτη (87.30±1.60 cm²) και τα τρία μίγματα υποστρωμάτων (**Πίνακας 11**). Επιπλέον, παρόλο που ο σχετικός φθορισμός (Fv/Fm) δεν επηρεάστηκε από τα μίγματα υποστρωμάτων, η χρήση του σάκου ως υποδοχέα αύξησε σημαντικά το Fv/Fm σε σύγκριση με το φυτοδοχείο-γλάστρα (0.733±0.065 και 0.709±0.065, αντίστοιχα).

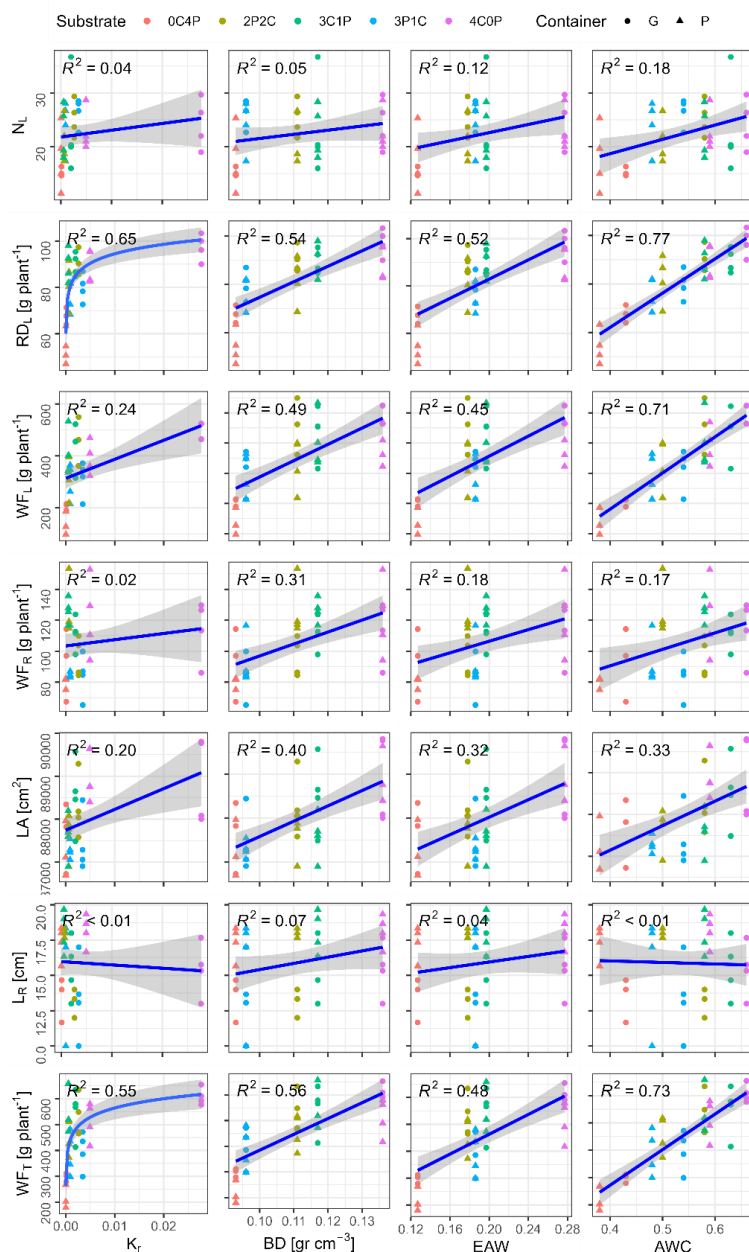


Εικόνα 20. Σχετική υδραυλική αγωγιμότητα K_r των περλίτη (0Κ4Π) 0.5- 5.0 mm, κοκοφοίνικα (0Π4Κ) και των μιγμάτων τους (1Π3Κ, 2Π2Κ, 3Π1Κ) ως συνάρτηση της μύζησης ή του ύψους του υποδοχέα. Οι καμπύλες προσδιορίστηκαν σύμφωνα με την Εξ. (6).

Πίνακας 11. Αποτελέσματα ποσοτικών παραμέτρων παραγοντικής ανάλυσης του μίγματος κοκοφοίνικα και περλίτη και του τύπου υποδοχέα υδροπονικής καλλιέργειας σκόλυμπρον, 100 ημέρες μετά την μεταφύτευση (HMM). Οι συντομογραφίες (NL), (WFL), (WFR), (LR) and (RDL) υποδηλώνουν τον αριθμό φύλλων, νωπό βάρος φύλλων [g], νωπό βάρος κονδυλόριζας [g], διάμετρος ροζέτας [cm], αντίστοιχα. Μέσες τιμές στην ίδια στήλη ακολουθούμενα από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμή πολλαπλού εύρους του Duncan σε επίπεδο σημαντικότητας 5%. Το επίπεδο σημαντικότητας συμβολίζεται με n.s., μονό ή διπλό αστερίσκο για απουσία διαφοράς, διαφορά σε επίπεδο σημαντικότητας $P < 0,05$ και $P < 0,01$, αντίστοιχα.

Υποστρώματα	N _L	WFL [g]	WFR [g]	RDL [cm]	LR [cm]	LA [cm ²]	Fv/Fm	Chl [mg g ⁻¹ FW] a	Chl [mg g ⁻¹ FW] b	Total Chl [mg g ⁻¹ FW]
4Π0Κ	16.46 b	164.64 c	84.00 c	58.88 c	17.27 a	87.30 b	0.728 a	0.25 a	0.11 a	0.35 a
3Π1Κ	23.58 a	317.31 b	102.04 b	77.40 b	16.58 ab	87.37 b	0.717 a	0.23 a	0.10 a	0,33 a
2Κ2Π	25.04 a	407.80 a	105.02 b	88.54 a	16.37 ab	88.06 b	0.718 a	0.26 a	0.12 a	0,38 a
3Κ1Π	24.11 a	426.01 a	117.50 ab	91.00 a	15.95 ab	88.03 b	0.724 a	0.29 a	0.13 a	0,42 a
4Κ0Π	24.71 a	467.65 a	123.65 a	94.00 a	15.15 b	88.81 a	0.716 a	0.24 a	0.11 a	0,34 a
Level of Significance	*	**	**	**	*	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Σάκος	23.75 a	392.10 a	100.16 b	85.47 a	14.52 b	88.07 a	0.734 a	0.27 a	0.13 a	0.40 a
Γλάστρα	21.42 a	321.27 b	112.87 a	78.47 b	18.01 a	87.75 a	0.709 b	0.25 a	0.11 a	0.36 a
Level of Significance	n.s.	*	*	*	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Υπόστρωμα × Υποδοχέα	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε γραμμική και η λογαριθμική παλινδρόμηση σε όλα τα ζεύγη των υδραυλικών παραμέτρων και η ανάλυση παλινδρόμησης των φυσικο-υδραυλικών χαρακτηριστικών του υποστρώματος και των παραμέτρων απόδοσης του φυτού και σύμφωνα με τα αποτελέσματα εμφανίζεται δυνατή συσχέτιση ($R^2 \geq 0.70$) μεταξύ των AWC με τα WF_T , WF_L και DR_L και μέτρια συσχέτιση ($0.70 \geq R^2 \geq 0.45$) των K , BD και EAW με τα WF_T , WF_L και DR_L . Αντιθέτως, χαμηλό ήταν το επίπεδο συσχέτισης των παραμέτρων συνολικής απόδοσης L_R , WF_R και N_L με τις υδραυλικές παραμέτρους K , BD , EAW και AWC .



Εικόνα 21. Ανάλυση παλινδρόμησης μεταξύ των παραμέτρων απόδοσης (WF_T , L_R , LA , WF_R , WF_L , RD_L και N_L) και των φυσικών (BD) και υδραυλικών ιδιοτήτων (K , EAW και AWC) του υποστρώματος. Οι μεταχειρίσεις υποστρώματος (0K4Π, 3K1Π, 2K2Π, 1K3Π και 4K0Π) παρουσιάζονται με διαφορετικά χρώματα. Οι τύποι των υποδοχών απεικονίζονται με διαφορετικό σχήμα των σημείων της καμπύλης (οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν μετρήσεις σε σάκο και με τρίγωνο σε γλάστρα). Η σχέση μεταξύ φυσιολογικών παραμέτρων και των παραμέτρων BD , EAW και AWC

μοντελοποιήθηκε με γραμμική παλινδρόμηση, ενώ η K με λογαριθμική παλινδρόμηση.

Η αξιολόγηση της θρεπτικής κατάστασης των φυτών δεν έδωσε καμία σημαντική επίδραση του τύπου υποστρώματος ή του ύψους του φυτοδοχείου στις συγκεντρώσεις των φύλλων σε ολικό-N, K, P, Ca, Mg, Mn και Cu (Πίνακας 12). Οι συγκεντρώσεις Fe και Zn στα φύλλα ήταν σημαντικά μειωμένες στα φυτά που καλλιεργήθηκαν σε κοκοφοίνικα (4Κ0Π) σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις, ενώ η συγκέντρωση βορίου στα φύλλα αυξήθηκε σημαντικά στις επεμβάσεις 4Κ0Π και 3Κ1Π σε σύγκριση με τις επεμβάσεις 2Κ2Π, 3Π1Κ και 4Π0Κ.

Πίνακας 12. Συγκεντρώσεις μακρο- και μικρο-θρεπτικών στοιχείων ($g\ kg^{-1}$ ξηρό βάρος) σε πλήρως ανεπτυγμένα φύλλα του *S. hispanicus*, 100 ημέρες μετά τη μεταφύτευση. Οι τιμές αποτελούν τον μέσο όρο 4 επαναλήψεων. Διαφορετικά γράμματα κάθε γραμμής υποδηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των υποστρωμάτων σε επίπεδο σημαντικότητας 5% σύμφωνα με τη δοκιμή πολλαπλού εύρους Duncan

Concentration	Substrate mixture				
	4P0C	3P1C	2P2C	1P3C	0P4C
N [$g\ kg^{-1}$]	31.70 a	32.40 a	32.00 a	30.20 a	28.30 a
P [$g\ kg^{-1}$]	16.00 a	14.30 a	13.63 a	12.65 a	10.97 a
K [$g\ kg^{-1}$]	84.00 a	80.00 a	78.67 a	74.25 a	72.33 a
Ca [$g\ kg^{-1}$]	17.00 a	17.00 a	16.00 a	16.00 a	16.00 a
Mg [$g\ kg^{-1}$]	5.50 a	5.50 a	4.96 a	4.80 a	4.70 a
Mn [$g\ kg^{-1}$]	0.02 a	0.02 a	0.02 a	0.02 a	0.01 a
Fe [$g\ kg^{-1}$]	0.16 a	0.15 a	0.11 b	0.10 bc	0.07 c
Cu [$g\ kg^{-1}$]	0.010 a	0.008 a	0.003 a	0.007 a	0.005 a
B [$g\ kg^{-1}$]	0.03 b	0.03 b	0.03 b	0.04 a	0.04 a
Zn [$g\ kg^{-1}$]	0.04 a	0.04 a	0.04 a	0.03 ab	0.02 b

4.4 Συζήτηση

4.4.1 Φυσικές και υδραυλικές ιδιότητες υποστρώματος

Ο κοκοφοίνικας και ο περλίτης παρουσίασαν σημαντική ετερογένεια ως προς τα φυσικά χαρακτηριστικά τους, όπως αποδεικνύεται από το φαινόμενο ειδικό βάρος και ενεργό πορώδες. Κατά συνέπεια, οι υδραυλικές ιδιότητες (WC, EAW και WBC) των δύο υποστρωμάτων ήταν επίσης σημαντικά διαφορετικές. Ωστόσο, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πειράματος οι υδραυλικές ιδιότητες των προσμίξεων μεταξύ τους (δηλαδή, 3Π1Κ, 2Κ2Π και 3Κ1Π) δεν αλλάζουν αναλογικά με το ποσοστό κοκοφοίνικα ή το κλάσμα περλίτη στο μείγμα. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως αποδίδεται στο ότι το μίγμα δύο υποστρωμάτων με διαφορετική κοκκομετρία

έχει ως αποτέλεσμα έναν τελικό όγκο μίγματος υποστρώματος μικρότερο από το άθροισμα του όγκου των αρχικών συστατικών τους (Bures et al., 1993; Gizas and Savvas, 2007). Επιπλέον, τα αποτελέσματα της μελέτης αποκάλυψαν ότι το νωπό βάρος του υπέργειου [WFL] και το νωπό υπόγειο μέρος [WFR] ήταν σημαντικά υψηλότερα στις μεταχειρίσεις υποστρώματος 4Κ0Π, 3Κ1Π και 2Κ2Π σε σύγκριση με τα 3Π1Κ και 4Π0Κ που θα μπορούσαν να αποδοθούν εν μέρη στο αυξημένο επίπεδο σε εύκολα διαθέσιμο νερό (EAW) του κοκοφοίνικα όπως φαίνεται στον **Πίνακας 10**. Πράγματι, το EAW αυξήθηκε κατά 44,88, 40,16, 55,12 και 118,11 % στα μίγματα υποστρώματος 3Π1Κ, 2Π2Κ, 3Κ1Π και 4Κ0Π, αντίστοιχα, σε σύγκριση με τον μάρτυρα (4Π0Κ). Αντίστοιχα, κατά τη σύγκριση του επιπέδου αεροπερατότητας του μίγματος των υποστρωμάτων, οι χαμηλότερες τιμές παρουσιάστηκαν στο υπόστρωμα 4Κ0Π, ακολουθούμενο από το 3Κ1Π και το 3Π1Κ, ενώ τα υψηλότερα επίπεδα σημειώθηκαν στα υποστρώματα 4Π0Κ και 2Π2Κ. Ωστόσο, η υψηλότερη συνολική απόδοση καταγράφηκε στα φυτά ασκόλυμπρου που αναπτύχθηκαν στο υπόστρωμα 4Κ0Π, και μετά από το 3Κ0Π και 2Κ2Π, η οποία αποτελεί σαφή ένδειξη ότι η ανάπτυξη των φυτών δεν περιοριζόταν από τη διαθεσιμότητα αέρα των υπο διερεύνηση υποστρωμάτων, αλλά πιθανώς από την διαθεσιμότητα σε νερό.

Σύμφωνα με την ΧΚΥ του κοκοφοίνικα, του περλίτη και των μιγμάτων τους (Εικόνα 18), η μείωση της ποσοστιαίας περιεκτικότητας σε υγρασία συνοδεύεται από μια απότομη αύξηση της μύζησης. Πρόσφατα, οι (Gohardoust et al., 2020) εξέτασαν τις υδραυλικές ιδιότητες του κοκοφοίνικα χρησιμοποιώντας παρόμοια μεθοδολογία για την ανάλυση των υδραυλικών ιδιοτήτων, η εκτίμηση της ΧΚΥ είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης με θ_s , θ_r , n και α που αντιστοιχεί σε τιμές 0,87, 0,01, 1,29 και 0,06, αντίστοιχα. Επιπλέον, οι (Londra et al., 2018), εξέτασε την επίδραση των υδραυλικών ιδιοτήτων του υποστρώματος κοκοφοίνικα στην ανάπτυξη της Μπιγκόνιας και διαπίστωσε ότι οι μοντελοποιημένες παράμετροι των θ_s , θ_r , n και α ήταν 0.92, 0.18, 1.73 και 0.12, αντίστοιχα. Παρόλο που αυτά τα αποτελέσματα δεν είναι πανομοιότυπα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη παρούσα μελέτη (0,77, 0,22, 1,90 και 0,09, αντίστοιχα), οι μικρές διαφορές μπορούν να αποδοθούν στη ετερογένεια που σχετίζεται με την προέλευση του κοκοφοίνικα και τις διαφορές στην επεξεργασία της από του εκάστοτε προμηθευτές (Carlile et al., 2015; Konduru et al., 1999). Η ΧΚΥ του περλίτη έχει εκτιμηθεί προηγουμένως από αρκετούς ερευνητές (Gohardoust et al., 2020; Orozco and Marfà, 1995) οι οποίοι αναφέρουν παρόμοια αποτελέσματα με αυτά που εκτιμήθηκαν στην παρούσα μελέτη (Londra, 2010). Ωστόσο, οι αναφορές σχετικά με την εκτίμηση της ΧΚΥ σε μίγματα υποστρωμάτων όπως του κοκοφοίνικα και του περλίτη είναι ανεπαρκείς.

4.4.2 Σχετική υδραυλική αγωγιμότητα

Η έννοια του εύκολα διαθέσιμου νερού (EAW) έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στο παρελθόν για την αξιολόγηση της διαθεσιμότητας νερού στα φυτά (Gabriel et al., 2009; Heiskanen, 1995; Londra et al., 2018). Ωστόσο, πρόσφατες επιστημονικές μελέτες αναφέρουν ότι αυτός ο δείκτης δεν επαρκεί για να περιγράψει επαρκώς τις αλλαγές στη διαθεσιμότητα νερού, ούτε χρονικά αλλά ούτε και χωρικά εντός της εδαφικής μήτρας (Al Naddaf et al., 2011; Gizas and Savvas, 2007; Peng et al., 2020). Η πρόσληψη νερού από τα φυτά μπορεί να προκαλέσει απότομη πτώση της ποσοστιαίας περιεκτικότητας του στην εδαφική μήτρα εάν αντίστοιχα δεν τροφοδοτείται με επαρκώς υψηλούς ρυθμούς αναπλήρωσης στο επίπεδο της ριζόσφαιρας. Επομένως, η διαθεσιμότητα νερού για τα φυτά εξαρτάται όχι μόνο από την παρουσία επαρκούς ποσότητας νερού που συγκρατείται σε αρκετά χαμηλό επίπεδο μύζησης στο έδαφος αλλά και από την ικανότητα του νερού να κινείται αρκετά γρήγορα στην επιφάνεια πρόσληψης από τα φυτά (ριζικά τριχίδια). Συνεπώς, η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα είναι μια έννοια που εισήχθη για να περιγράψει τον ρυθμό ροής του νερού (σε ακόρεστες συνθήκες) σε ένα πορώδες μέσο (και στη συνέχεια από το υπόστρωμα προς τη ρίζα) και εκφράζεται ως συνάρτηση της μέσης χωρικής και χρονικής μύζησης (h_i). Σε συμφωνία με τα παραπάνω, οι Wallach and Raviv (2005) διαπίστωσαν ότι η απότομη πτώση της ακόρεστης υδραυλικής αγωγιμότητας που προκαλείται από τη μείωση της ποσοστιαίας περιεκτικότητας σε νερό περιορίζει τη διαθεσιμότητα νερού για τα φυτά πολύ πριν οι επιπτώσεις μη επαρκούς εύκολα διαθέσιμου νερού είναι εμφανείς στα φυτά. Αυτή η θεωρία υποστηρίζεται και από τα ευρήματα της παρούσας εργασίας κατά την οποία παρατηρήθηκε απότομη πτώση της K_r με την παράλληλη μείωση της περιεκτικότητας σε νερό (θ) (Εικόνα 20). Σε συμφωνία με τις προηγούμενες αναφορές, οι διαφορές στο νωπό βάρος στα φύλλα και την ρίζα (WF_L και WF_R) ήταν σε μεγάλο βαθμό ανάλογες με τον ρυθμό μείωσης της K_r με την αύξηση της μύζησης μεταξύ των μιγμάτων υποστρώματος που δοκιμάστηκαν (Πίνακας 9). Αντίστοιχα, ευρήματα έχουν αναφερθεί και από τους Gizas et al., (2012) οι οποίοι εξέτασαν την επίδραση των υδραυλικών χαρακτηριστικών του κοκοφοίνικα και μίγματος με ελαφρόπετρα στην ανάπτυξη μαρουλιού υδροπονικής καλλιέργειας και σύμφωνα με τα αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι οι διαφορές στον ρυθμό μείωσης της K_r μεταξύ των υποστρωμάτων ήταν ανάλογες με τις διαφορές στο νωπό βάρος του φυτού.

4.4.3 Υδραυλικές ιδιότητες υποδοχεία

Σε υδατοχωρητικότητα φυτοδοχείου, η μύζηση [cm] που ασκείται στο νερό σε ένα συγκεκριμένο σημείο στην μήτρα ενός υποστρώματος στο φυτοδοχείο ισούται με το ύψος [cm] του υποδοχεία από τον πυθμένα του φυτοδοχείου, ενώ η περιεκτικότητα σε νερό μειώνεται σύμφωνα με την ΧΚΥ (Michel, 2009; Peng et al., 2020). Η απότομη μείωση του K_r με την αντίστοιχη αύξηση της μύζησης

από 0 έως 20 cm στα εξεταζόμενα υποστρώματα (Εικόνα 20) είναι σε αντιστοιχία με προηγούμενα αποτελέσματα για τα υποστρώματα τύρφης, σκωρίας και ελαφρόπετρας (Gizas and Savvas, 2007; Raviv et al., 2001; Wallach and Raviv, 2005). Ο Πίνακας 10 παρουσιάζει την υδατοχωρητικότητα και αεροπερατότητα του φυτοδοχείου, όπως επηρεάζεται από το ύψος του υποστρώματος στο φυτοδοχείο που χρησιμοποιήθηκε. Από τα δεδομένα που εμφανίζει ο Πίνακας 10, διαπιστώνεται ότι η υδατοχωρητικότητα φυτοδοχείου είναι μεγαλύτερη από την περιεκτικότητα σε νερό του υποστρώματος σε μύζηση 10 cm και η αεροπερατότητα φυτοδοχείου είναι μικρότερη από την περιεκτικότητα του υποστρώματος σε αέρα σε μύζηση 10 cm σε όλες τις μεταχειρίσεις υποστρώματος, όταν το ύψος του φυτοδοχείου είναι μικρότερο από 20 cm. Ως εκ τούτου, η θεωρία που εισήχθη από τους de Boodt and Verdonck, (1972) ορίζοντας το νερό που συγκρατείται στα 10 cm ως «υδατοχωρητικότητα φυτοδοχείου» δεν περιγράφει με ακρίβεια την πραγματική περιεκτικότητα σε νερό των υπό διερεύνηση υποστρωμάτων σε κατάσταση υδατοϊκανότητας, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι τύποι φυτοδοχείων που συνήθως χρησιμοποιούνται σε καλλιέργειες εκτός εδάφους δεν υπερβαίνουν το ύψος των 20 cm. Επιπλέον, οι Clausnitzer and Horpmans, (1994) αναφέρουν ότι η αυξάνοντας την περιεκτικότητα σε νερό στο έδαφος μειώνεται η μηχανική αντίσταση του εδάφους και έτσι οι ρίζες τείνουν να αναπτύσσονται προς τις πιο υγρές περιοχές πιο εύκολα. Αντίστοιχα, η σταδιακή μείωση της υδατοχωρητικότητας του φυτοδοχείου και της K_r καθώς το ύψος του φυτοδοχείου αυξάνεται από 5 σε 25 cm ήταν πιθανώς ο κύριος λόγος για την αύξηση του L_R και FW_R στις γλάστρες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρήσεις στους σάκους καλλιέργειας. Επομένως, τα αποτελέσματά υποστηρίζουν την υπόθεση ότι το μοτίβο κατανομής της ρίζας μιμείται την κατανομή υγρασίας στα υποστρώματα που εξαρτάται από την γεωμετρία του φυτοδοχείου, ένα μορφολογικό χαρακτηριστικό που προέρχεται από τη γεωτροπική και υδροτροπική φύση των ριζών και ευνοούν το σχηματισμό την ανάπτυξη της ρίζας στον πυθμένα του φυτοδοχείου (Balliu et al., 2021; Bengough et al., 2006; Chapman et al., 2012). Κατά συνέπεια, ο σάκος ευνόησε την ανάπτυξη των φύλλων (FW_L) επειδή η ροή του νερού προς το ριζικό σύστημα ήταν ευκολότερη (υψηλότερο K_r) μέσω των πόρων του υποστρώματος. Επιπλέον, η υδατοχωρητικότητα του σάκου ήταν υψηλότερη από ότι στη γλάστρα (ως αποτέλεσμα του χαμηλότερου ύψους υποστρώματος στο καλλιέργειας σε σύγκριση με αυτό στη γλάστρα για τον ίδιο όγκο υποστρώματος), οδηγώντας σε μειωμένη υδατική καταπόνηση, όπως υποδεικνύεται από και από τα αποτελέσματα της μέγιστης φωτοχημικής απόδοσης (F_v/F_m) που παρουσιάζει ο Πίνακας 11.

4.4.4 Θρεπτική κατάσταση του φυτού

Με στόχο την διερεύνηση της επίδρασης των υδραυλικών ιδιοτήτων των υποστρωμάτων στην ανάπτυξη των φυτών, η συνταγή θρέψης και η ημερήσια παροχή νερού ήταν πανομοιότυπες σε όλες τις επεμβάσεις του πειράματος. Επιπλέον, η συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων που προσδιορίστηκε σε ξηρή βιομάζα πλήρως εκπτυγμένων φύλλων του ασκόλυμπρου δεν έδειξε σημαντικές διαφορές στη θρεπτική κατάσταση των φυτών μεταξύ των υποστρωμάτων, εκτός από τις συγκεντρώσεις Fe και Zn, οι οποίες εμφανίστηκαν σημαντικά αυξημένες στο υπόστρωμα όπου το κλάσμα περλίτη ξεπερνούσε το 50% στο μίγμα και το B το οποίο αυξήθηκε σημαντικά στα υποστρώματα 4C0P και 3C1P σε σύγκριση με τα 2C2P, 3P1C και 4P0C (**Πίνακας 12**). Ωστόσο, παρά τις διαφορές, οι συγκεντρώσεις των φύλλων σε Fe, Zn και B ήταν εντός του επιθυμητού εύρους επάρκειας (Bryson et al., 2014) σε όλες τις επεμβάσεις και κανένα από τα υπό διερεύνηση υποστρώματα δεν εμφάνισε ορατά συμπτώματα τροφοπενίας σε ιχνοστοιχεία κατά την περίοδο καλλιέργειας. Κατά συνέπεια, οι διαφορές απόδοσης μεταξύ των επεμβάσεων δεν μπορούν να αποδοθούν σε αποκλείσεις στην συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων και πιθανώς προκύπτουν από τις μεγάλες διαφορές στις υδραυλικές ιδιότητες και τη γεωμετρία των φυτοδοχείων των υπό μελέτη υποστρωμάτων.

4.4.5 Παραγωγή και φωτοσυνθετική ικανότητα του φυτού

Η συγκέντρωση χλωροφύλλης των φύλλων (Chl_a , Chl_b και Chl_{a+b}), όπως παρουσιάζει ο **Πίνακας 11**, δεν φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από τα μίγματα υποστρώματος και τη γεωμετρία του φυτοδοχείου (Chl_a , Chl_b και Ολικό Chl_{a+b}). Ωστόσο, ο σχετικός φθορισμός (F_v/F_m) μειώθηκε σημαντικά στο φυτοδοχείο (γλάστρα) σε σύγκριση με τον σάκο. Αυτή η μείωση στο F_v/F_m μπορεί εν μέρει να εξηγήσει τη μείωση τόσο του WF_L όσο και του RD_L στα φυτά που καλλιεργήθηκαν σε γλάστρες σε σύγκριση με αυτά που καλλιεργήθηκαν σε σάκους, καθώς η μείωση της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας (F_v/F_m) σχετίζεται με μειωμένους ρυθμούς αφομοίωσης φωτοσυνθετικού CO_2 και ταυτόχρονα σε μειωμένη συσσώρευση βιομάζας (Dahal et al., 2019; Gorbe and Calatayud, 2012; Guerfel et al., 2009; Shah et al., 2017). Η απουσία σημαντικών διαφορών σε F_v/F_m μεταξύ των επεμβάσεων υποστρώματος, η οποία έρχεται σε αντίθεση με τις σημαντικές διαφορές σε F_v/F_m μεταξύ των δύο υποδοχέων, δείχνει ότι το ύψος του φυτοδοχείου μπορεί να έχει σημαντικότερο αντίκτυπο στην απόδοση ενός υποστρώματος από τις φυσικές και υδραυλικές ιδιότητες του υποστρώματος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, το F_v/F_m επηρεάστηκε έντονα από την υδατική καταπόνηση λόγω της απότομης μείωσης της περιεκτικότητας σε νερό στο ανώτερο στρώμα του υποστρώματος όταν τοποθετούνται σε ψηλά φυτοδοχεία. Επίσης, τα αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με εκείνα των Amoroso et al., (2011) οι

οποίοι αξιολόγησαν την επίδραση τριών διαφορετικών τύπων υποδοχέων στην ανάπτυξη των φυτών και στην «αρχιτεκτονική» της ρίζας του *Ulmus minor*.

Η ανάμειξη περλίτη με κοκοφοίνικα αύξησε σημαντικά τις παραμέτρους απόδοσης (FW_L , FW_R και RD_L) του *S. hispanicus* L. σε σύγκριση με την καλλιέργεια σε σκέτο περλίτη (4Π0Κ), με τις διαφορές να είναι πιο σημαντικές όταν το ποσοστό κοκοφοίνικα στο μίγμα ξεπέρασε το 50%. Οι (Klados and Tzortzakis, 2014) διερεύνησαν την επίδραση διαφορετικών ανόργανων υποστρωμάτων στο *Cichorium spinosum* L. και διαπίστωσαν ότι η καλλιέργεια σε περλίτη, ελαφρόπετρα και πετροβάμβακα ενίσχυσε την παραγωγή φυτικής μάζας σε σύγκριση με την καλλιέργεια στην άμμο, η οποία αποδόθηκε σε μια πιο ευνοϊκή ισορροπία αέρα και συγκράτησης νερού. Ομοίως, οι (Petropoulos et al., 2019) εξέτασαν τη δυνατότητα αξιοποίησης δύο υποπροϊόντων βιομηχανικής καλλιέργειας του ζαχαρότευτλου και του βαμβακιού, και μίγματα τους με ζεόλιθο αντικαθιστώντας τη χρήση τύρφης υδροπονικής καλλιέργειας του *C. spinosum* L. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η καλλιέργεια σε μίγματα υποστρώματος που περιείχαν αυτά τα δύο υποπροϊόντα ενίσχυσαν σημαντικά τις παραμέτρους ανάπτυξης των φυτών, λόγω της βελτιωμένης ικανότητας συγκράτησης και καλύτερης διαθεσιμότητας του νερού σε αυτά τα μίγματα σε σύγκριση με την τύρφη.

Η γεωμετρία των φυτοδοχείων φάνηκε να επηρεάζει σημαντικά την αναλογία FW_L/FW_R στα φυτά του ασκόλυμπρου. Η μείωση του κλάσματος FW_L/FW_R έχει αναφερθεί ως δείκτης υδατικού στρες στα φυλλώδη λαχανικά (Chondraki et al., 2012; Klados and Tzortzakis, 2014; Westgate and Boyer, 1985). Όπως φαίνεται στον **Πίνακα 12**, η καλλιέργεια του *S. hispanicus* L. στη γλάστρα μείωσε το FW_L [g φυτού⁻¹] ενώ αύξησε το FW_R [g φυτού⁻¹] σε σύγκριση με τους σάκους, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο σημαντικά την αναλογία FW_L/FW_R . Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα συμφωνούν με εκείνα των (Charman et al., 2012), οι οποίοι αναφέρουν ότι η ανάπτυξη της ρίζας σχετίζεται με την παροχή νερού λόγω υδροτροπισμού και ότι η ανάπτυξη της ρίζας σε σχέση με την ανάπτυξη των φύλλων αυξάνεται καθώς μειώνεται το υδατικό δυναμικό του εδάφους ανεξαρτήτως από τη διαθεσιμότητα νιτρικών στη ριζόσφαιρα. Αυτή η θεωρία επιβεβαιώθηκε από τους Gallegos et al., (2020) οι οποίοι διερεύνησαν την επίδραση της γεωμετρίας του δοχείου στην βλαστική ανάπτυξη και στην ανάπτυξη του ριζικού συστήματος της τομάτας, του αγγουριού και της πιπεριάς και διαπίστωσε ότι η γεωμετρία του υποδοχέα μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη βιομάζα των ριζών αποτρέποντας παράλληλα μηχανικά προβλήματα κατά την ανάπτυξή τους. Επιπλέον, τα αποτελέσματα πρόσφατης μελέτης που διεξήχθη για την αξιολόγηση της επίδρασης του μεγέθους της κοκκομετρίας του περλίτη σε υδροπονική καλλιέργεια καρότου υποδηλώνουν ότι τα φυτά που αναπτύσσονται σε περλίτη κοκκομετρίας 1.2 mm αύξησαν περίπου κατά 15-28% (ανάλογα με τη

σύνθεση του θρεπτικού διάλυμα) το νωπό και ξηρό βάρος της ρίζας σε σύγκριση με τα φυτά που καλλιεργήθηκαν σε περλίτη με κοκκομετρία 5.0 mm. Αυτή η σημαντική αύξηση στην βιομάζα της ρίζας αποδόθηκε στη μεγαλύτερη επιμήκυνση της ρίζας για να ξεπεραστεί η έλλειψη διαθεσιμότητας νερού που προκαλείται από το μεγαλύτερο μέγεθος των κόκκων και του αυξημένου ενεργού πορώδους του περλίτη σε σύγκριση με τα μικρότερα σωματίδια. Συνεπώς, τα αποτελέσματά της παρούσας μελέτης παρουσιάζουν παρόμοια αύξηση του L_R στο υπόστρωμα 4Π0Κ σε σύγκριση με το 4Κ0Π. Ωστόσο, αυτή η αύξηση του L_R δεν ήταν ανάλογη με το FW_R στα μίγματα υποστρωμάτων που δοκιμάστηκαν (**Πίνακας 11**), συμπεραίνοντας ότι το μήκος της ρίζας δεν σχετίζεται πάντα με το βάρος της.

4.4.6 Συσχέτιση παραμέτρων απόδοσης και υδραυλικών ιδιοτήτων του υποστρώματος

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από την ανάλυση παλινδρόμησης Εικόνα 21, είναι προφανές ότι το AWC έχει την δυνατή θετική συσχέτιση με τις παραμέτρους απόδοσης, σε σύγκριση με αυτές των υπόλοιπων υποστρωμάτων. Αυτό το αποτέλεσμα υποστηρίζει περαιτέρω την αρχική υπόθεση (βλ. Ενότητα 4.2) ότι το BD και το EAW, που συνήθως χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της υδραυλικής συμπεριφοράς των υποστρωμάτων, δεν είναι επαρκείς δείκτες για να περιγράψουν τις αλλαγές στη διαθεσιμότητα νερού του υποστρώματος και ταυτόχρονα την επίδραση των υποστρωμάτων στην απόδοση των φυτών. Ως εκ τούτου, η ακριβής εκτίμηση της ΧΚΥ είναι απαραίτητη για την ακριβή κατανόηση των γεωμετρικών και υδραυλικών ιδιοτήτων που επηρεάζουν τις βλαστική απόκριση των φυτών. Επιπλέον, από την **Εικόνα 21** γίνεται αντιληπτό ότι για κάθε τύπο υποστρώματος, οι τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών (ειδικά το K και το AWC) ομαδοποιούνται ανά υποδοχέα, με τον σάκο να εμφανίζει αυξημένες τιμές. Ειδικά στην περίπτωση του AWC, είναι προφανές ότι ο σάκος επιτρέπει στα υποστρώματα 0Κ4Π και 1Κ3Π να επιτύχουν υψηλότερες τιμές AWC και δεδομένης της γραμμικής συσχέτισης με το WF_L , σταθερά υψηλότερες τιμές WF_T . Λόγω της έλλειψης επεμβάσεων με ενδιάμεσο ύψος φυτοδοχείου (15-25 cm) στην παρούσα μελέτη, εμφανίζεται έλλειψη δεδομένων που παρατηρούνται στις τιμές K μεταξύ του σάκου και του φυτοδοχείου γλάστρας σε υπόστρωμα 4Κ0Π, είναι δυνατή η πλήρης ποσοτικοποίηση μεταξύ του ύψους του υποδοχέα του υποστρώματος και των υδραυλικών παραμέτρων και των παραμέτρων απόδοσης. Επίσης, από το Εικόνα 21 γίνεται αντιληπτό ότι οι τιμές συσχέτισης της K με τις παραμέτρους WF_T και DR_L τείνουν να φτάσουν σε ένα πλατό (περίπου πάνω από 0.005), υποδηλώνοντας ότι υπάρχει πιθανώς ένα όριο πάνω από το οποίο το K δεν ασκεί πλέον καμία επίδραση σε αυτές τις παραμέτρους. Ερμηνεύοντας τα αποτελέσματα της K , γίνεται προφανές ότι το υπόστρωμα 3Κ1Π μπορεί να υποκαταστήσει με ασφάλεια το

υπόστρωμα 4Κ0Π χωρίς να διακινδυνεύσει τη μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας του υποστρώματος το οποίο θα μπορούσε να οδηγήσει σε απώλειες απόδοσης.



Εικόνα 22. Συσκευή προσδιορισμού υδραυλικών ιδιοτήτων εδάφους - HYPROP2. Κεντρική μονάδα (αριστερά) και μονάδα πλήρωσης νερού (δεξιά).

Κεφάλαιο 5. Επίδραση μορφής και συνολικής συγκέντρωσης παρεχόμενου αζώτου σε καλλιέργεια ασκόλυμπρου σε ανοικτό υδροπονικό σύστημα

5.1 Εισαγωγή

Η αυξανόμενη ζήτηση τροφίμων και η μείωση της παραγωγής λόγω της κλιματικής αλλαγής, έχει ως συνέπεια τη μετάβαση από τις συμβατικές καλλιεργητικές πρακτικές σε πιο προηγμένα ελεγχόμενα συστήματα καλλιέργειας (Fussy and Papenbrock, 2022; Gruda, 2019; Putra and Yuliando, 2015). Η καλλιέργεια εκτός εδάφους συχνά αναφέρεται ως μια υποσχόμενη εναλλακτική λύση στα υπάρχοντα συστήματα καλλιέργειας που μπορούν να μεγιστοποιήσουν την απόδοση επιτρέποντας την βελτιστοποίηση της θρέψης και την καθετοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας (Majid et al., 2021; Nikolaou et al., 2021). Επίσης, καθώς τα συστήματα παραγωγής εκτός εδάφους συνεχίζουν να αποκτούν εξέχουσα θέση ως συστήματα καλλιέργειας κηπευτικών ειδών, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ακριβή προσαρμογή της ημερήσιας τροφοδοσίας θρεπτικών στοιχείων και νερού στις πραγματικές ανάγκες της καλλιέργειας, οι οποίες εξαρτώνται κυρίως από το στάδιο ανάπτυξης των φυτών και τις τρέχουσες κλιματικές συνθήκες του θερμοκηπίου, μειώνοντας έτσι το κόστος παραγωγής και ελαχιστοποιώντας την απώλεια νερού και θρεπτικών στοιχείων (Blok et al., 2023; Neocleous and Savvas, 2022). Επί του παρόντος, βιβλιογραφικά αναφέρονται μια σειρά από συνταγές θρέψης για τα περισσότερα είδη κηπευτικών και ανθοκομικών ειδών, οι οποίες έχουν υπολογιστεί πειραματικά σύμφωνα με τις συγκεντρώσεις απορρόφησης για το κάθε ξεχωριστό φυτικό είδος. Σε κάποια είδη φυτών, οι συνιστώμενες συνθέσεις θρεπτικών διαλυμάτων προσαρμόζεται ακόμη και σύμφωνα και με τις περιβαλλοντικές συνθήκες των διαφορετικών περιόδων καλλιέργειας τους (Neocleous and Savvas, 2022, 2015).

Τα ανώτερα φυτά χρειάζονται 17 θρεπτικά στοιχεία για να μπορέσουν να ολοκληρώσουν τον βιολογικό τους κύκλο, εννέα από τα οποία είναι απαραίτητα σε μεγάλες ποσότητες (C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S), ενώ τα υπόλοιπα 7 μόνο σε ίχνη (Fe, Zn, Mn, B, Cu, Mo, Cl, Ni) (Hu et al., 2021; Tsukagoshi and Shinohara, 2019). Το άζωτο, ως αναπόσπαστο μέρος της δομής και της λειτουργίας των πρωτεϊνών και του χλωροπλάστη, είναι το μακροθρεπτικό στοιχείο που χρειάζονται τα φυτά σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις και επομένως θεωρείται ένας από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων των καλλιεργειών (Krapp, 2015; Lin et al., 2022; Maaz et al., 2021; Nikolaou et al., 2021). Είναι αποδεδειγμένο ότι η συγκέντρωση αζώτου συσχετίζεται με την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη των φύλλων και τη φωτοσυνθετική ικανότητα και ως εκ τούτου έχει ισχυρά θετική επίδραση στην ανάπτυξη της φυλλικής επιφάνειας, η οποία

αποτελεί σημαντική παράμετρο στην εμπορική παραγωγή φυλλωδών λαχανικών όπως το σπανάκι και το μαρούλι (Ciriello et al., 2021; Croft et al., 2020; Gillespie et al., 2021; Jia et al., 2021; Mu and Chen, 2021; Sapkota et al., 2019). Ως εκ τούτου, η επαρκής τροφοδοσία αζώτου αποτελεί προϋπόθεση για τη διασφάλιση των μέγιστων αποδόσεων σε φυλλώδεις καλλιέργειες λαχανικών. Ωστόσο, η υπερβολική εφαρμογή N μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις, τόσο στα ποιοτικά, όσο και στα θρεπτικά χαρακτηριστικά των φυτών, όπως η μείωση της μετασυλλεκτικής διατηρησιμότητας και συσσώρευση επιβλαβών για την ανθρώπινη υγεία νιτρικών στα βρώσιμα μέρη του φυτικού ιστού. Επιπλέον, η υπερβολική τροφοδοσία N έχει ως αποτέλεσμα και αντίστοιχα μεγάλη έκπλυση νιτρικών αλάτων με συνέπεια τη ρύπανση των υδάτινων αποδεκτών (Ahmed et al., 2020; Htwe and Ruangrak, 2021; Zendehbad et al., 2022).

Η πηγή του αζώτου που τροφοδοτείται στις καλλιέργειες διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ισορροπία κατιόντων/ανιόντων του φυτού. Τα κύρια θρεπτικά κατιόντα που αφομοιώνονται από τα φυτά είναι τα K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} και NH_4^+ , ενώ τα κύρια θρεπτικά ανιόντα είναι τα NO_3^- , $H_2PO_4^-$ και SO_4^{2-} . Για την εξισορρόπηση του ηλεκτροχημικού φορτίου, τα κύτταρα της ρίζας τείνουν να απορροφούν κατιόντα και ανιόντα σε ισοδύναμη αναλογία ($meq\ meq^{-1}$) 1:1, ενώ οι μικρές αποκλίσεις αντισταθμίζονται με απέκκριση H^+ εάν τα συνολικά κατιόντα υπερβαίνουν τον συνολικό ρυθμό απορρόφησης ανιόντων, και OH^- και/ή HCO_3^- , εάν ο συνολικός ρυθμός απορρόφησης κατιόντων είναι χαμηλότερος από αυτόν των ανιόντων (Savvas and Gruda, 2018). Όταν και οι δύο διαθέσιμες πηγές αζώτου (NH_4^+ , NO_3^-) υπάρχουν στο διάλυμα τροφοδοσίας, τα φυτά προσλαμβάνουν κατά προτίμηση NH_4^+-N , καθώς η αφομοίωσή του συνεπάγεται λιγότερη κατανάλωση ενέργειας (Raab and Terry, 1994). Έτσι, μια αύξηση της αναλογίας τροφοδοσίας $NH_4^+ : NO_3^-$, και ταυτόχρονα της διαθεσιμότητας NH_4^+ , αυξάνει τον ρυθμό πρόσληψης του NH_4^+-N ενώ μειώνει τον ρυθμό απορρόφησης του $NO_3^- -N$. Ως αποτέλεσμα, η συνολική αναλογία πρόσληψης κατιόντων προς τα ανιόντα, δηλ. $(K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + NH_4^+) : (NO_3^- + H_2PO_4^- + SO_4^{2-})$ σε ισοδύναμους όρους, αλλάζει ανάλογα. Για να προσαρμοστούν σε αυτή την αλλαγή, τα ριζικά κύτταρα εκκρίνουν ιόντα H^+ στοχεύοντας στην διατήρηση της ηλεκτροχημικής ισορροπίας στο κυτταρόπλασμα, τα οποία μειώνουν το pH στο διάλυμα ριζοστρώματος (Dickson et al., 2016; Savvas et al., 2003). Αντίστροφα, μια μείωση της αναλογίας τροφοδοσίας $NH_4^+ : NO_3^-$ και ταυτόχρονη μείωση του ρυθμού απορρόφησης NH_4^+-N (αύξηση της πρόσληψης $NO_3^- -N$) γίνεται απέκκριση OH^- και/ή HCO_3^- οπότε αυξάνει το pH στο ριζόστρωμα καθώς και τα δύο έχουν αλκαλική δράση. Κατά συνέπεια, η αύξηση ή η μείωση της αναλογίας μεταξύ των δύο πηγών N που χρησιμοποιούνται για τη λίπανση των καλλιεργειών εκτός εδάφους έχει σημαντική επίδραση στο pH του διαλύματος ριζοστρώματος. Επομένως, σε εμπορικά συστήματα εκτός εδάφους

καλλιέργειας, η προσαρμογή της αναλογίας $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ στο θρεπτικό διάλυμα χρησιμοποιείται ως εργαλείο διαχείρισης του pH (Ferrón-Carrillo et al., 2021).

Καθώς τα συστήματα παραγωγής εκτός εδάφους συνεχίζουν να αποκτούν εξέχουσα θέση ως συστήματα καλλιέργειας λαχανευόμενων ειδών, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ακριβή προσαρμογή της ημερήσιας τροφοδοσίας θρεπτικών στοιχείων και νερού στις πραγματικές ανάγκες της καλλιέργειας, οι οποίες εξαρτώνται κυρίως από το στάδιο ανάπτυξης των φυτών και τις τρέχουσες κλιματικές συνθήκες του θερμοκηπίου, μειώνοντας έτσι το κόστος παραγωγής και ελαχιστοποιώντας την απώλεια νερού και θρεπτικών στοιχείων (Blok et al., 2023; Neocleous and Savvas, 2022). Επί του παρόντος, βιβλιογραφικά αναφέρονται μια σειρά από συνταγές θρέψης για τα περισσότερα είδη κηπευτικών και ανθοκομικών ειδών, οι οποίες έχουν υπολογιστεί πειραματικά σύμφωνα με τις συγκεντρώσεις απορρόφησης για το κάθε ξεχωριστό φυτικό είδος. Σε κάποια είδη φυτών, οι συνιστώμενες συνθέσεις θρεπτικών διαλυμάτων προσαρμόζεται ακόμη και σύμφωνα και με τις περιβαλλοντικές συνθήκες των διαφορετικών περιόδων καλλιέργειας τους (Neocleous and Savvas, 2022, 2015).

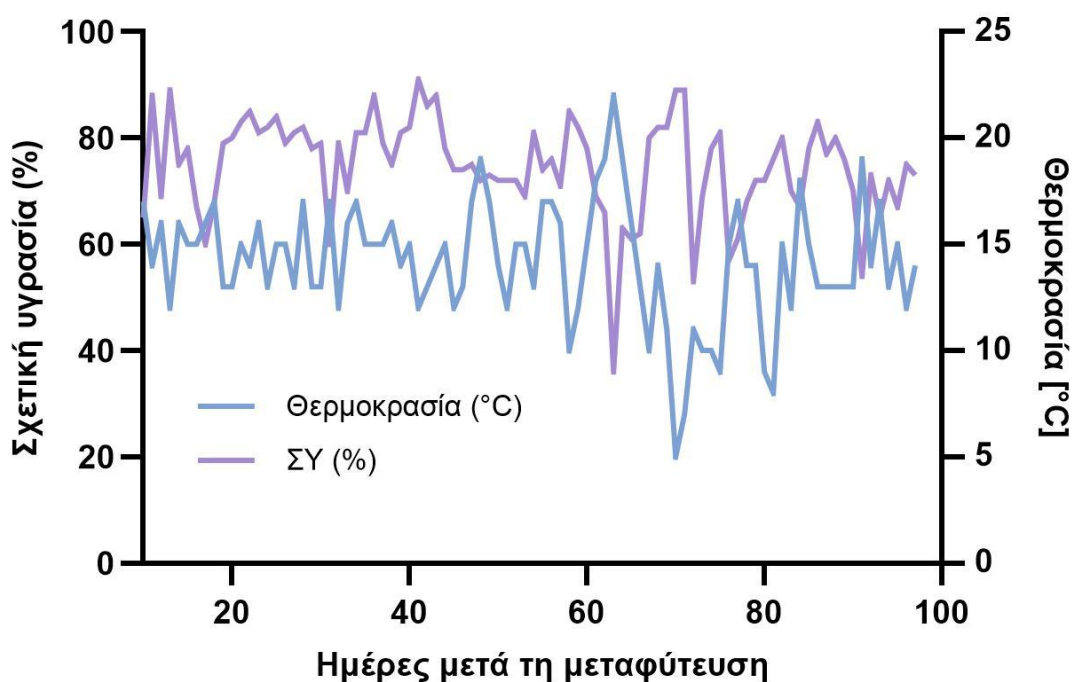
Επί του παρόντος, η επίδραση του αμμωνιακού (NH_4^+) και νιτρικού (NO_3^-) αζώτου στην πρόσληψη κατιόντων : ανιόντων σε υδροπονικά διαλύματα έχει μελετηθεί σε μαρούλι, σπανάκι, σταμναγκάθι και άλλα φυλλώδη είδη λαχανικών (Dickson et al., 2016; Lin et al., 2022; Ye et al., 2022; Zhang et al., 2005). Ωστόσο, η επίδραση της πηγής αζώτου στην αναλογία πρόσληψης κατιόντος:ανιόντος δεν έχει ακόμη χαρακτηριστεί επαρκώς σε μια σειρά άγριων βρώσιμων ενδημικών λαχανευόμενων ειδών όπως ο ασκόλυμπρος (*Scolymus hispanicus* L.) τα ταραζάκο (*Taraxacum officinale* L.), κορκολεκανίδα (*Urospermum picroides* L.), και πικραλίδα (*Reichardia picroides* L.), τα οποία συχνά αναφέρονται ως εναλλακτικές καλλιέργειες με σημαντικό όφελος από την εμπορική τους αξιοποίηση (Chatzigianni et al., 2019; Paschoalinotto et al., 2023; Petropoulos and Karapanos, 2021).

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα, πραγματοποιήθηκε παραγοντικό πείραμα σε ανοιχτό υδροπονικό σύστημα με στόχο να εκτιμηθεί η επίδραση τόσο του επιπέδου (7,0 και 14,0 mM ολικού αζώτου) όσο και της πηγής του αζώτου (αναλογία $\text{NH}_4^+ : \text{NO}_3^-$) στα αγρονομικά χαρακτηριστικά, την πρόσληψη μακροθρεπτικών στοιχείων και τη φωτοσυνθετική ικανότητα του ασκόλυμπρου (*Scolymus hispanicus* L.).

5.2 Υλικά και μέθοδοι

5.2.1 Καλλιεργητικές πρακτικές στο θερμοκήπιο

Το καλοκαίρι του 2021, συλλέχθηκαν σπόροι αυτοφυών φυτών του *S. hispanicus* L. από την περιοχή του Θρεψανού, Ηράκλειο Κρήτης (35°14'N 25°15'E) και διατηρήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου μέχρι να φυτευθούν στο Αγρόκτημα του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου. Η σπορά έγινε στις 9 Οκτωβρίου σε δίσκους σποράς (30 × 50 cm) σε μείγμα υποστρώματος κοκοφοίνικα και περλίτη (1:1). Τέσσερις εβδομάδες μετά τη σπορά, 144 σπορόφυτα, τα οποία βρίσκονταν σε στάδιο πριν την πλήρη έκπτυξη του τρίτου πραγματικού φύλλου, μεταφυτεύτηκαν σε σάκους καλλιέργειας με υπόστρωμα περλίτη, συνολικού όγκου 30 L και διαστάσεων 90 cm μήκος, 25 cm πλάτος, και 15 cm ύψος. Συνολικά μεταφυτεύτηκαν 3 φυτά ανά σάκο, κατανομημένα σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Η πειραματική καλλιέργεια εγκαταστάθηκε σε αμφικλινές θερμοκήπιο διπλής οροφής, καλυμμένο με φιλμ πολυαιθυλενίου, συνολικής έκτασης 120 m² (10 × 12 m), το οποίο διήρκεσε μέχρι 90 ημέρες μετά τη μεταφύτευση (9 Φεβρουαρίου). Τα φυτά του *S. hispanicus* L. καλλιεργήθηκαν σε ανοιχτό υδροπονικό σύστημα που περιελάμβανε οκτώ διπλές σειρές υπερυψωμένων λουκιών υποδοχής της καλλιέργειας και τα φυτά φυτεύθηκαν σε απόσταση 0.30 m × 0.80 m × 0.30 m (απόσταση μεταξύ κάθε ζεύγους λουκιών × απόσταση μεταξύ 2 γειτονικών λουκιών × απόσταση από φυτό σε φυτό). Δύο ημέρες μετά τη μεταφύτευση (HMM), στο κάτω μέρος κάθε σάκου έγινε τομή (4 σχισμές ανά σάκο καλλιέργειας) με στόχο να επιτραπεί η ελεύθερη αποστράγγιση του διαλύματος. Καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, τα φυτά αναπτύχθηκαν χωρίς καμία ανάγκη ψεκασμού για τον έλεγχο ασθενειών ή εντόμων ενώ επίσης γινόταν καταγραφή της θερμοκρασίας του αέρα [°C] και της σχετικής υγρασίας [%] σε διαστήματα 15 λεπτών και τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στην **Εικόνα 23**.



Εικόνα 23. Διακύμανση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας κατά την περίοδο καλλιέργειας.

Στην καλλιέργεια εφαρμόστηκαν τέσσερις μεταχειρίσεις θρεπτικού διαλύματος συνδυάζοντας δύο επίπεδα τροφοδοσίας ολικού-N ($7,2 \text{ mmol L}^{-1} \text{ N}$ και $14,2 \text{ mmol L}^{-1} \text{ N}$) σε δύο αναλογίες τροφοδοσίας $\text{NH}_4^+\text{-N}$: ολικού-N ($0,10$ και $0,20 \text{ mol mol}^{-1}$, αντίστοιχα) στο θρεπτικό διάλυμα (Πίνακας 13). Οι συγκεντρώσεις καλίου, φωσφόρου, ασβεστίου, μαγνησίου, χλωρίου και μικροθρεπτικών στοιχείων, που ήταν πανομοιότυπες σε όλες τις μεταχειρίσεις, ήταν: $6,20 \text{ mM K}^+$, $1,30 \text{ H}_2\text{PO}_4^- \text{ mM}$, $4,00 \text{ mM Ca}^{2+}$, $2,25 \text{ mM Mg}^{2+}$, $2,00 \text{ mM Cl}^-$, $20,00 \text{ }\mu\text{M Fe}^{2+}$, $10,00 \text{ }\mu\text{M Mn}^{2+}$, $7,00 \text{ }\mu\text{M Zn}^{2+}$, $0,80 \text{ }\mu\text{M Cu}^{2+}$, $25,00 \text{ }\mu\text{M B}$ και $0,60 \text{ }\mu\text{M Mo}$. Για να επιτευχθούν πανομοιότυπες συγκεντρώσεις K, Ca, Mg και P σε όλες τις μεταχειρίσεις, οι αλλαγές στο επίπεδο τροφοδοσίας ολικού-N και στην αναλογία $\text{NH}_4^+\text{-N}$:ολικό-N, εξισορροπήθηκε ηλεκτροχημικά τροποποιώντας κατάλληλα τις συγκεντρώσεις SO_4^{2-} από $2,00$ έως $5,52 \text{ mM}$. Σε όλες τις μεταχειρίσεις, το pH στο θρεπτικό διάλυμα ρυθμίστηκε σε $5,6$ - $5,7$ προσθέτοντας κατάλληλες ποσότητες διαλύματος HNO_3 .

Η σύνθεση των θρεπτικών διαλυμάτων υπολογίστηκε σύμφωνα με τους Savvas and Adamidis, (1999), χρησιμοποιώντας το λογισμικό NUTRISENSE (Savvas et al., 2021) και η παρασκευή των διαλυμάτων τροφοδοσίας πραγματοποιήθηκε με το αυτόματο σύστημα μίξης και υδρολίπανσης (ALAGRO IQ60, Αθήνα, Ελλάδα). Η υδρολίπανση γινόταν στα φυτά μέσω στάγδην άρδευσης από έναν μεμονωμένο διανεμητή με ρυθμό παροχής 4 L h^{-1} ανά φυτό. Το κλάσμα απορροής μετά από κάθε γεγονός άρδευσης προσαρμόστηκε μεταξύ του εύρους $0,35$ - $0,45$ τροποποιώντας κατάλληλα

την ημερήσια συχνότητα άρδευσης σύμφωνα με τις κλιματικές συνθήκες του θερμοκηπίου. Το πειραματικό σχέδιο που εφαρμόστηκε ήταν Σχέδιο Τυχαιοποιημένων Πλήρων Ομάδων με τέσσερις επαναλήψεις ανά επέμβαση ($4 \times 4 = 16$ πειραματικές μονάδες), τυχαιοποιημένες κατάλληλα στον χώρο του θερμοκηπίου.

Πίνακας 13. Συνθέσεις θρεπτικών διαλυμάτων των τεσσάρων μεταχειρίσεων του πειράματος.

Παράμετρος	LN10	LN20	HN10	HN20
EC [dS m ⁻¹]	2,20	2,20	2,20	2,20
K ⁺ [mM]	6,20	6,20	6,20	6,20
Ca ²⁺ [mM]	4,00	4,00	4,00	4,00
Mg ²⁺ [mM]	2,25	2,25	2,25	2,25
NO ₃ ⁻ [mM]	6,50	5,80	12,80	11,40
NH ₄ ⁺ [mM]	0,70	1,40	1,40	2,80
SO ₄ ²⁻ [mM]	4,82	5,52	2,00	3,42
H ₂ PO ₄ ⁻ [mM]	1,30	1,30	1,30	1,30
Cl ⁻ [mM]	2,00	2,00	2,00	2,00
Fe (μM)	20,00	20,00	20,00	20,00
Mn (μM)	10,00	10,00	10,00	10,00
Zn (μM)	7,00	7,00	7,00	7,00
Cu (μM)	0,80	0,80	0,80	0,80
B (μM)	25,00	25,00	25,00	25,00
Mo (μM)	0,60	0,60	0,60	0,60
K / (K+Ca+Mg) [mol mol ⁻¹]	0,50	0,50	0,50	0,50
Ca / (K+Ca+Mg) [mol mol ⁻¹]	0,32	0,32	0,32	0,32

Mg / (K+Ca+Mg) [mol mol ⁻¹]	1,16	0,18	0,18	0,18
N / K [mol/mol]	0,10	1,16	2,29	2,29
NH ₄ ⁺ / Total-N	0,10	0,20	0,10	0,20

5.2.2 Προσδιορισμός ποσοτικών και φωτοσυνθετικών παραμέτρων

Στις 90 HMM (μεταξύ 07:00-09:00 π.μ.), επιλέχθηκαν τα πιο νεαρά και πλήρως εκπτυγμένα φύλλα τριών φυτών ανά πειραματικό τεμάχιο για τη μέτρηση του σχετικού φθορισμού χλωροφύλλης (Fv/Fm), της σχετικής πυκνότητας χλωροφύλλης (SPAD) και της στοματικής αγωγιμότητας (mmol m² s⁻¹). Η σχετική πυκνότητα χλωροφύλλης - SPAD μετρήθηκε χρησιμοποιώντας συσκευή SPAD-502 (Minolta, Ιαπωνία) και ο φθορισμός χλωροφύλλης με την χρήση φθοριόμετρου OS-30p (Opti-Sciences, ΗΠΑ) σύμφωνα με τους (Baker and Rosenqvist, 2004). Επιπλέον, για τη μέτρηση της στοματικής αγωγιμότητας που αποτελεί μια εκτίμηση της στοματικής δραστηριότητας του φυτού χρησιμοποιήθηκε πορόμετρο τύπου AP4 (Delta-T Devices, Cambridge, UK) (Toro et al., 2019) **(Εικόνα 31)**.

Κατά την διάρκεια της καλλιεργητική περιόδου πραγματοποιήθηκαν τρεις συγκομιδές, στις 9 Νοεμβρίου (30 HMM), 9 Ιανουαρίου (60 HMM) και 9 Φεβρουαρίου (90 HMM), αντίστοιχα. Κατά τη συγκομιδή, εκριζώθηκε ολόκληρο το φυτό και το υπέργειο μέρος διαχωρίστηκε από τη ρίζα. Στην συνέχεια μετρήθηκε απευθείας το νωπό τους βάρος (WFL) και ο αριθμός των πλήρως ανεπτυγμένων (≥10 cm μήκος) φύλλων (NL). Το νωπό βάρος της ρίζας (WFR) μετρήθηκε, αφού πρώτα καθαρίστηκε από τον περλίτη εμβαπτίζοντάς την σε διάλυμα «calgon» που παρασκευάστηκε προσθέτοντας 40 g (NaPO₃)₆ και 10 g Na₂CO₃ στα 1000 mL νερού και στη συνέχεια πλένοντάς τον φυτικό ιστό απαλά σε κόσκινο με διάμετρο πόρων 2,0 και 0,5 mm. Για τον προσδιορισμό του ξηρού βάρους των φύλλων (WDL) και της ρίζας (WDR) ο φυτικός ιστός του υπέργειου και υπόγειου τμήματος ξηράθηκαν χωριστά στους 65°C για 72 ώρες. Συνολικά εκριζώθηκαν και μετρήθηκαν τρία φυτά ανά πειραματικό τεμάχιο και 12 φυτά ανά μεταχείριση, και επομένως στο σύνολο 48 φυτά για κάθε ημερομηνία συγκομιδής (30, 60 και 90 HMM).

5.2.3 Εργαστηριακές αναλύσεις

Η συγκέντρωση των μακροθρεπτικών στοιχείων στα φυτά μετρήθηκε σε δείγματα ξηρής ουσίας φυτικού ιστού που συλλέχθηκαν ξεχωριστά για τις 3 ημερομηνίες συγκομιδής (30, 60 και 90 HMM). Ένα φυτό επιλέχθηκε τυχαία από κάθε σάκο (4 φυτά ανά επέμβαση) και τοποθετήθηκε σε

φούρνο στους 65°C όπου αφέθηκε μέχρι σταθεροποίησης του βάρους. Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε άλεση του ιστού σε μορφή πούδρας και περάστηκαν από κόσκινο 20 mesh. Από κάθε δείγμα λήφθηκε ποσότητα 0,5 g για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων N, P, K, Ca και Mg στον ξηρό φυτικό ιστό. Το άζωτο προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο Kjeldahl μετά την ανοργανοποίηση χρησιμοποιώντας H₂SO₄. Εν συντομία, για την διαδικασία της χώνευσης, 1,0 g ξηρού ιστού τοποθετήθηκε σε σωλήνα πέψης μετά την προσθήκη 20 mL πυκνού H₂SO₄ παρουσία καταλύτη (10 g K₂SO₄ + 0,5 g CuSO₄ X 5H₂O). Η απόσταξη πραγματοποιήθηκε με συσκευή VaroDest300 (Gerhardt) χρησιμοποιώντας 50 mL H₂O και 40 mL 37% NaOH. Ο φώσφορος, το K, το Ca και το Mg προσδιορίστηκαν σε υδατικό εκχύλισμα που ελήφθη με ξηρή τέφρα στους 550 °C για 4 ώρες (**Εικόνα 32**). Επιπλέον, προστέθηκαν 10 mL νιτρικού οξέος 3 N (HNO₃) για την αφύγρανση της τέφρα και οι σωλήνες πέψης μεταφέρθηκαν σε θερμή πλάκα στους 70 °C για λίγα λεπτά. Στη συνέχεια, τα νιτρικά διαλύματα διηθήθηκαν (Whatman No. 40) και μεταφέρθηκαν σε φιάλες των 50 mL με απεσταγμένο νερό. Οι συγκεντρώσεις P, K, Ca και Mg στα ληφθέντα υδατικά εκχυλίσματα προσδιορίστηκαν με χρήση οργάνου ICP-MS (NexION 2000, PerkinElmer) (**Εικόνα 33**). Οι συνθήκες λειτουργίας του οργάνου ήταν: nebulizer gas flow rate (Ar, L min⁻¹): 0,86 ; auxiliary gas flow (Ar, L min⁻¹): 1,2; plasma gas flow (Ar, L min⁻¹): 15; pump rate: -35 rpm and ICP RF power (W): 1600. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα και το pH του διαλύματος απορροής σε κάθε κλάσμα αποστράγγισης γινόταν 2 φορές την εβδομάδα για κάθε πειραματικό τεμάχιο ξεχωριστά, χρησιμοποιώντας πολύμετρο τύπου WTW (MultiLine Multi 3510, Xylem Analytics, Γερμανία).

5.2.4 Επεξεργασία δεδομένων

Οι συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) για τα μακροστοιχεία N, P, K, Ca, and Mg που ανακτήθηκαν από τη φυτική βιομάζα υπολογίστηκαν πολλαπλασιάζοντας την συγκέντρωση του κάθε θρεπτικού στοιχείου με τη συνολική ξηρή βιομάζα δια τον συνολικό όγκο του νερού που καταναλώθηκε λόγω της διαπνοής κατά το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ταυτόχρονα, η μέση ΣΑ των K, Ca, Mg, N και P (ΣΑ_x σε mmol L⁻¹, όπου x = K, Ca, Mg, N, P), υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση (Tzerakis et al., 2012):

$$\Sigma A_x = [(C_{xr} \times B_r + \Sigma C_{sh} \times B_{sh})]/T_r \quad (1)$$

όπου C_{xr} και C_{xs}, υποδηλώνουν τις συγκεντρώσεις (mmol g⁻¹) του x μακροθρεπτικού στοιχείου (x=N, P, K, Ca, Mg) στη ρίζα και στο υπέργειο μέρος, αντίστοιχα. Τα B_r και το B_{sh} υποδηλώνουν τη ξηρή βιομάζα της ρίζας και του υπέργειου φυτικού ιστού (g φυτού⁻¹), αντίστοιχα. Το T_r υποδηλώνει την απομάκρυνση του νερού από το σύστημα (L φυτό⁻¹) κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου διαστήματος καλλιέργειας, και υπολογίζεται ως εξής:

$$T_r = \frac{(W_{in} - W_f)}{N} \quad (2)$$

όπου, W_{in} ο συνολικός όγκος του θρεπτικού διαλύματος που τροφοδοτείται στην καλλιέργεια και W_f ο συνολικός όγκος του διαλύματος απορροής που συλλέχθηκε για ένα συγκεκριμένο διάστημα αναφοράς (0-30, 30-60 και 60-90 HMM). Η αθροιστική πρόσληψη νερού (ΑΠΝ) υπολογίστηκε εκτιμώντας το T_r για τις χρονικές περιόδους: 1-15, 1-30, 1-45, 1-60, 1-75 και 1-90 HMM (Εικόνα 31).

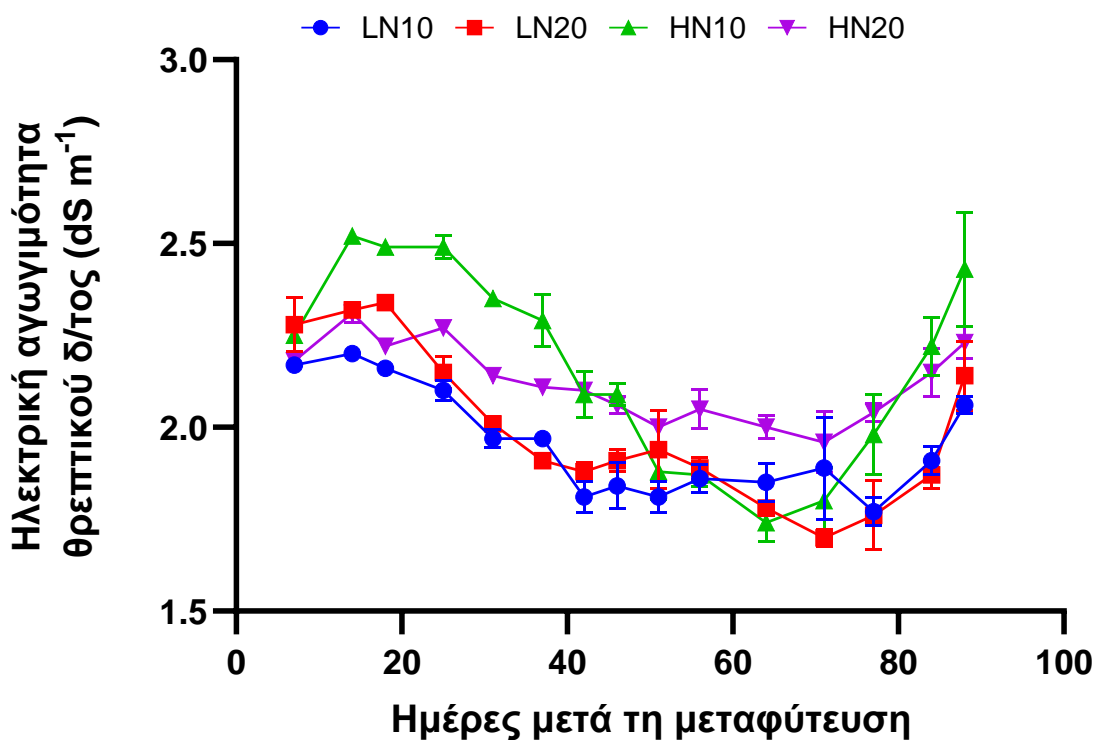
5.2.5 Στατιστική ανάλυση

Τα δεδομένα αναλύθηκαν εφαρμόζοντας αμφίδρομη ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για την αξιολόγηση των κύριων δράσεων [συνολικό επίπεδο-N, αναλογία $\text{NH}_4^+\text{-N}$ /συνολικό-N] και μία αλληλεπίδραση πρώτης τάξης (συνολικό-N \times $\text{NH}_4^+\text{-N}$) σε απόδοση και φωτοσυνθετικές παράμετροι, θρεπτικά στοιχεία και συγκεντρώσεις απορρόφησης του φυτού. Όταν η ANOVA έδειξε σημαντική επίδραση των επεμβάσεων ολικού-N και $\text{NH}_4^+\text{-N}$ σε μια συγκεκριμένη παράμετρο, χρησιμοποιήθηκε η δοκιμή πολλαπλών συγκρίσεων Duncan για τον εντοπισμό σημαντικών διαφορών μεταξύ των μέσων όρων των μεταχειρίσεων. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε έλεγχος κανονικότητας και ομοιογένειας διασπορών για κάθε στατιστική δοκιμή που εφαρμόστηκε. Για την απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης, επιλέχθηκε το όριο του 5%. Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας στατιστικό πακέτο R (R Development Core Team, 2017).

5.3 Αποτελέσματα

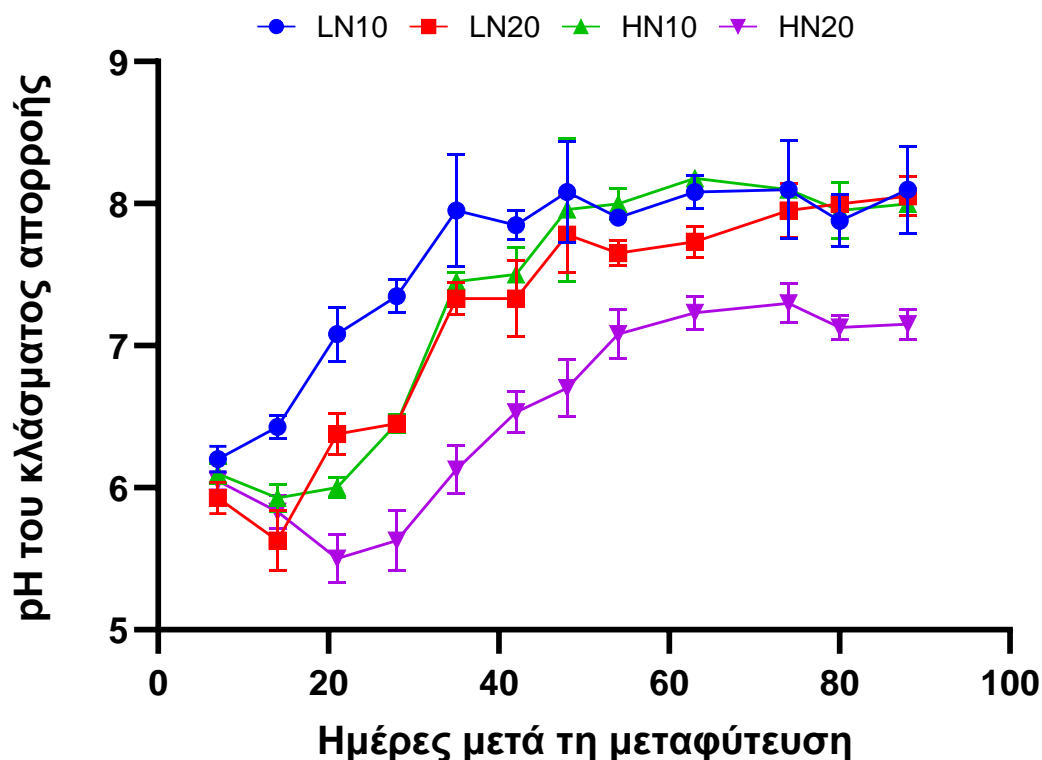
5.3.1 Διάλυμα απορροής

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του διαλύματος απορροής κυμάνθηκε στα ίδια επίπεδα με εκείνη του τροφοδοτούμενου θρεπτικού διαλύματος ($2,16\text{-}2,35 \text{ dS m}^{-1}$) κατά την αρχική περίοδο καλλιέργειας 10-30 HMM, και για τις τέσσερις επεμβάσεις θρεπτικού διαλύματος (LN10, LN20, HN10 και HN20). Ωστόσο, σταδιακή μείωση της EC στο κλάσμα απορροής, παρατηρήθηκε σε όλες τις επεμβάσεις κατά το επόμενο στάδιο ανάπτυξης δηλαδή 30-60 HMM, ενώ κατά το τρίτο στάδιο καλλιέργειας, 60-90 HMM (και συγκεκριμένα από 70 HMM και μετά), η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξήθηκε σταδιακά ξανά, πλησιάζοντας τα αρχικά επίπεδα κατά την ολοκλήρωση της καλλιεργητικής περιόδου, 90 HMM (Εικόνα 24).



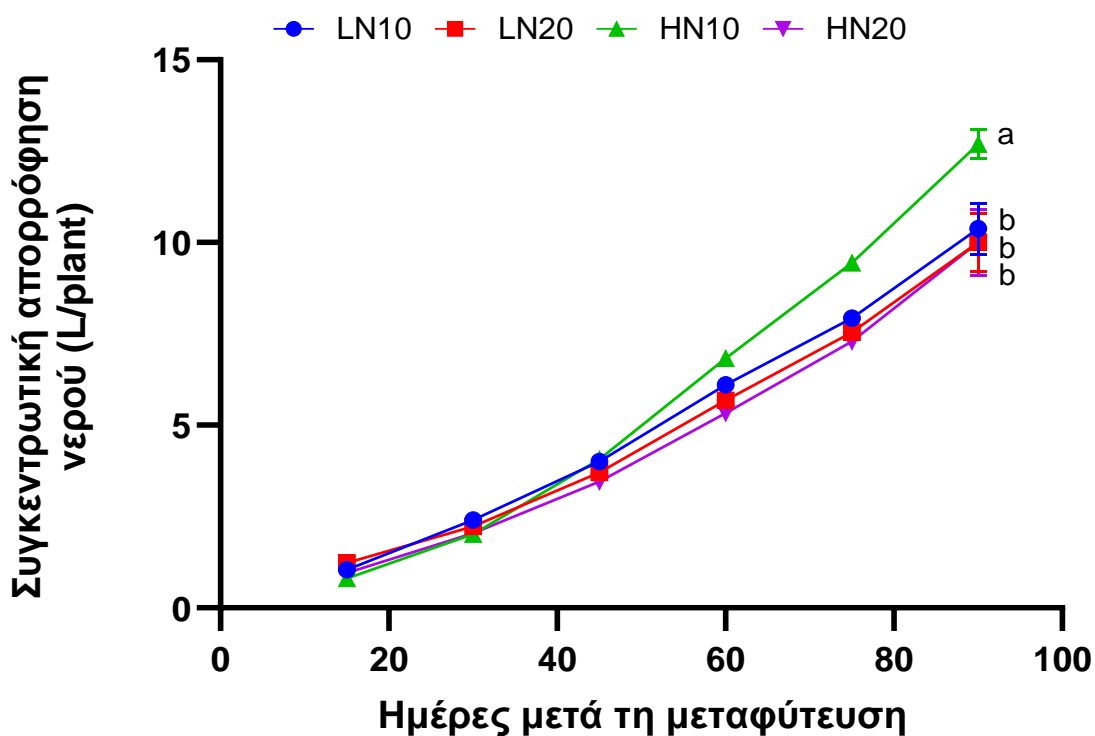
Εικόνα 24. Εξέλιξη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του διαλύματος απορροής όπως επηρεάστηκε από το επίπεδο ολικού-N (7,2 και 14,2 mM) και της αναλογίας NH_4^+ -N/ολικού-N (0.10 και 0.20, αντίστοιχα) στο διάλυμα τροφοδοσίας του ασκόλυμπρου.

Το pH του διαλύματος απορροής αυξήθηκε σε όλες τις επεμβάσεις, κατά την διάρκεια της καλλιέργειας. Ωστόσο, το pH φάνηκε να φτάνει στο ανώτερο αποδεκτό όριο του 6,5 περίπου στις 14 HMM για την μεταχείριση LN10, στις 28 HMM για την μεταχείριση LN20 και HN10 και στις 42 HMM για την μεταχείριση HN20. Γενικά, ο ρυθμός αύξησης του pH ήταν πιο έντονος στις μεταχειρίσεις LN10, LN20 και HN10 (οι οποίες κυμάνθηκαν από 6,43-8,08, 5,63-7,78 και 5,93-7,96, αντίστοιχα, για το διάστημα καλλιέργειας από 14 HMM έως 48 HMM), σε σύγκριση με την μεταχείριση HN20 στην οποία ο ρυθμός αύξησης του pH παρουσιάστηκε αισθητά χαμηλότερος (Εικόνα 25). Ωστόσο, το pH σταδιακά αυξήθηκε σε τιμές άνω του 7 σε όλες τις επεμβάσεις, και έδειξε να σταθεροποιείται στα μέγιστα επίπεδα στα μεταγενέστερα στάδια καλλιέργειας.



Εικόνα 25. Πορεία εξέλιξης του pH στο διάλυμα απορροής όπως επηρεάστηκε από το ολικό άζωτο (7,2 και 14.2 mM) και την αναλογία NH_4^+ -N/ολικό-N (0.10 και 0.20, αντίστοιχα) του θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας υδροπονικής καλλιέργειας (σε σάκους περλίτη) του ασκόλυμπρου.

Ο ρυθμός αύξησης της αθροιστικής πρόσληψης νερού (ΑΠΝ) ήταν παρόμοιος σε όλες τις επεμβάσεις από τις 15 έως 45 ΗΜΜ, ενώ, από τις 60 έως 90 ΗΜΜ (τελικό στάδιο ανάπτυξης) ο ρυθμός αύξησης του ΑΠΝ ήταν αισθητά πιο έντονος στην επέμβαση όπου το υψηλό επίπεδο ολικού-N συνδυάστηκε με τη χαμηλή αναλογία NH_4^+ -N/total-N (HN10) σε σύγκριση με τις άλλες τρεις επεμβάσεις (LN10, LN20 και HN20). Ως αποτέλεσμα, η διαφορά στη ΑΠΝ μεταξύ του HN10 και των άλλων τριών επεμβάσεων (LN10, LN20 και HN20) παρουσιάστηκε στατιστικά σημαντική στο τέλος της περιόδου καλλιέργειας, δηλαδή στις 90 ΗΜΜ ($12,69 \pm 0,4$ σε σχέση με $10,38 \pm 0,70$, $10,00 \pm 0,80$ και $10,01 \pm 0,90$ L φυτό⁻¹, αντίστοιχα) (Εικόνα 26).



Εικόνα 26. Αθροιστική απορρόφηση νερού ($L\ plant^{-1}$), φυτών ασκόλυμπρου που αναπτύχθηκαν σε υπόστρωμα περλίτη, όπως επηρεάστηκε από τις διαφορετικές μεταχειρίσεις θρεπτικών διαλυμάτων (LN10, LN20, HN10 και HN20). Οι μέσες τιμές ($n = 4$) με διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας $P \leq 5\%$ σύμφωνα με τη δοκιμή Duncan.

5.3.2 Απόδοση και φωτοσυνθετική δραστηριότητα

Όπως δείχνει ο Πίνακας 13, ο συνδυασμός της υψηλής συγκέντρωσης ολικού-N (14,2 mM) με τη χαμηλή αναλογία NH_4-N /ολικό-N αύξησε το νωπό βάρος και τον αριθμό των φύλλων του φυτού σε σύγκριση με τις άλλες τρεις επεμβάσεις, το ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος σε σύγκριση με τις δύο επεμβάσεις χαμηλής συγκέντρωσης ολικού-N (7,2 mM), τη διάμετρο της ροζέτας σε σύγκριση με τη μεταχείριση χαμηλού επιπέδου ολικού-N και χαμηλής αναλογίας NH_4-N /ολικό-N και τη στοματική αγωγιμότητα σε σύγκριση με το υψηλό επίπεδο ολικού-N σε συνδυασμό με την υψηλή αναλογία NH_4-N /ολικό-N. Αντίθετα, το νωπό και ξηρό βάρος της ρίζας, η σχετική πυκνότητα χλωροφύλλης και ο σχετικός φθορισμός χλωροφύλλης δεν φάνηκαν να επηρεάζονται από το επίπεδο τροφοδοσίας ολικού-N ή την αναλογία NH_4-N /ολικό-N.

Πίνακας 14. Επίδραση της συγκέντρωσης ολικού N (LN: 7,2 mM N, HN: 14,2 mM N) και της αναλογίας NH₄-N/ολικού-N (10: 0,1; 20: 0,2) του τροφοδοτούμενου θρεπτικού διαλύματος στην ανάπτυξη και τη φωτοσυνθετική ικανότητα των φυτών στις 90 ημέρες μετά τη μεταφύτευση (HMM). Οι μέσοι όροι των τιμών (n = 4) με διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας P ≤ 5% σύμφωνα με την δοκιμή Duncan.

Επέμβαση	Αριθμός φύλλων ανά φυτό	Νωπό βάρος φύλλων [g plant ⁻¹]	Νωπό βάρος κονδυλόριζας [g plant ⁻¹]	Διάμετρος ροζέτας [cm]	Ξηρό βάρος φύλλων [g plant ⁻¹]	Ξηρό βάρος ρίζας [g plant ⁻¹]	Σχετική πυκνότητα χλωροφύλλ ης [SPAD]	Σχετικός φθορισμός χλωροφύλλης [Fv/Fm]	Στοματική αγωγιμότητα [mmol m ² s ⁻¹]
LN10	20.63 b	277.95 b	146.15	72.17 b	25.40 b	21.55	62.30	0.837	305.65 ab
LN20	23.60 b	289.95 b	166.27	77.06 ab	27.58 b	24.90	60.15	0.829	355.65 a
HN10	31.64 a	429.62 a	178.13	80.87 a	37.45 a	26.08	61.03	0.836	377.68 a
HN20	24.11 b	333.20 b	144.70	75.87 ab	31.37 ab	21.68	35.05	0.841	247.00 b
Σημαντικότητα διαφορών									
total-N (mM)	*	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
NH ₄ ⁺ /total-N	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
total-N × NH ₄ ⁺ /total-N	*	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	*

5.3.3 Συγκεντρώσεις μακροθρεπτικών στοιχείων στον φυτικό ιστό

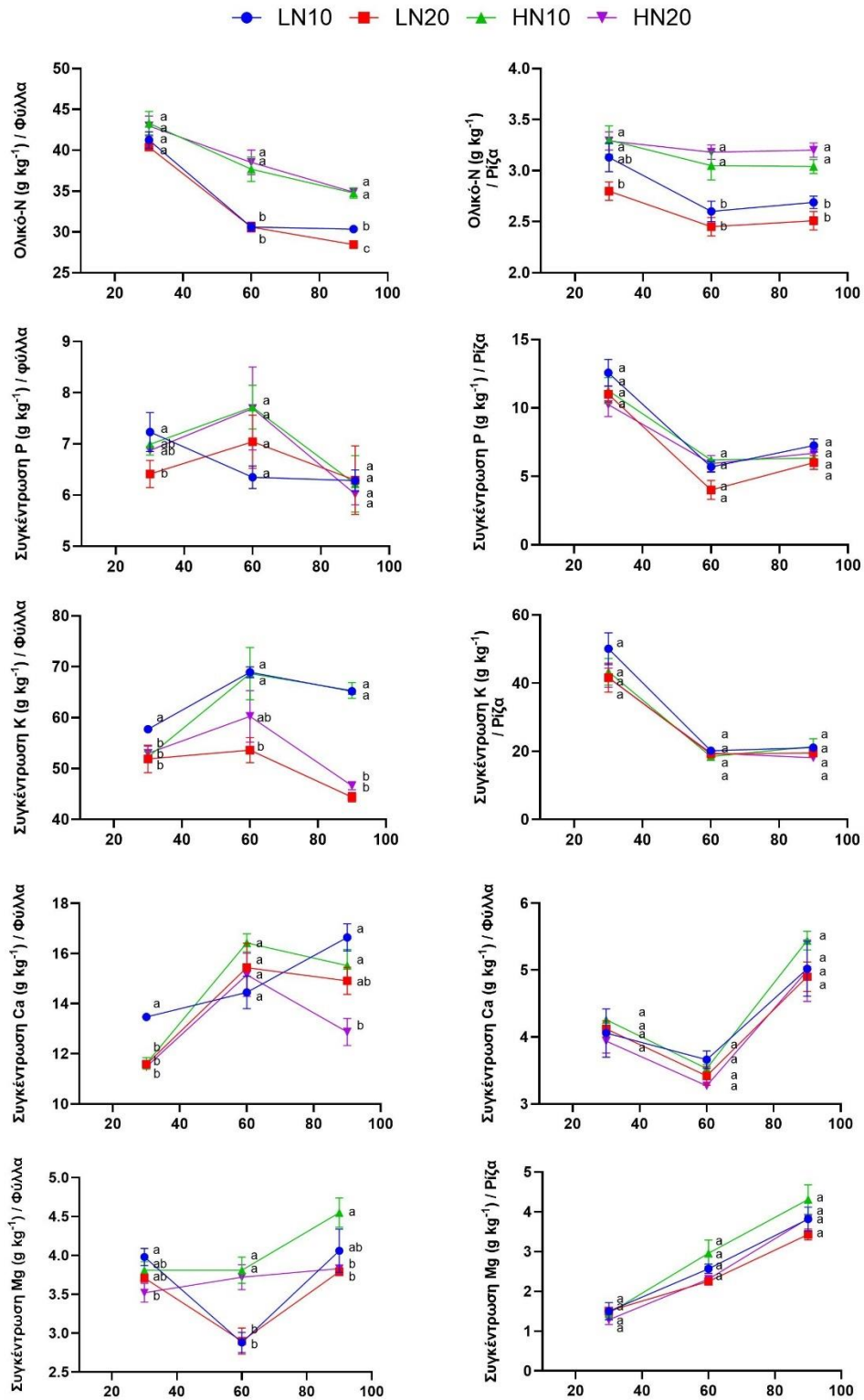
Η υψηλή συγκέντρωση ολικού-N στο τροφοδοτούμενο θρεπτικό διάλυμα αύξησε τη συγκέντρωση οργανικού-N τόσο στον βλαστό όσο και στην κονδυλώδη ρίζα του ασκόλυμπρου σε σύγκριση με τη χαμηλό επίπεδο τροφοδοσίας ολικού-N, ανεξάρτητα από την αναλογία $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{ολικού-N}$ (Εικόνα 26). Ωστόσο, στις 30 HMM, οι διαφορές παρουσιάστηκαν μη σημαντικές στο βλαστό και σημαντικές μόνο στη ρίζα σε σύγκριση με την μεταχείριση LN20. Επιπλέον, στις 90 HMM, η υψηλή αναλογία $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{ολικού-N}$ μείωσε περαιτέρω τη συγκέντρωση οργανικού-N των φύλλων όταν συνδυάστηκε με το χαμηλό επίπεδο τροφοδοσίας ολικού-N. Η συγκέντρωση P τόσο στο βλαστό όσο και στη ρίζα του φυτού δεν επηρεάστηκε από καμία επέμβαση θρεπτικού διαλύματος στις 60 και 90 HMM, ενώ στις 30 HMM η υψηλή $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{ολικού-N}$ μείωσε σημαντικά τη συγκέντρωση του P στον υπέργειο μέρος του φυτού στις επεμβάσεις χαμηλού επιπέδου τροφοδοσίας ολικού-N σε σύγκριση με την υψηλή αναλογία $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{ολικού-N}$ για το ίδιο επίπεδο ολικού-N.

Η συγκέντρωση K^+ στον υπέργειο φυτικό ιστό μειώθηκε σημαντικά στις επεμβάσεις χαμηλής σε σύγκριση με την υψηλή αναλογία $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{ολικού-N}$ κατά την τελικό στάδιο συγκομιδής-δειγματοληψίας (90 HMM). Ωστόσο, στις 30 και 60 HMM, το K^+ στο υπέργειο τμήμα επηρεάστηκε από την αλληλεπίδραση μεταξύ της αναλογίας $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{ολικού-N}$ και του επιπέδου ολικού-N. Επομένως, στις 30 HMM, η συγκέντρωση K^+ μειώθηκε όχι μόνο από την υψηλή αναλογία $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{ολικού-N}$ αλλά και από τη χαμηλή αναλογία $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{ολικού-N}$ όταν η τροφοδοσία ολικού-N ήταν υψηλή. Επιπλέον, στις 60 HMM, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση στη συγκέντρωση K^+ των φύλλων στην επέμβαση υψηλής αναλογίας $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{ολικού-N}$ μόνο όταν αυτή συνδυάστηκε με υψηλό επίπεδο ολικού αζώτου στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας των φυτών. Σε αντίθεση με τα αποτελέσματα στον υπέργειο φυτικό ιστό, η συγκέντρωση K^+ στην ρίζα δεν επηρεάστηκε από το επίπεδο ολικού-N ή την πηγή τροφοδοσίας του (νιτρικό και αμμωνιακό). Στο υπέργειο τμήμα του φυτού, η συγκέντρωση Ca^{2+} στις 30 HMM ήταν σημαντικά υψηλότερη όταν το χαμηλό επίπεδο τροφοδοσίας ολικού-N συνδυάστηκε με χαμηλή αναλογία $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{ολικού-N}$ (LN10), σε σύγκριση με τις άλλες τρεις επεμβάσεις, ενώ κατά την επόμενη δειγματοληψία (60 HMM), η συγκέντρωση Ca^{2+} ήταν παρόμοια σε όλες τις επεμβάσεις θρεπτικών διαλυμάτων. Ωστόσο, στις 90 HMM, η συγκέντρωση Ca^{2+} του υπέργειου τμήματος ήταν και πάλι υψηλότερη στην επέμβαση όπου συνδυάστηκε η χαμηλή αναλογία $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{ολικού-N}$ με χαμηλή τροφοδοσία ολικού-N, σε σύγκριση με τις άλλες τρεις επεμβάσεις, αν και η διαφορά μεταξύ των επεμβάσεων LN10 και HN10 δεν κρίθηκε σημαντική. Αντίστοιχα, η συγκέντρωση Ca^{2+} στις ρίζες, ακολούθησε μια αυξητική τάση από τις 60 μέχρι τις 90 HMM αλλά οι διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων σε κάθε περίοδο

δειγματοληψίας (30, 60, και 90 HMM) ήταν αμελητέες. Η συγκέντρωση του Mg^{2+} του υπέργειου μέρους κατά την πρώτη περίοδο δειγματοληψίας (30 HMM) αυξήθηκε σημαντικά στη χαμηλή αναλογία NH_4^+-N /ολικού-N (LN10) όταν συνδυάστηκε με το χαμηλό επίπεδο τροφοδοσίας ολικού-N, αλλά η διαφορά ήταν σημαντική μόνο σε σύγκριση με την αναλογία NH_4^+-N /ολικού-N στο υψηλό επίπεδο ολικού-N του θρεπτικού διαλύματος. Κατά την επόμενη ημερομηνία δειγματοληψίας στις 60 HMM, η συγκέντρωση Mg^{2+} του υπέργειου φυτικού ιστού ήταν σημαντικά αυξημένη στις δύο επεμβάσεις υψηλού επιπέδου ολικού-N σε σύγκριση με τις δύο επεμβάσεις χαμηλού επιπέδου ολικού-N, ανεξάρτητα από την αναλογία NH_4^+-N /ολικού-N στο θρεπτικό διάλυμα, ενώ στις 90 HMM ο συνδυασμός χαμηλής αναλογίας NH_4^+-N /ολικού-N με υψηλό επίπεδο ολικού-N αύξησε σημαντικά τη συγκέντρωση Mg^{2+} στα φύλλα σε σύγκριση και με τις δύο επεμβάσεις υψηλής αναλογίας NH_4^+-N /ολικού-N (**Εικόνα 26**). Στις ρίζες, παρατηρήθηκε προοδευτική αύξηση της συγκέντρωσης Mg^{2+} σε όλες τις επεμβάσεις, ανεξαρτήτου σταδίου ανάπτυξης του φυτού, χωρίς όμως να παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.

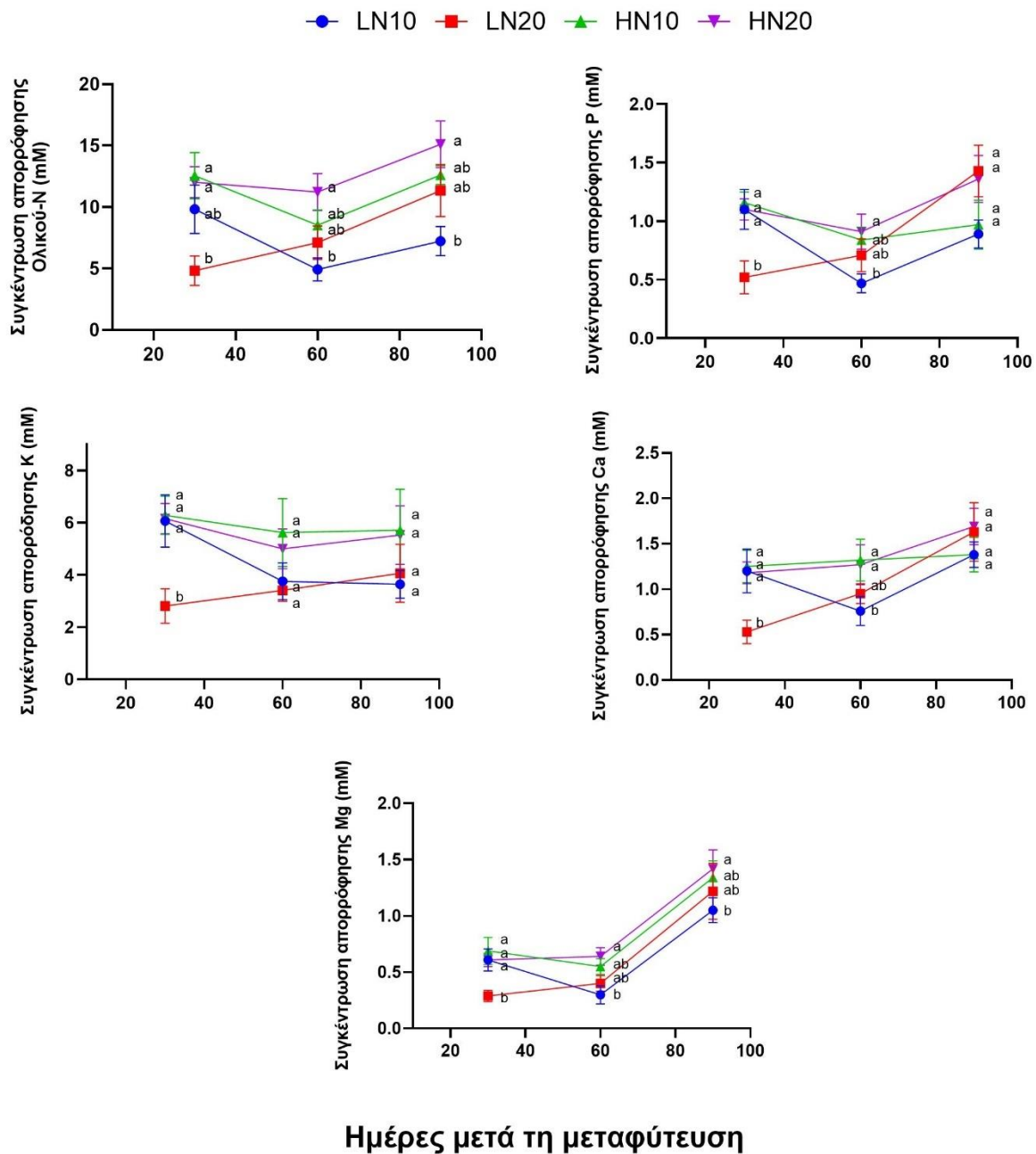
5.3.4 Συγκέντρωση απορρόφησης (ΣΑ)

Οι συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) ολικού-N, P, K^+ , Ca^{2+} και Mg^{2+} του ασκόλυμπρου κατά τις πρώτες 30 ημέρες καλλιεργητικής περιόδου, που υπολογίσθηκαν με βάση την ανάκτηση των θρεπτικών στοιχείων από τη φυτική βιομάζα και την αθροιστική απορρόφηση νερού, έδειξαν ότι μειώθηκαν σημαντικά στην επέμβαση υψηλής αναλογίας NH_4^+-N /ολικού-N, όταν αυτό συνδυάστηκε με χαμηλό επίπεδο ολικού-N. Ωστόσο, κατά την επόμενη περίοδο καλλιέργειας, οι συγκεντρώσεις απορρόφησης των μακροθρεπτικών στοιχείων επηρεάστηκαν διαφορετικά από τις επεμβάσεις που εφαρμόστηκαν στο πείραμα (**Εικόνα 25**). Πιο συγκεκριμένα, ο συνδυασμός υψηλής αναλογίας NH_4^+-N /ολικού-N με υψηλό επίπεδο ολικού-N (HN20) είχε ως αποτέλεσμα την εκτίμηση υψηλότερων συγκεντρώσεων απορρόφησης ολικού-N, P, K^+ , Ca^{2+} και Mg^{2+} . Ωστόσο, σημαντικές διαφορές προέκυψαν μόνο μεταξύ των επεμβάσεων HN20 και LN10 και στα δύο διαστήματα καλλιέργειας (30-60 και 60-90 HMM) για τα μακροστοιχεία οργανικό-N και Mg^{2+} και μόνο στο διάστημα καλλιέργειας από 30-60 HMM για τα μακροστοιχεία P και Ca^{2+} (**Εικόνα 28**).



Ημέρες μετά τη μεταφύτευση

Εικόνα 27. Επίδραση των επεμβάσεων θρεπτικών διαλυμάτων (LN10, LN20, HN10 και HN20) για κάθε ξεχωριστό στάδιο συγκομιδής (30, 60 και 90 HMM) στις συγκεντρώσεις μακροθρεπτικών στοιχείων στο υπέργειο και υπόγειο τμήμα του φυτού, αντίστοιχα. Μέσοι όροι ($n = 4$) με διαφορετικά μικρά γράμματα σε κάθε ημερομηνία δειγματοληψίας διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας $P \leq 5\%$ σύμφωνα με την δοκιμή Duncan.



Εικόνα 28. Επίδραση της συγκέντρωσης ολικού αζώτου (7,2 και 14,2 mM) και της αναλογίας $NH_4^+-N/total-N$ (0,05 και 0,10) του θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας των φυτών ασκόλυμπρου, στις συγκεντρώσεις απορρόφησης μακροθρεπτικών στοιχείων (mM) κατά τα στάδια καλλιέργειας 0-30, 30-60 και 60-90 HMM. Οι μέσοι όροι με διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμή Duncan ($P \geq 5\%$).

5.4 Συζήτηση

Πρόσφατα ερευνητικά δεδομένα αναφέρουν ότι η απόδοση και οι μεταβολικές λειτουργίες των φυτών, συμπεριλαμβανομένης της φωτοσύνθεσης, σχετίζονται άμεσα με το συνολικό επίπεδο τροφοδοσίας του αζώτου σε φυλλώδη λαχανικά καλλιεργούμενα υδροπονικά (Asp et al., 2021; Bonasia et al., 2008; Chatzigianni et al., 2018; Mahlangu et al., 2016; Maršić and Osvald, 2002;

Paschoalinotto et al., 2023; Schiattone et al., 2018). Αντίστοιχα, η αύξηση της τροφοδοσίας ολικού-N από 7,2 σε 14,2 mM στο θρεπτικό διάλυμα είχε σημαντικό αντίκτυπο στην ανάπτυξη των φυτών, καθώς αύξησε τον αριθμό των φύλλων και το νωπό και ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος, μόνο όμως όταν η τροφοδοσία $\text{NH}_4^+\text{-N}$ αποτελούσε το 10% του συνολικά τροφοδοτούμενου αζώτου στο θρεπτικό διάλυμα (Εικόνα 27). Ομοίως, οι Maršić and Osvald (2002) αναφέρουν ότι το νωπό βάρος των φύλλων και ρίζας καθώς και η διάμετρος της ροζέτας υδροπονικής καλλιέργειας μαρουλιού (*Lactuca sativa* var. capitata L.) αυξήθηκαν σημαντικά όταν το επίπεδο τροφοδοσίας νιτρικού αζώτου ήταν 13 mM σε σύγκριση με το χαμηλότερο επίπεδο των 5 mM. Επιπλέον, σε πείραμα με σπανάκι υδροπονικής καλλιέργειας, η σταδιακή αύξηση του ολικού-N από 4 σε 8 mM αύξησε σημαντικά την εμπορεύσιμη απόδοση του φυτού (Lin et al., 2014). Η μείωση του ολικού-N στο τροφοδοτούμενο θρεπτικό διάλυμα στα 7,2 mM μείωσε τη συγκέντρωση του οργανικού-αζώτου τόσο στα φύλλα όσο και στις κονδυλώδεις ρίζες των φυτών του ασκόλυμπρου, στις 60 και 90 ΗΜΜ, στο οποίο πιθανώς οφείλεται η μειωμένη ανάπτυξη του υπέργειου μέρους του φυτού στις επεμβάσεις χαμηλής τροφοδοσίας ολικού-N. Τα αποτελέσματα από τα ποσοτικά δεδομένα του φυτού συμφωνούν με αποτελέσματα προηγούμενων ερευνητικών δεδομένων στο μαρούλι (Thapa et al., 2022), ραδίκι (Bonasia et al., 2017) και σταμναγκάθι (Chatzigianni et al., 2018). Ωστόσο, η μείωση της συγκέντρωσης ολικού-N από 14,2 σε 7,2 mM στο τροφοδοτούμενο θρεπτικό διάλυμα δεν φάνηκε να ζημιώνει την φωτοσυνθετική λειτουργία των φυτών. Επομένως, φαίνεται ότι η μειωμένη μεταφορά αζώτου στα φύλλα του ασκόλυμπρου επηρεάζει αρνητικά άλλες μεταβολικές λειτουργίες πέρα από τη φωτοσύνθεση.

Η πηγή του αζώτου έχει επίσης κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη των φυτών και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των φυλλωδών λαχανικών. Δημοσιευμένα στοιχεία αναφέρουν ότι η αύξηση της αναλογίας $\text{NH}_4^+\text{-N}$ /ολικού-N, άνω ορίων στο τροφοδοτούμενο θρεπτικό διάλυμα, το οποίο συνήθως κυμαίνεται από 10 έως 15%, είναι επιζήμια για την ανάπτυξη πολλών φυτικών ειδών (Akl et al., 2003; Santamaria et al., 1998; Savvas et al., 2003; Wang et al., 2022). Στην παρούσα μελέτη, η αύξηση της αναλογίας NH_4^+ /ολικού-N σε ποσοστό 20% στο τροφοδοτούμενο θρεπτικό διάλυμα περιόρισε τις παραμέτρους ανάπτυξης των φύλλων ανεξάρτητα από το επίπεδο τροφοδοσίας ολικού-N. Ωστόσο, η μείωση της ανάπτυξης των φύλλων στην επέμβαση υψηλής σχέσης NH_4^+ /ολικού-N σε συνδυασμό με το χαμηλό επίπεδο ολικού-N αποδίδεται κυρίως στη μειωμένη τροφοδοσία ολικού αζώτου και όχι στην υψηλή τροφοδοσία αμμωνιακού αζώτου. Πράγματι, όπως παρουσιάζεται στον **Πίνακα 13**, η συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου στις επεμβάσεις LN20 και HN10 (1,40 mM και για τις δύο, παρά τις διαφορετικές αναλογίες NH_4^+ /ολικό-N) είτε είχε ουδέτερη είτε θετική επίδραση στην απόδοση των φυτών ενώ η υψηλότερη συγκέντρωση

αμμωνιακού αζώτου της μεταχείρισης HN20 (2,80 mM) είχε αρνητική επίδραση παρά την αύξηση του συνολικού N. Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι το απόλυτο επίπεδο τροφοδοσίας αμμωνιακού αζώτου είναι πιο κρίσιμο για την ανάπτυξη των φυτών σε καλλιέργειες εκτός εδάφους σε σχέση με την αναλογία NH_4^+ /ολικού-N. Επομένως, μια συγκέντρωση NH_4^+ -N της τάξης του 1,40 mM στο τροφοδοτούμενο θρεπτικό διάλυμα αποτελεί βέλτιστη συγκέντρωση για τον ασκόλυμπρο, το οποίο είναι παρόμοιο με αυτό που προτείνεται για τις περισσότερες θερμοκηπιακές καλλιέργειες κηπευτικών (Sonneveld and Voogt, 2009). Ωστόσο, αυτό το επίπεδο τροφοδοσίας αμμωνιακού αζώτου θα πρέπει να συνδυαστεί με ένα επίπεδο τροφοδοσίας ολικού-N περίπου 14 mM ώστε να μεγιστοποιηθεί η ανάπτυξη του φυτού. Πολλές βιβλιογραφικές αναφορές προτείνουν ως βέλτιστο εύρος της σχέσης NH_4^+ /ολικού-N από 0,05 έως 0,10 (Adams, 2002) ενώ σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει έως και το 0,15 (Sonneveld and Voogt, 2009), αλλά αυτό ισχύει μόνο εάν το επίπεδο τροφοδοσίας ολικού αζώτου είναι περίπου 15 mM (από 12 έως 18 mM), που αποτελεί και την τυπική συγκέντρωση για την υδροπονική καλλιέργεια των περισσότερων κηπευτικών ειδών (de Kreij and Van Leeuwen, 2001; Savvas et al., 2009; Sonneveld and Voogt, 2009).

Σε αντίστοιχη εργασία, μια σχέση 0,25 NH_4^+ /ολικού-N προώθησε την ανάπτυξη του κινέζικου μπρόκολου (*Brassica oleracea* Alboglabra) διατηρώντας παράλληλα το pH του θρεπτικού διαλύματος εντός του βέλτιστου εύρους, ενώ η υπερβολική προσθήκη NH_4^+ -N προκάλεσε οξίνιση της ριζόσφαιρας και τοξικότητα που ανέστειλε περαιτέρω την ανάπτυξη φυτών (Wang et al., 2022). Αντιθέτως, το νωπό και ξηρό βάρος σε ένα αντίστοιχο άγριο λαχανευόμενο φυτό, το σταμναγκάθι (*Cichorium spinosum* L), δεν φάνηκε να περιορίζεται ακόμα και όταν η συγκέντρωση NH_4^+ -N έφτασε το 50% του ολικού-N, αν και προκάλεσε σημαντική μείωση του pH στην ριζόσφαιρα (Chatzigianni et al., 2018). Επιπλέον, η ανάπτυξη μαρουλιού δεν περιορίστηκε από την αύξηση έως και 30% τροφοδοσίας NH_4^+ -N στο θρεπτικό διάλυμα (Savvas et al., 2006). Σε αντίθεση με τα φυλλώδη λαχανικά, σε πείραμα τομάτας, όταν η σχέση NH_4^+ /ολικού-N υπερέβη το 0,15 παρατηρήθηκε δραστική μείωση του pH στη ριζόσφαιρα, η οποία κατ' επέκταση περιόρισε σημαντικά την απόδοση του φυτού (Akl et al., 2003). Επομένως, σύμφωνα με τα αποτελέσματα, διαφορετικά φυτά μπορεί να έχουν πολύ διαφορετική απόκριση στα υψηλά επίπεδα τροφοδοσίας αμμωνιακού αζώτου.

Στην παρούσα ερευνητική μελέτη, αν και η τροφοδοσία ολικού-N ήταν επαρκής (14,2 mM), η συγκέντρωση NH_4^+ -N στο 2,80 mM (η οποία αντιστοιχούσε σε αναλογία NH_4^+ /ολικού-N 0,20) περιορίσε σημαντικά την ανάπτυξη των φύλλων. Ωστόσο, αυτή η μείωση της ανάπτυξης των φύλλων δεν σχετίζεται με την μείωση του pH σε επίπεδα επιζήμια για το φυτό, δηλαδή κάτω του

5 (Sonneveld and Voogt, 2009) στο διάλυμα απορροής και επομένως στη ριζόσφαιρα των φυτών. Αντίθετα, το υψηλό επίπεδο τροφοδοσίας $\text{NH}_4^+\text{-N}$ διατήρησε το pH της ριζόσφαιρας πιο κοντά στο βέλτιστο εύρος, δηλαδή 5,5 έως 6,5 (Savvas and Gruda, 2018), σε σύγκριση με το pH της απορροής στις επεμβάσεις με χαμηλότερα επίπεδα τροφοδοσίας $\text{NH}_4^+\text{-N}$. Επομένως, από τα αποτελέσματα γίνεται προφανές ότι ένα ποσοστό αμμωνιακού αζώτου κοντά στο 20% (σε σχέση με το ολικό άζωτο στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας) έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της ανάπτυξης του φυτού.

Η αυξημένη βλαστική ανάπτυξη (αριθμός φύλλων και διάμετρος ροζέτας) ως αποτέλεσμα της αυξημένης τροφοδοσίας αζώτου στο θρεπτικό διάλυμα, όπως επίσης και η αυξημένη στοματική αγωγιμότητα των φύλλων, πιθανώς εξηγούν την αυξημένη κατανάλωση νερού της επέμβασης HN10 σε σύγκριση με τις επεμβάσεις LN10, LN20 και HN20. Αντίστοιχα αποτελέσματα αναφέρονται και βιβλιογραφικά, όπου το αυξημένο επίπεδο αμμωνιακού αζώτου σε σχέση με το επίπεδο νιτρικού αζώτου στο θρεπτικό διάλυμα επηρεάζει αρνητικά πολλές φυσιολογικές διεργασίες όπως ο ρυθμός σύνθεσης κυτοκίνινης και κατά συνέπεια ο ρυθμός ανάπτυξης των φύλλων (Errebhi and Wilcox, 1990; Walch-Liu et al., 2000; Yuan-Yuan et al., 2021). Επομένως, η έντονη μείωση της στοματικής αγωγιμότητας στη επέμβαση HN20, μπορεί εν μέρει να οφείλεται στην μειωμένη συγκέντρωση K^+ στα φύλλα ως συνέπεια της αυξημένης αναλογίας NH_4^+ /ολικού-N, ιδιαίτερα σε μεταγενέστερα στάδια καλλιέργειας. Η μειωμένη συγκέντρωση K^+ στα φύλλα στην επέμβαση υψηλής αναλογίας τροφοδοσίας NH_4^+ /ολικού-N μπορεί να αποδοθεί στον ανταγωνισμό πρόσληψης μεταξύ καλίου και αμμωνιακού αζώτου (Sonneveld and Voogt, 2009). Ωστόσο, το K^+ διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στη ρύθμιση της σπαργής των καταφρακτικών κυττάρων (Pissolato et al., 2019). Συνεπώς, η μείωση της συγκέντρωσης K^+ στους ιστούς των φύλλων στην επέμβαση HN20 αποτελεί πιθανώς τη βασικότερη αιτία της μειωμένης αθροιστική πρόσληψης νερού και κατ' επέκταση της μειωμένης ανάπτυξης του υπέργειου τμήματος του φυτού.

Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, παρατηρήθηκε σταδιακή αύξηση του pH του διαλύματος απορροής σε όλες τις επεμβάσεις θρεπτικών διαλυμάτων, όμως ο ρυθμός αύξησης του pH ήταν πιο έντονος στις μεταχειρίσεις LN10, LN20 και HN10 σε σύγκριση με την επέμβαση HN20. Το χαμηλότερο pH του διαλύματος απορροής της επέμβασης HN20 σχετίζεται με την υψηλότερη συγκέντρωση $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (2,80 mM) του θρεπτικού διαλύματος σε σύγκριση με εκείνες των LN10 (0,70 mM), LN20 (1,40 mM) και HN10 (1,40 mM). Τα υψηλότερα επίπεδα του pH στο διάλυμα απορροής των επεμβάσεων LN10, LN20 και HN10, ήταν πιθανώς αποτέλεσμα της αυξημένης αναλογίας πρόσληψης $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$, η οποία προκάλεσε την απελευθέρωση διττανθρακικών και καρβοξυλικών ανιόντων για την ηλεκτροχημική εξισορρόπηση στο

κυτταρόπλασμα (Savvas and Adamidis, 1999; Tabatabaei et al., 2006). Ομοίως, οι (Conversa et al., 2021) και (Chatzigianni et al., 2018) αναφέρουν σταδιακή αύξηση του pH της ριζόσφαιρας όταν μειώθηκε η αναλογία $\text{NH}_4^+\text{-N}$ /ολικού-N στο διάλυμα τροφοδοσίας υδροπονικής καλλιέργειας ραδικιού (*Chicorium endivia* L.) και σταμναγκαθιού (*Cichorium spinosum* L), αντίστοιχα. Ωστόσο, σε όλες τις επεμβάσεις, το pH της απορροής κυμάνθηκε μεταξύ 6,5 έως 8,15 (για την περίοδο καλλιέργειας 50-90 HMM) το οποίο είναι σημαντικά υψηλότερο από το βέλτιστο εύρος (5,0-6,0) για τα περισσότερα φυτικά είδη που καλλιεργούνται υδροπονικά. Το σχετικά αυξημένο επίπεδο pH του διαλύματος απορροής σε όλες τις επεμβάσεις σε σύγκριση με το βέλτιστο εύρος μπορεί να αποδοθεί στη συνδυασμένη επίδραση της i) απότομης πτώσης της συγκέντρωσης NH_4^+ στη ζώνη της ριζόσφαιρας (Savvas et al., 2006, 2003), ii) στις φυσικοχημικές ιδιότητες του ανόργανου υποστρώματος (περλίτης) που χρησιμοποιήθηκε για την καλλιέργεια του φυτού (Tsukagoshi and Shinohara, 2019) και iii) ο υψηλός ρυθμός διαπνοής και συνεπώς ο αυξημένος ρυθμός απορρόφησης $\text{NO}_3^-\text{-N}$ από τα φυτά, ως συνέπεια των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούσαν στο θερμοκήπιο κατά τη αρχική καλλιεργητική περίοδο (1-50 HMM), θερμοκρασίες ιδιαίτερα αυξημένες για ένα φυτό ψυχρής περιόδου όπως ο ασκόλυμπρος (Magalhaes and Wilcox, 1983; Rhogat et al., 2014). Γενικά, στην ζώνη ανάπτυξης της ρίζας, επίπεδα pH που πλησιάζουν ή και υπερβαίνουν το 8 είναι επιβλαβή για τα φυτά που τροφοδοτούνται με $\text{NH}_4^+\text{-N}$ λόγω της αυξημένης μετατροπής του αμμωνίου σε ελεύθερη αμμωνία, η οποία είναι εξαιρετικά τοξική για τα κύτταρα της ρίζας (Raab and Terry, 1994; Sonneveld and Voogt, 2009). Επομένως, στον ασκόλυμπρο, παρόλο που δεν παρατηρήθηκαν συμπτώματα τοξικότητας αμμωνίας στην ρίζα κατά τα αρχικά στάδια καλλιέργειας (0-60 HMM), το 50% των φυτών που τροφοδοτήθηκαν με αυξημένη συγκέντρωση NH_4^+ (επέμβαση HN20) παρουσίασαν εκτεταμένα συμπτώματα σήψης των ριζών (Εικόνα 30) και κατ' επέκταση υποβάθμιση της εμπορικής απόδοσης του φυτού στις 90 HMM. Επίσης, σε ορισμένα ευαίσθητα φυτικά είδη, η τοξικότητας αμμωνίας μπορεί επίσης να οδηγήσει στην μείωση της πυκνότητας χλωροφύλλης (Sandoval-Villa et al., 1999) καθώς και στην διακοπή της φωτοσυνθετικής λειτουργίας του χλωροπλάστη (Dou et al., 1999). Στην παρούσα ερευνητική εργασία, η σχετική πυκνότητα χλωροφύλλης SPAD, η μέγιστη φωτοχημική απόδοση του φωτοσυστήματος II (Fv/Fm) και η οπτική εικόνα των φύλλων του *S. hispanicus* L. δεν φάνηκαν να επηρεάζονται αρνητικά από την αυξημένη τροφοδοσία αμμωνιακού αζώτου, γεγονός που αποδεικνύει ότι η αρνητική επίδρασή είχε σοβαρή επίπτωση μόνο στην ανάπτυξη του ριζικού συστήματος. Ωστόσο, δεδομένου ότι η κονδυλώδης ρίζα αποτελεί το κύριο εδάδιμο μέρος του φυτού, η τροφοδοσία αμμωνιακού αζώτου σε υδροπονικά συστήματα καλλιέργειας του ασκόλυμπρου, δεν θα πρέπει ποτέ να πλησιάζει ή να υπερβαίνει το 20% της συνολικής

τροφοδοσίας ολικού αζώτου, τουλάχιστον όταν η τελευταία κυμαίνεται κοντά στο επίπεδο του 14,2 mM.

Η πειραματική εκτίμηση των συγκεντρώσεων απορρόφησης αποτελεί τη βάση για τη σύνθεση βέλτιστων θρεπτικών διαλυμάτων για καλλιέργεια ενός συγκεκριμένου φυτικού είδους σε κλειστό σύστημα υδροπονικής καλλιέργειας (Blok et al., 2023; Neocleous and Savvas, 2017). Ως εκ τούτου, οι συγκεντρώσεις απορρόφησης που προσδιορίστηκαν στην παρούσα ερευνητική εργασία μπορεί να αξιοποιηθεί για την κατάρτιση μιας βέλτιστης συνταγής θρέψης σε κλειστό σύστημα εκτός εδάφους καλλιέργειας του φυτού. Στην παρούσα μελέτη, οι συγκεντρώσεις απορρόφησης των K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , N και P ήταν ως επί το πλείστον παρόμοιες στις τρεις από τις τέσσερις επεμβάσεις που εξετάστηκαν (LN10, LN20, HN10) και μόνο η μεταχείριση HN20 έδωσε σαφώς υψηλότερα επίπεδα απορρόφησης ολικού-N, P, Ca^{2+} και Mg^{2+} κατά το μεταγενέστερο στάδιο καλλιεργητικής περιόδου, δηλ. από 60 έως 90 HMM. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις απορρόφησης ολικού-N, P, K^+ , Ca^{2+} και Mg^{2+} στην επέμβαση HN20 σε σύγκριση με τις άλλες τρεις επεμβάσεις σχετίζονται περισσότερο με την σημαντική μείωση της απορρόφησης νερού παρά με την μείωση των απόλυτων συγκεντρώσεων μακροθρεπτικών στοιχείων στους φυτικούς ιστούς. Πράγματι, δεδομένου ότι οι συγκεντρώσεις απορρόφησης αποτελούν κλάσμα μεταξύ της συγκέντρωσης θρεπτικών στοιχείων στο φυτικό ιστό και της ποσότητας νερού που καταναλώνεται για μια δεδομένη καλλιεργητική περίοδο, μια ισχυρότερη μείωση του τελευταίου σε σχέση με το πρώτο οδηγεί σε υψηλότερα επίπεδα συγκεντρώσεων απορρόφησης. Ομοίως, οι Ropokis et al. (2019) αναφέρουν αυξημένες συγκεντρώσεις απορρόφησης K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} και N υπό συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας στην υδροπονική καλλιέργεια πιπεριάς, ως συνέπεια της μείωσης της απορρόφησης νερού κατά 24%. Αν και τα βιβλιογραφικά δεδομένα που μελετούν τις συγκεντρώσεις απορρόφησης φυλλωδών λαχανικών όπως ο ασκόλυμπρος είναι περιορισμένα, τα αποτελέσματα της παρούσας ερευνητικής εργασίας είναι συγκρίσιμα με προηγουμένως δημοσιευμένες τιμές συγκεντρώσεων απορρόφησης στο μαρούλι (Neocleous and Savvas, 2019; Savvas, et al., 2013). Μόνη εξαίρεση αποτελεί η συγκέντρωση απορρόφησης του Ca^{2+} , η οποία φαίνεται να είναι σχετικά χαμηλότερη στον ασκόλυμπρο, ως αποτέλεσμα της σχετικά μειωμένης συγκέντρωσης αυτού του μακροθρεπτικού στοιχείου στον ξηρό φυτικό ιστό των φύλλων και της ρίζας, σε σύγκριση με εκείνες που αναφέρονται σε άλλα κηπευτικά είδη φυτών.



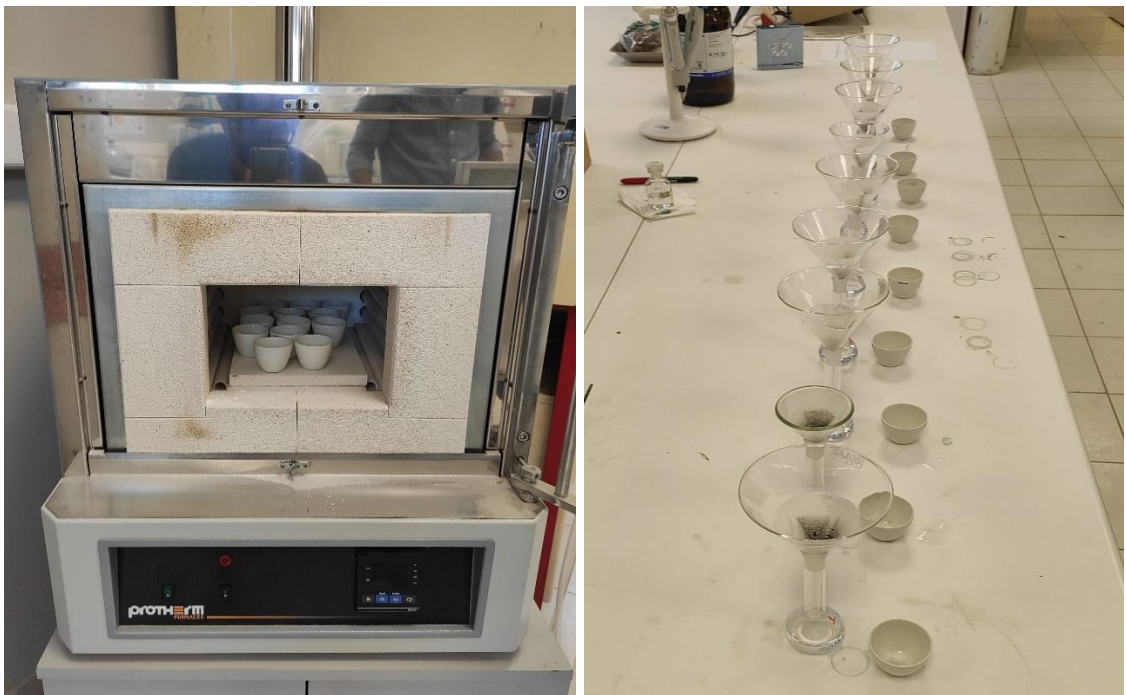
Εικόνα 29. Πανοραμική όψη φυτών *S. hispanicus L.* που καλλιεργήθηκαν σε σάκους, 30 HMM. Κάθε σάκος απεικονίζει μία από τις τέσσερις επεμβάσεις θρεπτικού διαλύματος, (HN20, HN10, LN20 και LN10 από αριστερά προς τα δεξιά)



Εικόνα 30. Συμπτώματα σήψης που προκλήθηκαν από την επέμβαση με θρεπτικό διάλυμα HN20 στη κονδυλώδη ρίζα (e) του ασκόλυμπρου., σε σχέση με αντίστοιχα υγιή φύλλα (a, b, c, d) του ίδιου φυτού, 90 HMM.



Εικόνα 31. Συλλογή και καταγραφή κλάσματος απορροής (αριστερά) από κάθε πειραματικό τεμάχιο (κανάλια υποδοχής των σάκων) και εκτίμηση στοματικής αγωγιμότητας (δεξιά) με χρήση οργάνου AP4 (Delta-T Devices, Cambridge, UK).



Εικόνα 32. Αποτέφρωση φυτικού ιστού στους 550 °C (αριστερά) και διήθηση υδατικών εκχυλισμάτων (δεξιά).



Εικόνα 33. Προσδιορισμός οργανικού αζώτου στους φυτικούς ιστούς με τη μέθοδο Kjeldahl μετά την ανοργανοποίηση με H_2SO_4 (αριστερά) και εκτίμηση των συγκεντρώσεων P, K, Ca και Mg από τα ληφθέντα υδατικά εκχυλίσματα με χρήση οργάνου ICP-MS (NexION 2000, PerkinElmer) (δεξιά).

Κεφάλαιο 6. Γενικά Συμπεράσματα

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, ο ασκόλυμπρος καλλιεργήθηκε υδροπονικά χρησιμοποιώντας θρεπτικά διαλύματα σε επίπεδα ηλεκτρικής αγωγιμότητας που απαντώνται συχνά στο νερό άρδευσης σε αγροτικές περιοχές στη λεκάνη της Μεσογείου και αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την απόδοση των καλλιεργειών (0,5 – 15,0 mM NaCl). Αυτή είναι η πρώτη τεκμηριωμένη αξιολόγηση των επιπτώσεων της αλατότητας στην απόδοση του *S. hispanicus* L. καθώς και των επιπτώσεών του στη φυσιολογία και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του φυτού σε σύστημα καλλιέργειας εκτός εδάφους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, ο ασκόλυμπρος ήταν ανθεκτικός σε μέτρια επίπεδα αλατότητας έως και τις 90 HMM, ωστόσο στους 4 μήνες καλλιέργειας παρατηρήθηκε σημαντική μείωση στο νωπό και ξηρό βάρος των φύλλων και της κονδυλόριζας. Κατά συνέπεια, συνιστάται η πρόιμη συγκομιδή του φυτού (πριν από το 120 HMM) εάν η συγκέντρωση NaCl του νερού άρδευσης υπερβαίνει τα 10 mM. Αντίστοιχα, τα δημοσιευμένα στοιχεία για την ποιότητα του *S. hispanicus* L. είναι περιορισμένα και συνεπώς, αυτή είναι η πρώτη μελέτη που εξετάζει τις επιπτώσεις της αλατότητας στα συνολικά αντιοξειδωτικά, τα φλαβονοειδή και τη συγκέντρωση ολικών φαινολικών στα βρώσιμα μέρη (φύλλο και κονδυλώδης ρίζα) του συγκεκριμένου φυτικού είδους. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας είναι ενθαρρυντικά για την εμπορική αξιοποίηση του *S. hispanicus* L. σε συστήματα καλλιέργειας που πλήττονται από μέτρια επίπεδα αλατότητας και ειδικότερα για την υιοθέτηση εναλλακτικών και πιο σύγχρονων τεχνικών καλλιέργειας, όπως η καλλιέργεια εκτός εδάφους. Ωστόσο, στο μέλλον θα πρέπει να διεξαχθεί περαιτέρω έρευνα για να εξεταστεί η επίδραση ακόμη υψηλότερων επιπέδων αλατότητας σε διαφορετικούς οικότυπους του ασκόλυμπρου.

Από τα δεδομένα της μελέτης της επίδρασης των υποστρωμάτων και της γεωμετρίας του υποδοχέα στα εμπορικά χαρακτηριστικά του ασκόλυμπρου, διαπιστώνεται η σημασία στην ακρίβεια εκτίμησης της ΧΚΥ στα υποστρώματα που είθισται να χρησιμοποιούνται σε συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους για την καλύτερη κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ υποστρώματος και φυτού και ως εκ τούτου τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας χρήσης του νερού και της απόδοσης φυτών που αναπτύσσουν κονδυλόριζα. Σε αυτό το πλαίσιο, το HYPROP2 βελτίωσε την εκτίμηση της ΧΚΥ και επέτρεψε τη μοντελοποίηση και ανάλυση κρίσιμων υδραυλικών ιδιοτήτων (δηλαδή K, AWC και EAW) που μπορούν να βελτιώσουν ουσιαστικά την κατανόηση για τις διαδικασίες διέγερσης και αναστολής της ανάπτυξης των φυτών που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα νερού και αέρα στη ριζόσφαιρα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης, ο κοκοφοίνικας αύξησε σημαντικά την απόδοση των φύλλων και της κονδυλόριζας του ασκόλυμπρου σε σύγκριση με τον περλίτη λόγω της βελτιωμένης διαθεσιμότητας σε νερό. Ωστόσο,

το υπόστρωμα 4Κ0Π θα μπορούσε να αντικατασταθεί με ασφάλεια από το μίγμα υποστρώματος 3Κ1Π χωρίς να προκαλέσει απώλειες στην απόδοση, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα το κόστος παραγωγής. Επιπλέον, το ύψος του φυτοδοχείου είχε σημαντική επίδραση στην αναλογία $FW_L:FW_R$, το οποίο σημαίνει ότι ο σάκος θα πρέπει να προτιμάται από τη γλάστρα εάν στοχεύουμε σε υψηλότερη παραγωγή φύλλων και λιγότερο κονδυλώδη ρίζα και αντίστροφα. Συνεπώς, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση από τους παραγωγούς στην επιλογή του καταλληλότερου υποστρώματος και γεωμετρίας υποδοχέα, λαμβάνοντας υπόψη τα επιθυμητά χαρακτηριστικά για παραγωγής του ασκόλυμπρου, δηλαδή φύλλα ή κονδυλώδεις ρίζες, δεδομένου ότι και τα δύο είναι βρώσιμα. Επίσης, η παρούσα εργασία έδειξε ότι η αύξηση του ύψους του υποδοχέα που συνήθως χρησιμοποιούνται για την υποδοχή των υποστρωμάτων σε καλλιέργειες εκτός εδάφους, αυξάνει την αέρα αλλά μπορεί να περιορίσει σημαντικά την υδατοχωρητικότητα του φυτοδοχείου. Τέλος, η επίδραση του ύψους του υποδοχέα στη διαθεσιμότητα νερού οφείλεται κυρίως στη μείωση της περιεκτικότητας σε νερό στο ανώτερο στρώμα του υποστρώματος, η οποία περιορίζει την υδραυλική αγωγιμότητα του υποστρώματος, προκαλώντας μερική υδατική καταπόνηση με αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης.

Επίσης, στην παρούσα ερευνητική διατριβή, διερευνήθηκε η επίδραση της πηγής (NH_4^+ -N/ολικού-N) και επιπέδου τροφοδοσίας ολικού-N σε σύστημα εκτός εδάφους καλλιέργειας του άγριου λαχανοφόρου φυτού *S. hispanicus* L. Ένα επίπεδο τροφοδοσίας ολικού αζώτου στα 14,2 mM σε συνδυασμό με μια αναλογία NH_4^+ -N/ολικού-N 10% αύξησε σημαντικά τη θροιστική απορρόφηση νερού, τον αριθμό των φύλλων, το νωπό και ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος σε σύγκριση με το επίπεδο 7,2 mM ολικού-N καθώς και σε σχέση με τα 14,2 mM ολικού αζώτου και αναλογία NH_4^+ -N/ολικού-N 20%. Ο συνδυασμός υψηλού επιπέδου ολικού-N και υψηλής αναλογίας NH_4^+ -N/ολικού-N μείωσε την στοματική αγωγιμότητα αλλά διατήρησε το pH στην ζώνη ρίζας πιο κοντά στο επιθυμητό εύρος τιμών. Η φωτοσυνθετική ικανότητα των φύλλων δεν επηρεάστηκε από τις επεμβάσεις θρεπτικών διαλυμάτων που εφαρμόστηκαν, παρά τη μειωμένη ανάπτυξη των φύλλων. Η αυξημένη τροφοδοσία αμμωνιακού αζώτου προκάλεσε σήψη της ρίζας και κατά συνέπεια μείωσε την εμπορική απόδοση της κονδυλόριζας, 90 HMM. Κατά συνέπεια, ένα επίπεδο τροφοδοσίας ολικού-N περίπου 14,2 mM με μόνο 10% αμμωνίας φαίνεται να αποτελεί την ιδανικότερη στρατηγική για την εξασφάλιση υψηλών αποδόσεων στα φύλλα καθώς και την διασφάλιση της βέλτιστης ποιότητας εδωδίων ριζών σε σύστημα εκτός εδάφους καλλιέργειας του φυτού. Συμπερασματικά, οι συγκεντρώσεις απορρόφησης, που εκτιμήθηκαν στην παρούσα ερευνητική εργασία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατάρτιση μιας βέλτιστης σύνθεσης θρεπτικού διαλύματος σε κλειστά συστήματα εκτός εδάφους καλλιέργειας του φυτού.

Διεθνής Βιβλιογραφία

- Acosta-Motos, J.R., Ortuño, M.F., Bernal-Vicente, A., Diaz-Vivancos, P., Sanchez-Blanco, M.J., Hernandez, J.A., 2017. Plant responses to salt stress: Adaptive mechanisms. *Agronomy* 7, 1–38. <https://doi.org/10.3390/agronomy7010018>
- ADAMS, D.J., HILL, M.A., 2004. Potassium Channels and Membrane Potential in the Modulation of Intracellular Calcium in Vascular Endothelial Cells. *J Cardiovasc Electrophysiol* 15, 598–610. <https://doi.org/10.1046/j.1540-8167.2004.03277.x>
- Adams, P., 1993. CROP NUTRITION IN HYDROPONICS. *Acta Hort* 289–306. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1993.323.26>
- Adams, P., 1990. Effect of salinity on the distribution of calcium in tomato (*Lycopersicon esculentum*) fruit and leaves, in: *Plant Nutrition — Physiology and Applications*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 473–476. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0585-6_78
- Adams, P., Ho, L.C., 1989. Effects of constant and fluctuating salinity on the yield, quality and calcium status of tomatoes. *Journal of Horticultural Science* 64, 725–732. <https://doi.org/10.1080/14620316.1989.11516015>
- Adhikari, N.D., Simko, I., Mou, B., 2019. Phenomic and physiological analysis of salinity effects on lettuce. *Sensors (Switzerland)* 19. <https://doi.org/10.3390/s19214814>
- Ahmed, M., Rauf, M., Akhtar, M., Mukhtar, Z., Saeed, N.A., 2020. Hazards of nitrogen fertilizers and ways to reduce nitrate accumulation in crop plants. *Environmental Science and Pollution Research* 27, 17661–17670. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08236-y>
- 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. *Eur J Hort* 68, 204–211.
- Al Naddaf, O., Livieratos, I., Stamatakis, A., Tsirogiannis, I., Gizas, G., Savvas, D., 2011. Hydraulic characteristics of composted pig manure, perlite, and mixtures of them, and their impact on cucumber grown on bags. *Sci Hort* 129, 135–141. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.03.023>
- Al-Ismail, K., Herzallah, S.M., Rustom, A.S., 2007. Antioxidant activities of some edible wild Mediterranean plants. *Italian Journal of Food Science* 19, 287–296.
- Amoroso, G., Frangi, P., Piatti, R., Fini, A., Ferrini, F., 2011. Influence of different container typology on ulmus minor plant growth and root morphology. *Acta Hort* 923, 247–254. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.923.37>
- Arnold, G., van Diest, A., 1991. Nitrogen supply, tree growth and soil acidification. *Fertilizer Research* 27, 29–38. <https://doi.org/10.1007/BF01048606>
- Asp, H., Bergstrand, K.J., Hultberg, M., 2021. Circularity in practice: Reusing restaurant waste for in-house vegetable production. *Acta Hort* 1317, 281–286. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1317.32>
- Baker, N.R., 2008. Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis in vivo. *Annu Rev Plant Biol* 59, 89–113. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759>
- Baker, N.R., Rosenqvist, E., 2004. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: An examination of future possibilities. *J Exp Bot* 55, 1607–1621. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh196>

- Balliu, A., Zheng, Y., Sallaku, G., Fernández, J.A., Gruda, N.S., Tuzel, Y., 2021. Environmental and cultivation factors affect the morphology, architecture and performance of root systems in soilless grown plants. *Horticulturae* 7. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7080243>
- Banfalvi, G., 2016. Permeability of biological membranes, *Permeability of Biological Membranes*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28098-1>
- Bengough, A.G., Bransby, M.F., Hans, J., McKenna, S.J., Roberts, T.J., Valentine, T.A., 2006. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. *J Exp Bot* 57, 437–447. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj003>
- Benton Jones Jr, J., 1999. ADVANTAGES GAINED BY CONTROLLING ROOT GROWTH IN A NEWLY-DEVELOPED HYDROPONIC GROWING SYSTEM. *Acta Hort* 221–230. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1999.481.23>
- Bentrup, F., 1990. Potassium ion channels in the plasmalemma. *Physiol Plant* 79, 705–711. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1990.tb00048.x>
- Bilderback, T.E., Fonteno, W.C., 1987. Effects of Container Geometry and Media Physical Properties on Air and Water Volumes in Containers. *J Environ Hortic* 5, 180–182. <https://doi.org/10.24266/0738-2898-5.4.180>
- Blok, C., Voogt, W., Barbagli, T., 2023. Reducing nutrient imbalance in recirculating drainage solution of stone wool grown tomato. *Agric Water Manag* 285, 108360. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108360>
- BLOM-ZANDSTRA, M., 1989. Nitrate accumulation in vegetables and its relationship to quality. *Annals of Applied Biology* 115, 553–561. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1989.tb06577.x>
- Bonasia, A., Conversa, G., Gonnella, M., Serio, F., Santamaria, P., 2008. Effects of ammonium and nitrate nutrition on yield and quality in endive. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 83, 64–70. <https://doi.org/10.1080/14620316.2008.11512348>
- Bonasia, A., Lazzizera, C., Elia, A., Conversa, G., 2017. Nutritional, biophysical and physiological characteristics of wild rocket genotypes as affected by soilless cultivation system, salinity level of nutrient solution and growing period. *Front Plant Sci* 8, 300. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00300>
- Borgognone, D., Cardarelli, M., Rea, E., Lucini, L., Colla, G., 2014. Salinity source-induced changes in yield, mineral composition, phenolic acids and flavonoids in leaves of artichoke and cardoon grown in floating system. *J Sci Food Agric* 94, 1231–1237. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6403>
- Botella, M.A., Martinez, V., Pardines, J., Cerda, A., 1997. Salinity induced potassium deficiency in maize plants. *J Plant Physiol* 150, 200–205. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(97\)80203-9](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(97)80203-9)
- Bouadila, S., Baddadi, S., Ben Ali, R., Ayed, R., Skouri, S., 2023. Deploying low-carbon energy technologies in soilless vertical agricultural greenhouses in Tunisia. *Thermal Science and Engineering Progress* 42, 101896. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101896>
- Bougoul, S., Ruy, S., De Groot, F., Boulard, T., 2005. Hydraulic and physical properties of stonewool substrates in horticulture. *Sci Hortic* 104, 391–405. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2005.01.018>

- Broadley, M.R., Burns, A., Burns, I.G., 2002. RELATIONSHIPS BETWEEN PHOSPHORUS FORMS AND PLANT GROWTH. *J Plant Nutr* 25, 1075–1088. <https://doi.org/10.1081/PLN-120003940>
- Brunetti, G., Šimůnek, J., Piro, P., 2016. A Comprehensive Analysis of the Variably Saturated Hydraulic Behavior of a Green Roof in a Mediterranean Climate. *Vadose Zone Journal* 15, vzj2016.04.0032. <https://doi.org/10.2136/VZJ2016.04.0032>
- Bryson, G.M., Mills, H.A., Sasseville, D.N., Jones Jr, J.B., Barker, A. V, 2014. Plant analysis handbook III: A guide to sampling, preparation, analysis, and interpretation for agronomic and horticultural crops. Micro-Macro Publishing Inc., Athens, GA 609.
- Bunt, A.C., 1988. Media and Mixes for Container-Grown Plants. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-7904-1>
- Bures, S., Pokorny, F.A., Landau, D.P., Ferrenberg, A.M., 1993. Computer simulation of volume shrinkage after mixing container media components. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 118, 757–761. <https://doi.org/10.21273/jashs.118.6.757>
- BURSTROM, H.G., 1968. CALCIUM AND PLANT GROWTH. *Biological Reviews* 43, 287–316. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1968.tb00962.x>
- Cárdenas-Navarro, R., Adamowicz, S., Robin, P., 1999. Nitrate accumulation in plants: A role for water. *J Exp Bot* 50, 613–624. <https://doi.org/10.1093/jxb/50.334.613>
- Carillo, P., Giordano, M., Raimondi, G., Napolitano, F., Stasio, E. Di, Kyriacou, M.C., Sifola, M.I., Roupael, Y., 2020. Physiological and nutraceutical quality of green and red pigmented lettuce in response to NaCl concentration in two successive harvests. *Agronomy* 10, 1–18. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091358>
- Carlile, W.R., Cattivello, C., Zaccheo, P., 2015. Organic Growing Media: Constituents and Properties. *Vadose Zone Journal* 14, vzj2014.09.0125. <https://doi.org/10.2136/vzj2014.09.0125>
- Casciaro, L., Damato, G., 2007. Seed germination of *Scolymus maculatus* L. at different temperatures and under different light conditions. *Acta Horti* 730, 323–329. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.730.42>
- Cavarianni, R.L., Cecílio Filho, A.B., Cazetta, J.O., May, A., Corradi, M.M., 2008. Nutrient contents and production of rocket as affected by nitrogen concentrations in the nutritive solution. *Sci Agric* 65, 652–658. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000600013>
- Cerda, A., Martinez, V., 1988. Nitrogen fertilization under saline conditions in tomato and cucumber plants. *Journal of Horticultural Science* 63, 451–458. <https://doi.org/10.1080/14620316.1988.11515878>
- Chapman, N., Miller, A.J., Lindsey, K., Whalley, W.R., 2012. Roots, water, and nutrient acquisition: Let's get physical. *Trends Plant Sci* 17, 701–710. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.08.001>
- Chartzoulakis, K., Loupassaki, M., Bertaki, M., Androulakis, I., 2002. Effects of NaCl salinity on growth, ion content and CO₂ assimilation rate of six olive cultivars. *Sci Horti* 96, 235–247. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(02\)00067-5](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(02)00067-5)
- Chatzigianni, M., Alkhaled, B., Livieratos, I., Stamatakis, A., Ntatsi, G., Savvas, D., 2018. Impact of nitrogen source and supply level on growth, yield and nutritional value of two contrasting ecotypes of *Cichorium spinosum* L. grown hydroponically. *J Sci Food Agric* 98, 1615–1624. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8636>

- Chatzigianni, M., Ntatsi, G., Theodorou, M., Stamatakis, A., Livieratos, I., Roupheal, Y., Savvas, D., 2019. Functional Quality, Mineral Composition and Biomass Production in Hydroponic Spiny Chicory (*Cichorium spinosum* L.) Are Modulated Interactively by Ecotype, Salinity and Nitrogen Supply. *Front Plant Sci* 10, 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01040>
- Chatzopoulou, E., Carocho, M., Di Gioia, F., Petropoulos, S.A., 2020. The beneficial health effects of vegetables and wild edible greens: The case of the mediterranean diet and its sustainability. *Applied Sciences (Switzerland)* 10, 1–27. <https://doi.org/10.3390/app10249144>
- Cheeseman, J.M., 2015. The evolution of halophytes, glycophytes and crops, and its implications for food security under saline conditions. *New Phytologist* 206, 557–570. <https://doi.org/10.1111/nph.13217>
- Choi, S., Xu, L., Kim, H.J., 2019. Influence of physical properties of peat-based potting mixes substituted with parboiled rice hulls on plant growth under two irrigation regimes. *Hortic Environ Biotechnol* 60, 895–911. <https://doi.org/10.1007/s13580-019-00179-9>
- Chondraki, S., Tzerakis, C., Tzortzakis, N., 2012. Influence of Sodium Chloride and Calcium Foliar Spray on Hydroponically Grown Parsley in Nutrient Film Technique System. *J Plant Nutr* 35, 1457–1467. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.689906>
- Chrispeels, M.J., Crawford, N.M., Schroeder, J.I., 1999. Proteins for Transport of Water and Mineral Nutrients across the Membranes of Plant Cells. *Plant Cell* 11, 661–675. <https://doi.org/10.1105/tpc.11.4.661>
- Ciriello, M., Formisano, L., Pannico, A., El-Nakhel, C., Fascella, G., Duri, L.G., Cristofano, F., Gentile, B.R., Giordano, M., Roupheal, Y., Fusco, G.M., Woodrow, P., Carillo, P., 2021. Nutrient solution deprivation as a tool to improve hydroponics sustainability: Yield, physiological, and qualitative response of lettuce. *Agronomy* 11, 1–15. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081469>
- Clausnitzer, V., Hopmans, J.W., 1994. Simultaneous modeling of transient three-dimensional root growth and soil water flow. *Plant Soil* 164, 299–314. <https://doi.org/10.1007/BF00010082>
- Conversa, G., Bonasia, A., Lazzizzera, C., Elia, A., 2021. Soilless Cultivation System, Electrical Conductivity of Nutrient Solution, and Growing Season on Yield and Quality of Baby-Leaf Oak-Leaf Lettuce. *Agronomy* 2021, Vol. 11, Page 1220 11, 1220. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11061220>
- Coskun, D., White, P.J., 2023. Ion-uptake mechanisms of individual cells and roots: short-distance transport, in: *Marschner's Mineral Nutrition of Plants*. Elsevier, pp. 11–71. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00018-6>
- Cramer, G.R., Lynch, J., Läuchli, A., Epstein, E., 1987. Influx of Na⁺, K⁺, and Ca²⁺ into Roots of Salt-Stressed Cotton Seedlings. *Plant Physiol* 83, 510–516. <https://doi.org/10.1104/pp.83.3.510>
- Croft, H., Arabian, J., Chen, J.M., Shang, J., Liu, J., 2020. Mapping within-field leaf chlorophyll content in agricultural crops for nitrogen management using Landsat-8 imagery. *Precis Agric* 21, 856–880. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09698-y>
- Cuevas, J., Daliakopoulos, I.N., del Moral, F., Hueso, J.J., Tsanis, I.K., 2019. A Review of Soil-Improving Cropping Systems for Soil Salinization. *Agronomy* 9, 295. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060295>

- Curtin, D., Steppuhn, H., Selles, F., 1993. Plant Responses to Sulfate and Chloride Salinity: Growth and Ionic Relations. *Soil Science Society of America Journal* 57, 1304–1310. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700050024x>
- da Silva, F.F., Wallach, R., Chen, Y., 1993. Hydraulic properties of sphagnum peat moss and tuff (scoria) and their potential effects on water availability 154.
- Dahal, K., Li, X.Q., Tai, H., Creelman, A., Bizimungu, B., 2019. Improving potato stress tolerance and tuber yield under a climate change scenario – a current overview. *Front Plant Sci* 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00563>
- Daliakopoulos, I., Papadimitriou, D., Manios, T., 2021. Improving the efficiency of HYPROP by controlling temperature and air flow. *EGU General Assembly Conference Abstracts EGU21-13082*.
- Daliakopoulos, I.N.N., Tsanis, I.K.K., Koutroulis, A., Kourgialas, N.N.N., Varouchakis, A.E.E., Karatzas, G.P.P., Ritsema, C.J.J., 2016. The threat of soil salinity: A European scale review. *Science of the Total Environment* 573, 727–739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.177>
- Davis, J.M., Loescher, W.H., Hammond, M.W., Thornton, R.E., 2022. Response of Potatoes to Nitrogen Form and to Change in Nitrogen Form at Tuber Initiation. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 111, 70–72. <https://doi.org/10.21273/jashs.111.1.70>
- de Boodt, M., Verdonck, O., 1972. THE PHYSICAL PROPERTIES OF THE SUBSTRATES IN HORTICULTURE. *Acta Hortic* 37–44. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1972.26.5>
- De Cortes Sánchez-Mata, M., Tardío, J., 2016. Mediterranean wild edible plants: Ethnobotany and food composition tables, *Mediterranean Wild Edible Plants: Ethnobotany and Food Composition Tables*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3329-7>
- de Kreij, C., Van Leeuwen, G.J.L., 2001. Growth of pot plants in treated coir dust as compared to peat. *Commun Soil Sci Plant Anal* 32, 2255–2265. <https://doi.org/10.1081/CSS-120000281>
- Dias, N.S., Ferreira, J.F.S., Liu, X., Suarez, D.L., 2016. Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*, L.) maintains high inulin, tuber yield, and antioxidant capacity under moderately-saline irrigation waters. *Ind Crops Prod* 94, 1009–1024. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.029>
- Dickson, R.W., Fisher, P.R., Argo, W.R., Jacques, D.J., Sartain, J.B., Trenholm, L.E., Yeager, T.H., 2016. Solution Ammonium: Nitrate ratio and cation/anion uptake affect acidity or basicity with floriculture species in hydroponics. *Sci Hortic* 200, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.12.034>
- Dou, H., Alva, A.K., Bondada, B.R., 1999. Growth and chloroplast ultrastructure of two citrus rootstock seedlings in response to ammonium and nitrate nutrition 1. *J Plant Nutr* 22, 1731–1744. <https://doi.org/10.1080/01904169909365750>
- Du, M., Xiao, Z., Luo, Y., 2022. Advances and emerging trends in cultivation substrates for growing sprouts and microgreens toward safe and sustainable agriculture. *Curr Opin Food Sci* 46, 100863. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100863>
- Du, X., Jian, J., Du, C., Stewart, R.D., 2022. Conservation management decreases surface runoff and soil erosion. *International Soil and Water Conservation Research* 10, 188–196. <https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2021.08.001>
- Eaton, D.A., Ganson, H.M., 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. APHA-AWWA-WEF, Washington, D.C.

- Errebhi, M., Wilcox, G.E., 1990. Plant species response to ammonium-nitrate concentration ratios. *J Plant Nutr* 13, 1017–1029. <https://doi.org/10.1080/01904169009364132>
- Fageria, N.K., 2014. NITROGEN HARVEST INDEX AND ITS ASSOCIATION WITH CROP YIELDS. *J Plant Nutr* 37, 795–810. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.881855>
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., Li, Y.C., 2008. The Role of Nutrient Efficient Plants in Improving Crop Yields in the Twenty First Century. *J Plant Nutr* 31, 1121–1157. <https://doi.org/10.1080/01904160802116068>
- Ferrón-Carrillo, F., Cunha-Chiamolera, T.P.L. da, Urrestarazu, M., 2021. Effect of ammonium nitrogen on pepper grown under soilless culture. *J Plant Nutr* 45, 113–122. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1943438>
- Fields, J.S., Owen, J.S., Zhang, L., Fonteno, W.C., 2016. Use of the evaporative method for determination of soilless substrate moisture characteristic curves. *Sci Hortic* 211, 102–109. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2016.08.009>
- Fussy, A., Papenbrock, J., 2022. Techniques — Chances , Challenges and the Neglected Question.
- Gabriel, M.Z., Altland, J.E., Owen, J.S., 2009. The effect of physical and hydraulic properties of peatmoss and pumice on douglas fir bark based soilless substrates. *HortScience* 44, 874–878. <https://doi.org/10.21273/hortsci.44.3.874>
- Gallegos, J., Álvaro, J.E., Urrestarazu, M., 2020. Container design affects shoot and root growth of vegetable plant. *HortScience* 55, 787–794. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14954-20>
- Ganmore-Neumann, R., Kafkafi, U., 1985. The Effect of Root Temperature and Nitrate/Ammonium Ratio on Strawberry Plants. II. Nitrogen Uptake, Mineral Ions, and Carboxylate Concentrations. *Agron J* 77, 835–840. <https://doi.org/10.2134/agronj1985.00021962007700060003x>
- García-Herrera, P., Sánchez-Mata, M.C., Cámara, M., Fernández-Ruiz, V., Díez-Marqués, C., Molina, M., Tardío, J., 2014. Nutrient composition of six wild edible Mediterranean Asteraceae plants of dietary interest. *Journal of Food Composition and Analysis* 34, 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2014.02.009>
- Geary, B., Clark, J., Hopkins, B.G., Jolley, V.D., 2015. Deficient, Adequate and Excess Nitrogen Levels Established in Hydroponics for Biotic and Abiotic Stress-Interaction Studies in Potato. *J Plant Nutr* 38, 41–50. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.912323>
- Giebisch, G., 2004. Challenges to potassium metabolism: internal distribution and external balance. *Wien Klin Wochenschr* 116, 353–366. <https://doi.org/10.1007/BF03040914>
- Gill, S.S., Tuteja, N., 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
- Giller, K.E., Delaune, T., Silva, J.V., Descheemaeker, K., van de Ven, G., Schut, A.G.T., van Wijk, M., Hammond, J., Hochman, Z., Taulya, G., Chikowo, R., Narayanan, S., Kishore, A., Bresciani, F., Teixeira, H.M., Andersson, J.A., van Ittersum, M.K., 2021. The future of farming: Who will produce our food? *Food Secur* 13, 1073–1099. <https://doi.org/10.1007/S12571-021-01184-6/FIGURES/8>

- Gillespie, D., Nonner, W., Eisenberg, R.S., 2002. Coupling Poisson Nernst Planck and density functional theory to calculate ion flux. *Journal of Physics: Condensed Matter* 14, 12129–12145. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/14/46/317>
- Gillespie, D.P., Papio, G., Kubota, C., 2021. High nutrient concentrations of hydroponic solution can improve growth and nutrient uptake of spinach (*Spinacia oleracea* L.) grown in acidic nutrient solution. *HortScience* 56, 687–694. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI15777-21>
- Giménez, A., Fernández, J.A., Pascual, J.A., Ros, M., Saez-Tovar, J., Martinez-Sabater, E., Gruda, N.S., Egea-Gilabert, C., 2020. Promising composts as growing media for the production of baby leaf lettuce in a floating system. *Agronomy* 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101540>
- Gizas, G., Savvas, D., 2007. Particle size and hydraulic properties of pumice affect growth and yield of greenhouse crops in soilless culture. *HortScience* 42, 1274–1280. <https://doi.org/10.21273/hortsci.42.5.1274>
- Gizas, G., Tsirogiannis, I., Bakea, M., Mantzos, N., Savvas, D., 2012. Impact of hydraulic characteristics of raw or composted posidonia residues, coir, and their mixtures with pumice on root aeration, water availability, and yield in a lettuce crop. *HortScience* 47, 896–901. <https://doi.org/10.21273/hortsci.47.7.896>
- Glenn, E.P., Brown, J.J., Blumwald, E., 1999. Salt Tolerance and Crop Potential of Halophytes. *CRC Crit Rev Plant Sci* 18, 227–255. <https://doi.org/10.1080/07352689991309207>
- Gohardoust, M.R., Bar-Tal, A., Effati, M., Tuller, M., 2020. Characterization of physicochemical and hydraulic properties of organic and mineral soilless culture substrates and mixtures. *Agronomy* 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091403>
- Gorbe, E., Calatayud, A., 2012. Applications of chlorophyll fluorescence imaging technique in horticultural research: A review. *Sci Hortic* 138, 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.02.002>
- Grattan, S.R., Grieve, C.M., 1998. Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. *Sci Hortic* 78, 127–157. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00192-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00192-7)
- Greuter, W., 2006. Compositae (pro parte majore): *Scolymus hispanicus* L. [WWW Document]. Compositae. Euro+Med Plantbase - the information resource for Euro-Mediterranean plant diversity. URL https://europlusmed.org/cdm_dataportal/taxon/04b639de-4584-457b-9087-c899bfe244c3 (accessed 5.10.24).
- Gruda, N., Bisbis, M., Tanny, J., 2019. Influence of climate change on protected cultivation: Impacts and sustainable adaptation strategies - A review. *J Clean Prod* 225, 481–495. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.210>
- Gruda, N.S., 2022. Advances in Soilless Culture and Growing Media in Today's Horticulture—An Editorial. *Agronomy* 12, 2773. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112773>
- Gruda, N.S., 2019. Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060298>
- Guerfel, M., Ouni, Y., Boujnah, D., Zarrouk, M., 2009. Photosynthesis parameters and activities of enzymes of oxidative stress in two young “Chemlali” and “Chetoui” olive trees under water deficit. *Photosynthetica* 47, 340–346. <https://doi.org/10.1007/s11099-009-0054-z>
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Moller, I.S., White, P., 2012. Marschner ' s Mineral Nutrition of Higher Plants . Edition No . 3, Marschner ' s Mineral Nutrition of Higher Plants.

- Heiskanen, J., 1995. Physical properties of two-component growth media based on Sphagnum peat and their implications for plant-available water and aeration. *Plant and Soil* 195 172:1 172, 45–54. <https://doi.org/10.1007/BF00020858>
- Heller, H., Bar-Tal, A., Assouline, S., Narkis, K., Suryano, S., De La Forge, A., Barak, M., Alon, H., Bruner, M., Cohen, S., Tsohar, D., 2015. The effects of container geometry on water and heat regimes in soilless culture: Lettuce as a case study. *Irrig Sci* 33, 53–65. <https://doi.org/10.1007/s00271-014-0448-y>
- Hnilíčková, H., Hnilička, F., Martinková, J., Kraus, K., 2017. Effects of salt stress on water status, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of rocket. *Plant Soil Environ* 63, 362–367. <https://doi.org/10.17221/398/2017-PSE>
- Ho, L.C., Adams, P., 1995. NUTRIENT UPTAKE AND DISTRIBUTION IN RELATION TO CROP QUALITY. *Acta Hort* 33–44. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1995.396.3>
- Hopmans, J.W., Bristow, K.L., 2002. Current Capabilities and Future Needs of Root Water and Nutrient Uptake Modeling. pp. 103–183. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)77014-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)77014-4)
- Htwe, N.M.P.S., Ruangrak, E., 2021. A review of sensing, uptake, and environmental factors influencing nitrate accumulation in crops. *J Plant Nutr* 44, 1054–1065. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1871757>
- Hu, Y., Schmidhalter, U., 1997. Interactive effects of salinity and macronutrient level on wheat. II. Composition. *J Plant Nutr* 20, 1169–1182. <https://doi.org/10.1080/01904169709365325>
- Hu, Y., Wang, Z., Zhang, Z., Song, N., Zhou, H., Li, Y., Wang, Y., Li, C., Hale, L., 2021. Alteration of desert soil microbial community structure in response to agricultural reclamation and abandonment. *Catena (Amst)* 207, 105678. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2021.105678>
- Hwang, G.S., Parkinson, D., Kusoglu, A., MacDowell, A., Weber, A.Z., 2012. Water Uptake and Transport in Nafion®. ECS Meeting Abstracts MA2012-02, 1483–1483. <https://doi.org/10.1149/ma2012-02/13/1483>
- Inal, A., Gunes, A., Pilbeam, D.J., Kadloglu, Y.K., Eraslan, F., 2009. Concentrations of essential and nonessential elements in shoots and storage roots of carrot grown in NaCl and Na₂SO₄ salinity. *X-Ray Spectrometry* 38, 45–51. <https://doi.org/10.1002/xrs.1104>
- Incrocci, L., Malorgio, F., Della Bartola, A., Pardossi, A., 2006. The influence of drip irrigation or subirrigation on tomato grown in closed-loop substrate culture with saline water. *Sci Hort* 107, 365–372. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2005.12.001>
- Jia, M., Colombo, R., Rossini, M., Celesti, M., Zhu, J., Cogliati, S., Cheng, T., Tian, Y., Zhu, Y., Cao, W., Yao, X., 2021. Estimation of leaf nitrogen content and photosynthetic nitrogen use efficiency in wheat using sun-induced chlorophyll fluorescence at the leaf and canopy scales. *European Journal of Agronomy* 122, 126192. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126192>
- JIANG, C., JOHKAN, M., HOHJO, M., TSUKAGOSHI, S., MATURO, T., 2017. A correlation analysis on chlorophyll content and SPAD value in tomato leaves. *食と緑の科学 = HortResearch* 71, 37–42.
- Karanisa, T., Amato, A., Richer, R., Abdul Majid, S., Skelhorn, C., Sayadi, S., 2021. Agricultural production in Qatar's hot arid climate. *Sustainability (Switzerland)* 13. <https://doi.org/10.3390/su13074059>
- KARIK, U., 2019. THE EFFECT OF DIFFERENT HARVEST DATES ON THE YIELD AND QUALITY OF THE GOLDEN THISTLE (*Scolymus hispanicus* L.). *Turkish Journal Of Field Crops* 24, 230–236. <https://doi.org/10.17557/tjfc.655129>

- Kaşkar, C., Fernández, J.A., Ochoa, J., Niñirola, D., Conesa, E., Tüzel, Y., 2009. AGRONOMIC BEHAVIOUR AND OXALATE AND NITRATE CONTENT OF DIFFERENT PURSLANE CULTIVARS (PORTULACA OLERACEA) GROWN IN A HYDROPONIC FLOATING SYSTEM. *Acta Hort* 521–526. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.807.76>
- 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. *Comput Electron Agric* 113, 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.01.014>
- Kaya, C., Higgs, D., Burton, A., 2000. Plant growth, phosphorus nutrition, and acid phosphatase enzyme activity in three tomato cultivars grown hydroponically at different zinc concentrations. *J Plant Nutr* 23, 569–579. <https://doi.org/10.1080/01904160009382041>
- Kingston, P.H., Scagel, C.F., Bryla, D.R., Strik, B.C., 2020. Influence of perlite in peat- And coirbased media on vegetative growth and mineral nutrition of highbush blueberry. *HortScience* 55, 658–663. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14640-19>
- Kirimer, N., Tunalier, Z., Başer, K.H.C., Cingi, I., 1997. Antispasmodic and spasmogenic effects of *Scolymus hispanicus* and taraxasteryl acetate on isolated ileum preparations. *Planta Med* 63, 556–558. <https://doi.org/10.1055/s-2006-957765>
- Klados, E., Tzortzakis, N., 2014. Effects of substrate and salinity in hydroponically grown *Cichorium spinosum*. *J Soil Sci Plant Nutr* 14, 211–222. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162014005000017>
- Kläring, H.-P., Schwarz, D., Cierpinski, W., 1999. CONTROL OF CONCENTRATION OF NUTRIENT SOLUTION IN SOILLESS GROWING SYSTEMS, DEPENDING ON GREENHOUSE CLIMATE - ADVANTAGES AND LIMITATIONS. *Acta Hort* 133–140. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1999.507.15>
- Konduru, S., Evans, M.R., Stamps, R.H., 1999. Coconut husk and processing effects on chemical and physical properties of coconut coir dust. *HortScience* 34, 88–90. <https://doi.org/10.21273/hortsci.34.1.88>
- Krapp, A., 2015. Plant nitrogen assimilation and its regulation: A complex puzzle with missing pieces. *Curr Opin Plant Biol* 25, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2015.05.010>
- Labiad, M.H., Giménez, A., Varol, H., Tüzel, Y., Egea-Gilabert, C., Fernández, J.A., Martínez-Ballesta, M. del C., 2021. Effect of Exogenously Applied Methyl Jasmonate on Yield and Quality of Salt-Stressed Hydroponically Grown Sea Fennel (*Crithmum maritimum* L.). *Agronomy* 11, 1083. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061083>
- Lamuella-ravents, R.M., 1999. 2,6-di-tert-butyl-4-hydroxytoluene 299, 152–178.
- Langenfeld, N.J., Pinto, D.F., Faust, J.E., Heins, R., Bugbee, B., 2022. Principles of Nutrient and Water Management for Indoor Agriculture. *Sustainability* 14, 10204. <https://doi.org/10.3390/su141610204>
- Lecourieux, D., Ranjeva, R., Pugin, A., 2006. Calcium in plant defence-signalling pathways. *New Phytologist* 171, 249–269. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01777.x>
- Lee, G. Bin, Park, H.J., Cheon, C.G., Choi, J.G., Seo, J.H., Im, J.S., Park, Y.E., Cho, J.H., Chang, D.C., 2022. Effect of Plant Container Type on Seed Potato (*Solanum tuberosum* L.) Growth and Yield in Substrate Culture. *Potato Res* 65, 105–117. <https://doi.org/10.1007/s11540-021-09511-2>

- Leustek, T., 2002. Sulfate Metabolism. *Arabidopsis Book* 1, e0017. <https://doi.org/10.1199/tab.0017>
- Lin, S., Pi, Y., Long, D., Duan, J., Zhu, X., Wang, X., He, J., Zhu, Y., 2022. Impact of Organic and Chemical Nitrogen Fertilizers on the Crop Yield and Fertilizer Use Efficiency of Soybean–Maize Intercropping Systems. *Agriculture (Switzerland)* 12. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091428>
- Lin, X.Y., Liu, X.X., Zhang, Y.P., Zhou, Y.Q., Hu, Y., Chen, Q.H., Zhang, Y.S., Jin, C.W., 2014. Short-term alteration of nitrogen supply prior to harvest affects quality in hydroponic-cultivated spinach (*Spinacia oleracea*). *J Sci Food Agric* 94, 1020–1025. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6368>
- Lipovetsky, T., Zhuang, L., Teixeira, W.G., Boyd, A., May Pontedeiro, E., Moriconi, L., Alves, J.L.D., Couto, P., van Genuchten, M.T., 2020. HYPROP measurements of the unsaturated hydraulic properties of a carbonate rock sample. *J Hydrol (Amst)* 591, 125706. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.125706>
- Londra, P., Paraskevopoulou, A., Psychogiou, M., 2018. Hydrological behavior of peat- and coir-based substrates and their effect on Begonia growth. *Water (Switzerland)* 10, 722. <https://doi.org/10.3390/w10060722>
- Londra, P.A., 2010. Simultaneous determination of water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity of substrates using a steady-state laboratory method. *HortScience* 45, 1106–1112. <https://doi.org/10.21273/hortsci.45.7.1106>
- Maaoui, M., Boukchina, R., Hajjaji, N., 2021. Environmental life cycle assessment of Mediterranean tomato: case study of a Tunisian soilless geothermal multi-tunnel greenhouse. *Environ Dev Sustain* 23, 1242–1263. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00618-z>
- Maaz, T.M., Sapkota, T.B., Eagle, A.J., Kantar, M.B., Bruulsema, T.W., Majumdar, K., 2021. Meta-analysis of yield and nitrous oxide outcomes for nitrogen management in agriculture. *Glob Chang Biol* 27, 2343–2360. <https://doi.org/10.1111/gcb.15588>
- Magalhaes, J.R., Wilcox, G.E., 1983. Tomato growth and nutrient uptake patterns as influenced by nitrogen form and light intensity 1. *J Plant Nutr* 6, 941–956. <https://doi.org/10.1080/01904168309363157>
- Maggini, R., Benvenuti, S., Leoni, F., Incrocci, L., Pardossi, A., 2021. Effects of NaCl on Hydroponic Cultivation of *Reichardia picroides* (L.) Roth. *Agronomy* 11, 1–12. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112352>
- Mahlangu, R.I.S., Maboko, M.M., Sivakumar, D., Soundy, P., Jifon, J., 2016. Lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth, yield and quality response to nitrogen fertilization in a non-circulating hydroponic system. *J Plant Nutr* 39, 1766–1775. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1187739>
- Majid, M., Khan, J.N., Ahmad Shah, Q.M., Masoodi, K.Z., Afroza, B., Parvaze, S., 2021. Evaluation of hydroponic systems for the cultivation of Lettuce (*Lactuca sativa* L., var. *Longifolia*) and comparison with protected soil-based cultivation. *Agric Water Manag* 245, 106572. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106572>
- Malhotra, H., Vandana, Sharma, S., Pandey, R., 2018. Phosphorus Nutrition: Plant Growth in Response to Deficiency and Excess, in: *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*. Springer Singapore, Singapore, pp. 171–190. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_7

- Mansour, M.M.F., 2014. The plasma membrane transport systems and adaptation to salinity. *J Plant Physiol* 171, 1787–1800. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.08.016>
- Marinou, E., Chrysargyris, A., Tzortzakis, N., 2013. Use of sawdust, coco soil and pumice in hydroponically grown strawberry. *Plant Soil Environ* 59, 452–459. <https://doi.org/10.17221/297/2013-pse>
- Maršić, N.K., Osvald, J., 2002. Effects of different nitrogen levels on lettuce growth and nitrate accumulation in iceberg lettuce (*Lactuca sativa* var. *capitata* L.) grown hydroponically under greenhouse conditions. *Gartenbauwissenschaft* 67, 128–134.
- Martínez, V., Cerdá, A., 2008. Nitrate reductase activity in tomato and cucumber leaves as influenced by NaCl and n source 4167. <https://doi.org/10.1080/01904168909364040>
- Maynard, D.N., Barker, A. V., Minotti, P.L., Peck, N.H., 1976. Nitrate accumulation in vegetables. *Advances in Agronomy* 28, 71–118. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60553-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60553-2)
- Michel, J.C., 2009. Physical properties of growing media: State of the art and future challenges. *Acta Hort* 819, 65–72. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.819.6>
- Mohammad, M., Shibli, R., Ajlouni, M., Nimri, L., 2008. Tomato root and shoot responses to salt stress under different levels of phosphorus nutrition *Tomato Root and Shoot Responses to Salt Stress Under Different Levels of Phosphorus Nutrition* 4167. <https://doi.org/10.1080/01904169809365512>
- Montagne, V., Capiiaux, H., Cannavo, P., Charpentier, S., Renaud, S., Liatard, E., Grosbellet, C., Lebeau, T., 2016. Protective effect of organic substrates against soil-borne pathogens in soilless cucumber crops. *Sci Hort* 206, 62–70. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2016.04.035>
- Montanari, M., Degl’Innocenti, E., Maggini, R., Pacifici, S., Pardossi, A., Guidi, L., 2008. Effect of nitrate fertilization and saline stress on the contents of active constituents of *Echinacea angustifolia* DC. *Food Chem* 107, 1461–1466. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.10.001>
- Montesano, F.F., van Iersel, M.W., Boari, F., Cantore, V., D’Amato, G., Parente, A., 2018. Sensor-based irrigation management of soilless basil using a new smart irrigation system: Effects of set-point on plant physiological responses and crop performance. *Agric Water Manag* 203, 20–29. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2018.02.019>
- Moschou, C.E., Papadimitriou, D.M., Galliou, F., Markakis, N., Papastefanakis, N., Daskalakis, G., Sabathianakis, M., Stathopoulou, E., Bouki, C., Daliakopoulos, I.N., Manios, T., 2022. Grocery Waste Compost as an Alternative Hydroponic Growing Medium. *Agronomy* 12, 789. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040789>
- Mu, X., Chen, Y., 2021. The physiological response of photosynthesis to nitrogen deficiency. *Plant Physiology and Biochemistry* 158, 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.019>
- Munns, R., 2002. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell Environ* 25, 239–250. <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x>
- Munns, R., Tester, M., 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annu Rev Plant Biol* 59, 651–681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
- Murray, H.C., Stratton, R., 1944. Vitamin C Content of Wild Greens. *J Nutr* 28, 427–430. <https://doi.org/10.1093/jn/28.6.427>

- Narayan, O.P., Kumar, P., Yadav, B., Dua, M., Johri, A.K., 2023. Sulfur nutrition and its role in plant growth and development. *Plant Signal Behav* 18. <https://doi.org/10.1080/15592324.2022.2030082>
- Neocleous, D., Koukounaras, A., Siomos, A.S., Vasilakakis, M., 2014. Assessing the Salinity Effects on Mineral Composition and Nutritional Quality of Green and Red “Baby” Lettuce. *J Food Qual* 37, 1–8. <https://doi.org/10.1111/jfq.12066>
- Neocleous, D., Ntatsi, G., Savvas, D., 2017. Physiological, nutritional and growth responses of melon (*Cucumis melo* L.) to a gradual salinity built-up in recirculating nutrient solution. *J Plant Nutr* 40, 2168–2180. <https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1346673>
- Neocleous, D., Savvas, D., 2022. Validating a smart nutrient solution replenishment strategy to save water and nutrients in hydroponic crops. *Front Environ Sci* 10, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.965964>
- Neocleous, D., Savvas, D., 2019. The effects of phosphorus supply limitation on photosynthesis, biomass production, nutritional quality, and mineral nutrition in lettuce grown in a recirculating nutrient solution. *Sci Hortic* 252, 379–387. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.007>
- Neocleous, D., Savvas, D., 2017. Simulating NaCl accumulation in a closed hydroponic crop of zucchini: Impact on macronutrient uptake, growth, yield, and photosynthesis. *Zeitschrift fur Pflanzenernahrung und Bodenkunde* 180, 283–293. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600338>
- Neocleous, D., Savvas, D., 2015. Effect of different macronutrient cation ratios on macronutrient and water uptake by melon (*Cucumis melo*) grown in recirculating nutrient solution. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 178, 320–332. <https://doi.org/10.1002/jpln.201400288>
- Nerlich, A., Dannehl, D., 2021. Soilless Cultivation: Dynamically Changing Chemical Properties and Physical Conditions of Organic Substrates Influence the Plant Phenotype of Lettuce. *Front Plant Sci* 11, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.601455>
- Nikolaou, G., Neocleous, D., Christou, A., Polycarpou, P., Kitta, E., Katsoulas, N., 2021. Energy and water related parameters in tomato and cucumber greenhouse crops in semiarid mediterranean regions. A review, part ii: Irrigation and fertigation. *Horticulturae* 7. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7120548>
- Ntatsi, G., Aliferis, K.A., Rouphael, Y., Napolitano, F., Makris, K., Kalala, G., Katopodis, G., Savvas, D., 2017. Salinity source alters mineral composition and metabolism of *Cichorium spinosum*. *Environ Exp Bot* 141, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.07.002>
- Olle, M., Ngouajio, M., Siomos, A., 2012. Vegetable quality and productivity as influenced by growing medium: A review. *Zemdirbyste* 99, 399–408.
- Olympios, C.M., 1993. SOILLESS MEDIA UNDER PROTECTED CULTIVATION ROCKWOOL, PEAT, PERLITE AND OTHER SUBSTRATES. *Acta Hortic* 215–234. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1993.323.20>
- Ondoño, S., Martínez-Sánchez, J.J., Moreno, J.L., 2015. Evaluating the growth of several Mediterranean endemic species in artificial substrates: Are these species suitable for their future use in green roofs? *Ecol Eng* 81, 405–417. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.079>
- Orozco, R., Marfà, O., 1995. GRANULOMETRIC ALTERATION, AIR-ENTRY POTENTIAL AND HYDRAULIC CONDUCTIVITY IN PERLITES USED IN SOILLESS CULTURES. *Acta Hortic* 147–161. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1995.408.15>

- Ozel-Tasci, C., Gulec, S., 2023. Golden thistle (*Scolymus hispanicus* L.) hydromethanolic extracts ameliorated glucose absorption and inflammatory markers in vitro. *Food Sci Nutr* 11, 7974–7984. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3716>
- Papadimitriou, D., Kontaxakis, E., Daliakopoulos, I., Manios, T., Savvas, D., 2020. Effect of N:K Ratio and Electrical Conductivity of Nutrient Solution on Growth and Yield of Hydroponically Grown Golden Thistle (*Scolymus hispanicus* L.). *Proc West Mark Ed Assoc Conf* 30, 87.
- Papadimitriou, D.M., Daliakopoulos, I.N., Kontaxakis, E., Sabathianakis, M., Manios, T., Savvas, D., 2022. Effect of moderate salinity on Golden Thistle (*Scolymus hispanicus* L.) grown in a soilless cropping system. *Sci Hortic* 303, 111182. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111182>
- Papadimitriou, D.M., Daliakopoulos, I.N., Louloudakis, I., Savvidis, T.I., Sabathianakis, I., Savvas, D., Manios, T., 2024. Impact of container geometry and hydraulic properties of coir dust, perlite, and their blends used as growing media, on growth, photosynthesis, and yield of Golden Thistle (*S. hispanicus* L.). *Sci Hortic* 323, 112425. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112425>
- Papadopoulos, I., 1996. Micro-Irrigation Systems and Fertigation. Sustainability of Irrigated Agriculture 309–322. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8700-6_18
- Pardossi, A., Bagnoli, G., Malorgio, F., Campiotti, C.A., Tognoni, F., 1999. NaCl effects on celery (*Apium graveolens* L.) grown in NFT. *Sci Hortic* 81, 229–242. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00020-5](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00020-5)
- Parida, A.K., Veerabathini, S.K., Kumari, A., Agarwal, P.K., 2016. Physiological, anatomical and metabolic implications of salt tolerance in the halophyte *Salvadora persica* under hydroponic culture condition. *Front Plant Sci* 7, 1–18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00351>
- Paschoalinotto, B.H., Polyzos, N., Compocholi, M., Roupael, Y., Alexopoulos, A., Dias, M.I., Barros, L., Petropoulos, S.A., 2023. Domestication of Wild Edible Species: The Response of *Scolymus hispanicus* Plants to Different Fertigation Regimes. *Horticulturae* 9, 1–14. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9010103>
- Pękal, A., Pyrzyńska, K., 2014. Evaluation of Aluminium Complexation Reaction for Flavonoid Content Assay. *Food Anal Methods* 7, 1776–1782. <https://doi.org/10.1007/s12161-014-9814-x>
- Peng, Z., Smith, C., Stovin, V., 2020. The importance of unsaturated hydraulic conductivity measurements for green roof detention modelling. *J Hydrol (Amst)* 590, 125273. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.125273>
- Perez-Alfocea, F., Estan, M.T., Santa Cruz, A., Bolarin, M.C., 1993. Effects of salinity on nitrate, total nitrogen, soluble protein and free amino acid levels in tomato plants. *Journal of Horticultural Science* 68, 1021–1027. <https://doi.org/10.1080/00221589.1993.11516443>
- Petropoulos, S.A., Daferera, D., Polissiou, M.G., Passam, H.C., 2009. The effect of salinity on the growth, yield and essential oils of turnip-rooted and leaf parsley cultivated within the Mediterranean region. *J Sci Food Agric* 89, 1534–1542. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3620>
- Petropoulos, S.A., Fernandes, Â., Tzortzakis, N., Sokovic, M., Ciric, A., Barros, L., Ferreira, I.C.F.R., 2019. Bioactive compounds content and antimicrobial activities of wild edible Asteraceae species of the Mediterranean flora under commercial cultivation conditions. *Food Research International* 119, 859–868. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.069>

- Petropoulos, S.A., Karapanos, I.C., 2021. Effect of Nutrient Solution pH on the Growth , Yield and Quality of *Taraxacum officinale* and *Reichardia picroides* in a Floating Hydroponic System.
- Petropoulos, S.A., Karkanis, A., Martins, N., Ferreira, I.C.F.R., 2018. Edible halophytes of the Mediterranean basin: Potential candidates for novel food products. *Trends Food Sci Technol* 74, 69–84. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.006>
- Petropoulos, S.A., Levizou, E., Ntatsi, G., Fernandes, Â., Petrotos, K., Akoumianakis, K., Barros, L., Ferreira, I.C.F.R., 2017. Salinity effect on nutritional value, chemical composition and bioactive compounds content of *Cichorium spinosum* L. *Food Chem* 214, 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.080>
- Phogat, V., Skewes, M.A., Cox, J.W., Sanderson, G., Alam, J., Šimůnek, J., 2014. Seasonal simulation of water, salinity and nitrate dynamics under drip irrigated mandarin (*Citrus reticulata*) and assessing management options for drainage and nitrate leaching. *J Hydrol (Amst)* 513, 504–516. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.008>
- Pissolato, M.D., Silveira, N.M., Machado, E.C., Zambrosi, F.C.B., Sodek, L., Ribeiro, R. V., 2019. Photosynthesis and biomass accumulation in young sugarcane plants grown under increasing ammonium supply in nutrient solution. *Theor Exp Plant Physiol* 31, 401–411. <https://doi.org/10.1007/s40626-019-00154-w>
- Polo, S., Tardío, J., Vélez-del-Burgo, A., Molina, M., Pardo-de-Santayana, M., 2009. Knowledge, use and ecology of golden thistle (*Scolymus hispanicus* L.) in Central Spain. *J Ethnobiol Ethnomed* 5, 42. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-5-42>
- Porter, I.J., 2017. What is driving industry tipping points from open field to hydroponics. *Acta Hortic* 129–136. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1176.17>
- Posidonia, C., Gizas, G., Tsirogiannis, I., Bakea, M., Mantzos, N., Technology, A., Epirus, T.E.I., Box, P.O., 2012. and Yield in a Lettuce Crop 47, 896–901.
- Puccinelli, M., Marchioni, I., Botrini, L., Carmassi, G., Pardossi, A., Pistelli, L., 2024. Growing *Salicornia europaea* L. with Saline Hydroponic or Aquaculture Wastewater. *Horticulturae* 10, 196. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10020196>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.01.054>
- R Development Core Team, R.D.C.T., 2017. R: A language and environment for statistical computing. R: A language and environment for statistical computing. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.06.002>
- Raab, T.K., Terry, N., 1994. Nitrogen Source Regulation of Growth and Photosynthesis in *Beta vulgaris* L. *Plant Physiol* 105, 1159–1166. <https://doi.org/10.1104/pp.105.4.1159>
- Raghothama, K.G., 2015. Phosphorus and Plant Nutrition: An Overview. pp. 353–378. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr46.c11>
- Randle, W.M., 2000. Increasing nitrogen concentration in hydroponic solutions affects onion flavor and bulb quality. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 125, 254–259. <https://doi.org/10.21273/jashs.125.2.254>
- Raviv, M., Lieth, J.H., Burger, D.W., Wallach, R., 2001. Optimization of transpiration and potential growth rates of “Kardinal” rose with respect to root-zone physical properties. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 126, 638–643. <https://doi.org/10.21273/jashs.126.5.638>

- Rizwan, M., Ali, S., Rehman, M.Z. ur, Riaz, M., Adrees, M., Hussain, A., Zahir, Z.A., Rinklebe, J., 2021. Effects of nanoparticles on trace element uptake and toxicity in plants: A review. *Ecotoxicol Environ Saf* 221, 112437. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2021.112437>
- Roberts, J.K.M., Linker, C.S., Benoit, A.G., Jardetzky, O., Nieman, R.H., 1984. Salt Stimulation of Phosphate Uptake in Maize Root Tips Studied by ³¹P Nuclear Magnetic Resonance. *Plant Physiol* 75, 947–950. <https://doi.org/10.1104/pp.75.4.947>
- Ropokis, A., Ntatsi, G., Kittas, C., Katsoulas, N., Savvas, D., 2019. Effects of Temperature and Grafting on Yield, Nutrient Uptake, and Water Use Efficiency of a Hydroponic Sweet Pepper Crop. *Agronomy* 9, 110. <https://doi.org/10.3390/agronomy9020110>
- Rouphael, Y., Colla, G., Battistelli, A., Moscatello, S., Proietti, S., Rea, E., 2004. Yield, water requirement, nutrient uptake and fruit quality of zucchini squash grown in soil and closed soilless culture. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 79, 423–430. <https://doi.org/10.1080/14620316.2004.11511784>
- Rubio-Asensio, J.S., Franch, V., López, F., Bonet, L., Buesa, I., Intrigliolo, D.S., 2018. Towards a near-soilless culture for woody perennial crops in open field conditions. *Sci Hortic* 240, 460–467. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.015>
- Sabatino, L., 2020. Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy* 10, 10–12. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091384>
- Sakamoto, Y., Akaike, H., 1978. Analysis of cross classified data by AIC. *Ann Inst Stat Math* 30, 185–197. <https://doi.org/10.1007/BF02480213>
- Salonikioti, A., Petropoulos, S., Antoniadis, V., Levizou, E., Alexopoulos, A., 2015. Wild Edible Species with Phytoremediation Properties. *Procedia Environ Sci* 29, 98–99. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.180>
- Sambo, P., Nicoletto, C., Giro, A., Pii, Y., Valentinuzzi, F., Mimmo, T., Lugli, P., Orzes, G., Mazzetto, F., Astolfi, S., Terzano, R., Cesco, S., 2019. Hydroponic Solutions for Soilless Production Systems: Issues and Opportunities in a Smart Agriculture Perspective. *Front Plant Sci*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00923>
- Sandoval-Villa, M., Wood, C.W., Guertal, E.A., 1999. Effects of nitrogen form, nighttime nutrient solution strength, and cultivar on greenhouse tomato production. *J Plant Nutr* 22, 1931–1945. <https://doi.org/10.1080/01904169909365764>
- Santamaria, P., Elia, A., Papa, G., Serio, F., 1998. Nitrate and ammonium nutrition in chicory and rocket salad plants. *J Plant Nutr* 21, 1779–1789. <https://doi.org/10.1080/01904169809365523>
- Sapkota, Sundar, Sapkota, Sanjib, Liu, Z., 2019. Effects of nutrient composition and lettuce cultivar on crop production in hydroponic culture. *Horticulturae* 5. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5040072>
- Sari, A.O., Tutar, M., 2009. Effects of light, cold storage, and temperature on seed germination of golden thistle (*Scolymus hispanicus* L.). *J Herbs Spices Med Plants* 15, 318–325. <https://doi.org/10.1080/10496470903507858>
- Sarrou, E., Siomos, A.S., Riccadona, S., Aktsoğlu, D.-C., Tsouvaltzi, P., Angeli, A., Franceschi, P., Chatzopoulou, P., Vrhovsek, U., Martens, S., 2019. Improvement of sea fennel (*Crithmum maritimum* L.) nutritional value through iodine biofortification in a hydroponic floating system. *Food Chem* 296, 150–159. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.190>

- Savvas, D., 2009. Modern developments in the use of inorganic media for greenhouse vegetable and flower production. *Acta Hort* 819, 73–86. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2009.819.7>
- Savvas, D., Adamidis, K., 1999. Automated management of nutrient solutions based on target electrical conductivity, pH, and nutrient concentration ratios. *J Plant Nutr* 22, 1415–1432. <https://doi.org/10.1080/01904169909365723>
- Savvas, D., Drakatos, S., Panagiotakis, I., Ntatsi, G., 2021. NUTRISENSE: A new online portal to calculate nutrient solutions and optimize fertilization of greenhouse crops grown hydroponically. *Acta Hort* 1320, 149–156. <https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.2021.1320.19>
- Savvas, D., Gianquinto, G., Tuzel, Y., Gruda, N., 2013. Soilless Culture, in: *FAO Plant Production and Protection Paper No. 217: Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops*. FAO, Rome, Italy, pp. 303–354.
- Savvas, D., Gruda, N., 2018. Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry - A review. *Eur J Hort* 83, 280–293. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.2>
- Savvas, D., Karagianni, V., Kotsiras, A., Demopoulos, V., Karkamisi, I., Pakou, P., 2003. Interactions between ammonium and pH of the nutrient solution supplied to gerbera (*Gerbera jamesonii*) grown in pumice. *Plant Soil* 254, 393–402. <https://doi.org/10.1023/A:1025595201676>
- Savvas, D., Lenz, F., 2000. Effects of NaCl or nutrient-induced salinity on growth, yield, and composition of eggplants grown in rockwool. *Sci Hort* 84, 37–47. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00117-X](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00117-X)
- Savvas, Dimitrios, Meletiou, G., Margariti, S., Tsirogiannis, I., Kotsiras, A., 2005. Modeling the relationship between water uptake by cucumber and NaCl accumulation in a closed hydroponic system. *HortScience* 40, 802–807. <https://doi.org/10.21273/hortsci.40.3.802>
- Savvas, D., Olympios, C., Passam, H.C., 2009. Management of nutrition and irrigation in soil-grown and soilless cultivations in mild-winter climates: Problems, constraints and trends in the mediterranean region. *Acta Hort* 807, 415–426. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.807.59>
- Savvas, D., Pappa, V.A., Kotsiras, A., Gizas, G., 2005. NaCl accumulation in a cucumber crop grown in a completely closed hydroponic system as influenced by NaCl concentration in irrigation water. *Eur J Hort* 70, 217–223.
- Savvas, D., Passam, H.C., Olympios, C., Nasi, E., Moustaka, E., Mantzos, N., Barouchas, P., 2006. Effects of ammonium nitrogen on lettuce grown on pumice in a closed hydroponic system. *HortScience* 41, 1667–1673. <https://doi.org/10.21273/hortsci.41.7.1667>
- Schachtman, D.P., Reid, R.J., Ayling, S.M., 1998. Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. *Plant Physiol* 116, 447–453. <https://doi.org/10.1104/pp.116.2.447>
- Schiattone, M.I., Viggiani, R., Di Venere, D., Sergio, L., Cantore, V., Todorovic, M., Perniola, M., Candido, V., 2018. Impact of irrigation regime and nitrogen rate on yield, quality and water use efficiency of wild rocket under greenhouse conditions. *Sci Hort* 229, 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.10.036>
- Sengupta, S.R., Pal, B., 1970. Composition of edible wild greens. *J Sci Food Agric* 21, 215–215. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740210412>
- Shabala, S., Cuin, T.A., 2008. Potassium transport and plant salt tolerance. *Physiol Plant* 133, 651–669. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2007.01008.x>

- Shah, S.H., Houborg, R., McCabe, M.F., 2017. Response of Chlorophyll, Carotenoid and SPAD-502 measurement to salinity and nutrient stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agronomy* 7, 1–21. <https://doi.org/10.3390/agronomy7030061>
- Shahbaz, M., Ashraf, M., Al-Qurainy, F., Harris, P.J.C., 2012. Salt Tolerance in Selected Vegetable Crops. *CRC Crit Rev Plant Sci* 31, 303–320. <https://doi.org/10.1080/07352689.2012.656496>
- Sharpley, A.N., Meisinger, J.J., Power, J.F., Suarez, D.L., 1992. Root Extraction of Nutrients Associated with Long-Term Soil Management 19, 151–217. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2894-3_6
- Shin, Y.K., Bhandari, S.R., Jo, J.S., Song, J.W., Cho, M.C., Yang, E.Y., Lee, J.G., 2020. Response to salt stress in lettuce: Changes in chlorophyll fluorescence parameters, phytochemical contents, and antioxidant activities. *Agronomy* 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111627>
- Shokrana, M.S. Bin, Ghane, E., 2020. Measurement of soil water characteristic curve using HYPROP2. *MethodsX* 7, 100840. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100840>
- Silva, J.G., França, M.G.C., Gomide, F.T.F., Magalhaes, J.R., 2013. Different Nitrogen Sources Affect Biomass Partitioning and Quality of Potato Production in a Hydroponic System. *American Journal of Potato Research* 90, 179–185. <https://doi.org/10.1007/s12230-012-9297-5>
- Singh, M., Singh, V.P., Prasad, S.M., 2016. Responses of photosynthesis, nitrogen and proline metabolism to salinity stress in *Solanum lycopersicum* under different levels of nitrogen supplementation. *Plant Physiology and Biochemistry* 109, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.08.021>
- Singleton, V.L., Orthofer, R., Lamuela-Raventós, R.M., 1999. [14] Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. pp. 152–178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Siomos, A.S., Beis, G., Papadopoulou, P.P., Nasi, P., Kaberidou, I., 2001. AERIAL BIOMASS, ROOT BIOMASS AND QUALITY OF FOUR LETTUCE CULTIVARS GROWN HYDROPONICALLY IN PERLITE AND PUMICE. *Acta Hort* 437–444. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.548.51>
- Sonneveld, C., 1988. The salt tolerance of greenhouse crops. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 36, 63–73. <https://doi.org/10.18174/njas.v36i1.16698>
- Sonneveld, C., Burg, A.M.M. van der, 1991. Sodium chloride salinity in fruit vegetable crops in soilless culture. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 39, 115–122. <https://doi.org/10.18174/njas.v39i2.16546>
- Sonneveld, C., Voogt, W., 2009. Nutrient Solutions for Soilless Cultures. *Plant Nutrition of Greenhouse Crops* 257–275. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2532-6_12
- Stark, P.B., Miller, D., Carlson, T.J., de Vasquez, K.R., 2019. Open-source food: Nutrition, toxicology, and availability of wild edible greens in the East Bay. *PLoS One* 14, 1–12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202450>
- Steiner, A.A., 1966. The influence of the chemical composition of a nutrient solution on the production of tomato plants. *Plant Soil* 24, 454–466. <https://doi.org/10.1007/BF01374052>
- Stedle, E., 2000. Water uptake by plant roots: an integration of views - [art%3A10.1023%2FA%3A1026439226716.pdf](https://doi.org/10.1023%2FA%3A1026439226716.pdf) 45–56.

- Steudle, E., 1994. Water transport across roots. *Plant Soil* 167, 79–90. <https://doi.org/10.1007/BF01587602>
- Stolte, J., Tesfai, M., Keizer, J., Øygarden, L., Kværnø, S., Verheijen, F., Panagos, P., Ballabio, C., Hessel, R., 2016. Soil threats in Europe. EUR 27607, JRC Scientific and Technical Reports.
- Tabatabaei, S., Fatemi, L., Fallahi, E., 2006. Effect of ammonium: Nitrate ratio on yield, calcium concentration, and photosynthesis rate in strawberry. *J Plant Nutr* 29, 1273–1285. <https://doi.org/10.1080/01904160600767575>
- Tas, G., Papadandonakis, N., Savvas, D., 2005. Responses of lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*) grown in a closed hydroponic system to NaCl- or CaCl₂-salinity. *Journal of Applied Botany and Food Quality* 79, 136–140.
- Thapa, U., Nandi, S., Rai, R., Upadhyay, A., 2022. Effect of nitrogen levels and harvest timing on growth, yield and quality of lettuce under floating hydroponic system. *J Plant Nutr* 45, 2563–2577. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2064299>
- Toro, G., Flexas, J., Escalona, J.M., 2019. Contrasting leaf porometer and infra-red gas analyser methodologies: an old paradigm about the stomatal conductance measurement. *Theor Exp Plant Physiol* 31, 483–492. <https://doi.org/10.1007/s40626-019-00161-x>
- Tsukagoshi, S., Shinohara, Y., 2019. Nutrition and nutrient uptake in soilless culture systems, *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production: Second Edition*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00014-5>
- Tzerakis, C., Savvas, D., Sigrimis, N., Mavrogiannopoulos, G., 2013. Uptake of Mn and Zn by cucumber grown in closed hydroponic systems as influenced by the Mn and Zn concentrations in the supplied nutrient solution. *HortScience* 48, 373–379. <https://doi.org/10.21273/hortsci.48.3.373>
- Tzortzakis, N., Pitsikoulaki, G., Stamatakis, A., Chrysargyris, A., 2022. Ammonium to Total Nitrogen Ratio Interactive Effects with Salinity Application on *Solanum lycopersicum* Growth, Physiology, and Fruit Storage in a Closed Hydroponic System. *Agronomy* 12, 386. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020386>
- Urlić, B., Dumičić, G., Romić, M., Ban, S.G., 2017. The effect of N and NaCl on growth, yield, and nitrate content of salad rocket (*Eruca sativa* Mill.) 4167. <https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1381122>
- Valle, B., Simonneau, T., Boulord, R., Sourd, F., Frisson, T., Ryckewaert, M., Hamard, P., Bricchet, N., Dauzat, M., Christophe, A., 2017. PYM: A new, affordable, image-based method using a Raspberry Pi to phenotype plant leaf area in a wide diversity of environments. *Plant Methods* 13, 1–17. <https://doi.org/10.1186/S13007-017-0248-5/FIGURES/11>
- van Genuchten, M.Th., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- van Os, E.A., Gieling, Th.H., Lieth, J.H., 2019. Technical Equipment in Soilless Production Systems, in: *Soilless Culture*. Elsevier, pp. 587–635. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63696-6.00013-X>
- Varlagas, H., Savvas, D., Mouzakis, G., Liotsos, C., Karapanos, I., Sigrimis, N., 2010. Modelling uptake of Na⁺ and Cl⁻ by tomato in closed-cycle cultivation systems as influenced by irrigation water salinity. *Agric Water Manag* 97, 1242–1250. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.03.004>

- Volkmar, K.M., Hu, Y., Steppuhn, H., 1998. Physiological responses of plants to salinity: A review. *Canadian Journal of Plant Science* 78, 19–27. <https://doi.org/10.4141/P97-020>
- Walch-Liu, P., Neumann, G., Bangerth, F., Engels, C., 2000. Rapid effects of nitrogen form on leaf morphogenesis in tobacco. *J Exp Bot* 51, 227–237. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.343.227>
- Wallach, R., Raviv, M., 2005. The dependence of moisture-tension relationship and water availability on irrigation frequency in containerized growing medium. *Acta Hort* 697, 293–300. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.697.36>
- Wallach, R., Silva, F.F. da, Chen, Y., 1992. Hydraulic Characteristics of Tuff (Scoria) used as a Container Medium. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 117, 415–421. <https://doi.org/10.21273/JASHS.117.3.415>
- Wang, H., Inukai, Y., Yamauchi, A., 2006. Root Development and Nutrient Uptake. *CRC Crit Rev Plant Sci* 25, 279–301. <https://doi.org/10.1080/07352680600709917>
- Wang, Y., Zhang, X., Liu, H., Sun, G., Song, S., Chen, R., 2022. High NH₄⁺/NO₃⁻ Ratio Inhibits the Growth and Nitrogen Uptake of Chinese Kale at the Late Growth Stage by Ammonia Toxicity. *Horticulturae* 8. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8010008>
- Westgate, M.E., Boyer, J.S., 1985. Osmotic adjustment and the inhibition of leaf, root, stem and silk growth at low water potentials in maize. *Planta* 164, 540–549. <https://doi.org/10.1007/BF00395973>
- White, P.J., 2012. Ion Uptake Mechanisms of Individual Cells and Roots, in: *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Elsevier, pp. 7–47. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00002-9>
- White, P.J., 2001. The pathways of calcium movement to the xylem. *J Exp Bot* 52, 891–899. <https://doi.org/10.1093/jexbot/52.358.891>
- Williams, C.J., Frost, P.C., Morales-Williams, A.M., Larson, J.H., Richardson, W.B., Chiandret, A.S., Xenopoulos, M.A., 2016. Human activities cause distinct dissolved organic matter composition across freshwater ecosystems. *Glob Chang Biol* 22, 613–626. <https://doi.org/10.1111/GCB.13094>
- Willumsen, J., 1980. PH OF THE FLOWING NUTRIENT SOLUTION. *Acta Hort* 191–200. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1980.98.17>
- Wu, Y., Ouyang, W., Hao, Z., Lin, C., Liu, H., Wang, Y., 2018. Assessment of soil erosion characteristics in response to temperature and precipitation in a freeze-thaw watershed. *Geoderma* 328, 56–65. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2018.05.007>
- Yazici, I., Türkan, I., Sekmen, A.H., Demiral, T., 2007. Salinity tolerance of purslane (*Portulaca oleracea* L.) is achieved by enhanced antioxidative system, lower level of lipid peroxidation and proline accumulation. *Environ Exp Bot* 61, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.02.010>
- Ye, J.Y., Tian, W.H., Jin, C.W., 2022. Nitrogen in plants: from nutrition to the modulation of abiotic stress adaptation. *Stress Biology* 2, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s44154-021-00030-1>
- Yuan-Yuan, Z., Jun-Ping, T., Jun, C., Yu-Hui, H., Yu-Shi, L., 2021. Effects of different NH₄⁺ /NO₃⁻ ratios on the photosynthetic and physiology responses of blueberry (*Vaccinium* spp.) seedlings growth. *J Plant Nutr* 44, 854–864. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1871754>
- Zendehbad, M., Mostaghelchi, M., Mojganfar, M., Cepuder, P., Loiskandl, W., 2022. Nitrate in groundwater and agricultural products: intake and risk assessment in northeastern Iran.

Environmental Science and Pollution Research 29, 78603–78619.
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-20831-9>

- Zhang, Yingpeng, Lin, X., Zhang, Yongsong, Shao, J.Z., Du, S., 2005. Effects of nitrogen levels and nitrate/ammonium ratios on oxalate concentrations of different forms in edible parts of spinach. *J Plant Nutr* 28, 2011–2025. <https://doi.org/10.1080/01904160500311086>
- Zhao, C.X., Deng, X.P., Zhang, S.Q., Ye, Q., Steudle, E., Shan, L., 2004. Advances in the studies on water uptake by plant roots. *Acta Bot Sin* 46, 505–514.
- Zhao, X., Bi, G., Harkess, R.L., Blythe, E.K., 2016. Effects of different NH₄: NO₃ ratios on growth and nutrition uptake in *Iris germanica* ‘immortality.’ *HortScience* 51, 1045–1049. <https://doi.org/10.21273/hortsci.51.8.1045>
- Zheng, W., Zeng, S., Bais, H., LaManna, J.M., Hussey, D.S., Jacobson, D.L., Jin, Y., 2018. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) Reduce Evaporation and Increase Soil Water Retention. *Water Resour Res* 54, 3673–3687. <https://doi.org/10.1029/2018WR022656>
- Zheng, Y., Jia, A., Ning, T., Xu, J., Li, Z., Jiang, G., 2008. Potassium nitrate application alleviates sodium chloride stress in winter wheat cultivars differing in salt tolerance. *J Plant Physiol* 165, 1455–1465. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2008.01.001>

Ελληνική Βιβλιογραφία

Καράταγλης, Σ. (1992): Φυσιολογία Φυτών. Εκδόσεις Art of Text, Θεσσαλονίκη, σελ.470

Ρουμπελάκη-Αγγελάκη, Κ. (2018): Φυσιολογία Φυτών, από το μόριο στο περιβάλλον. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, σελ.673

Σάββας, Δ. (2012): Καλλιέργειες εκτός εδάφους: Υδροπονία, Υποστρώματα. Εκδόσεις ΑγρόΤύπος, Αθήνα, σελ.525

Σάββας, Δ., (2016): Γενική Λαχανοκομία. Εκδόσεις Πεδίο, Αθήνα, σελ. 706

Κατάλογοι εικόνων και πινάκων

Κατάλογος Εικόνων

- Εικόνα 1.** Διασπορά και μηχανισμός διασποράς του *Scolymus hispanicus* L. Πηγή: Greuter (2006).
..... 13
- Εικόνα 2.** Φυτά καλλιεργούμενου ασκόλυμπρου ηλικίας 4 μηνών (από προσωπικό αρχείο). 15
- Εικόνα 3.** Ταξιανθία ασκόλυμπρου (προσωπικό αρχείο). 16
- Εικόνα 4.** Υδροπονική καλλιέργεια ασκόλυμπρου σε μίγμα αδρανούς (περλίτης) και οργανικού (κοκοφοίνικας) υποστρώματος σε υποδοχέα υποστρώματος πλαστικό σάκο ή γλάστρα (προσωπικό αρχείο). 29
- Εικόνα 5.** Δίσκοι σπορόφυτων ασκόλυμπρου ηλικίας 1 μηνός στο ριζωτήριο (Προσωπικό αρχείο).
..... 37
- Εικόνα 6.** Σάκοι χωρητικότητας 30 L που χρησιμοποιήθηκαν ως υποδοχείς υποστρώματος (περλίτη) υδροπονικής καλλιέργειας του ασκόλυμπρου (πυκνότητας τεσσάρων φυτών ανά σάκο).
..... 38
- Εικόνα 7.** Μέτρηση σχετικής πυκνότητας χλωροφύλλης και φθορισμού χλωροφύλλης σε πλήρως εκπτυγμένα φύλλα του φυτού ασκόλυμπρου (προσωπικό αρχείο) 41
- Εικόνα 8.** Αναπτυγμένα φυτά ασκόλυμπρου κατά τη διάρκεια καλλιέργειας σε ανοικτό σύστημα καλλιέργειας εκτός εδάφους, 60 (αριστερά) και 120 (δεξιά) HMM, αντίστοιχα..... 42
- Εικόνα 9.** Διακύμανση της θερμοκρασίας [°C], της σχετικής υγρασίας RH [%] και της ακτινοβολίας στο ορατό (Vis) και υπεριώδες (UV) φάσμα [Wm^{-2}], καθ' όλη την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, 90 ημέρες μετά τη μεταφύτευση (HMM). 48
- Εικόνα 10.** Συγκεντρώσεις Na^+ [$mmol L^{-1}$] (α) και Cl^- [$mmol L^{-1}$] (β) στο διάλυμα απορροής στις 30, 60, 90 και 120 ημέρες μετά την μεταφύτευση (HMM). Οι κάθετες γραμμές σφάλματος υποδεικνύουν το τυπικό σφάλμα και τα χρώματα τις διαφορετικές επεμβάσεις. 53
- Εικόνα 11.** Καμπύλη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) του κλάσματος απορροής από την έναρξη του πειράματος (0 HMM) έως την συγκομιδή (90 και 120 HMM). Οι γραμμές σφάλματος υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα και τα διαφορετικά χρώματα τις μεταχειρίσεις του πειράματος. Οι αστερίσκοι (*) υποδηλώνουν στατιστικά σημαντική αύξηση της αγωγιμότητας συγκρίνοντας τις μετρήσεις της ίδιας μεταχείρισης κατά την πάροδο του χρόνου..... 53
- Εικόνα 12.** Μετρήσεις σχετικής πυκνότητας χλωροφύλλης SPAD (α) και σχετικού φθορισμού χλωροφύλλης (Fv/Fm) (β) στις 30, 60, 90 και 120 HMM σε όλες τις μεταχειρίσεις. Οι κάθετες μπάρες υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα και τα διαφορετικά χρώματα τις μεταχειρίσεις του πειράματος..... 54
- Εικόνα 13.** (α) Ολικά φαινολικά [$mg GAE 100 g^{-1} FW$], (β) φλαβονοειδή [$mg CAE 100 g^{-1} FW$], και ολικά αντιοξειδωτικά [$mg Trolox 100 g^{-1} FW$] στα φύλλα. Οι κάθετες μπάρες υποδηλώνουν

το τυπικό σφάλμα και τα διαφορετικά γράμματα σημαντικές διαφορές σύμφωνα με την δοκιμή Duncan σε επίπεδο σημαντικότητας $p \leq 0.05$ 57

Εικόνα 14. (α) Ολικά φαινολικά [mg GAE 100 g⁻¹ FW], (β) φλαβονοειδή [mg CAE 100 g⁻¹ FW], και ολικά αντιοξειδωτικά [mg Trolox 100 g⁻¹ FW] στη ρίζα. Οι κάθετες μπάρες υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα και τα διαφορετικά γράμματα σημαντικές διαφορές σύμφωνα με την δοκιμή Duncan σε επίπεδο σημαντικότητας $p \leq 0.05$ 57

Εικόνα 15. Απεικόνιση επάκριου καψίματος στο έλασμα των φύλλων ως αποτέλεσμα του υψηλού επιπέδου αλατότητας (στ, ζ, η) σε σχέση με τον μάρτυρα (α, β, γ, δ, ε), 120 ημέρες μετά την μεταφύτευση (HMM). 61

Εικόνα 16. Κεφαλή υδρολίπανσης (αριστερά) τύπου ALAGRO IQ60 και δεξαμενές πυκνών διαλυμάτων (δεξιά). 63

Εικόνα 17. Πειραματική απεικόνιση στην οποία παρουσιάζεται η ανάπτυξη των φυτών στις (α) 10, (β) 30, (γ) 60 και (δ) 100 ημέρες μετά την μεταφύτευση (HMM). 67

Εικόνα 18. Εκτίμηση της ΧΚΥ των υποστρωμάτων κοκοφοίνικα (0Π4Κ), περλίτη (4Π0Κ) και των μιγμάτων τους (3Π1Κ, 2Π2Κ και 1Π3Κ) σύμφωνα με το μοντέλο van Genuchten. Τα σύμβολα υποδηλώνουν τους μέσους όρους τεσσάρων επαναλήψεων της κάθε επέμβασης. 74

Εικόνα 19. Υδατοχωρητικότητα φυτοδοχείου (α) και αεροπερατότητα φυτοδοχείου (β) σε στα υποστρώματα κοκοφοίνικα (4Κ0Π), περλίτη (0Κ4Π) 0.5 - 5.0 mm και των μιγμάτων τους (1Π3Κ, 2Π2Κ, 3Π1Κ), όπως επηρεάζεται από το ύψος του υποστρώματος στον υποδοχέα. Οι εκτιμήσεις βασίστηκαν στις εξισώσεις της ΧΚΥ, και προσδιορίστηκαν με βάσει τέσσερις επαναλήψεις από κάθε επίπεδο μύζησης. 75

Εικόνα 20. Σχετική υδραυλική αγωγιμότητα K_r των περλίτη (0Κ4Π) 0.5- 5.0 mm, κοκοφοίνικα (0Π4Κ) και των μιγμάτων τους (1Π3Κ, 2Π2Κ, 3Π1Κ) ως συνάρτηση της μύζησης ή του ύψους του υποδοχέα. Οι καμπύλες προσδιορίστηκαν σύμφωνα με την Εξ. (6). 77

Εικόνα 21. Ανάλυση παλινδρόμησης μεταξύ των παραμέτρων απόδοσης (WFT, LR, LA, WFR, WFL, RDL και NL) και των φυσικών (BD) και υδραυλικών ιδιοτήτων (K, EAW και AWC) του υποστρώματος. Οι μεταχειρίσεις υποστρώματος (0Κ4Π, 3Κ1Π, 2Κ2Π, 1Κ3Π και 4Κ0Π) παρουσιάζονται με διαφορετικά χρώματα. Οι τύποι των υποδοχέων απεικονίζονται με διαφορετικό σχήμα των σημείων της καμπύλης (οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν μετρήσεις σε σάκο και με τρίγωνο σε γλάστρα). Η σχέση μεταξύ φυσιολογικών παραμέτρων και των παραμέτρων BD, EAW και AWC μοντελοποιήθηκε με γραμμική παλινδρόμηση, ενώ η K με λογαριθμική παλινδρόμηση... 79

Εικόνα 22. Συσκευή προσδιορισμού υδραυλικών ιδιοτήτων εδάφους - HYPROP2. Κεντρική μονάδα (αριστερά) και μονάδα πλήρωσης νερού (δεξιά). 87

Εικόνα 23. Διακύμανση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας κατά την περίοδο καλλιέργειας. 92

Εικόνα 24. Εξέλιξη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του διαλύματος απορροής όπως επηρεάστηκε από το επίπεδο ολικού-N (7,2 και 14,2 mM) και της αναλογίας NH_4^+ -N/ολικού-N (0.10 και 0.20, αντίστοιχα) στο διάλυμα τροφοδοσίας του ασκόλυμπτου. 97

- Εικόνα 25.** Πορεία εξέλιξης του pH στο διάλυμα απορροής όπως επηρεάστηκε από το ολικό άζωτο (7,2 και 14.2 mM) και την αναλογία $\text{NH}_4^+\text{-N}$ /ολικό-N (0.10 και 0.20, αντίστοιχα) του θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας υδροπονικής καλλιέργειας (σε σάκους περλίτη) του ασκόλυμπρου..... 98
- Εικόνα 26.** Αθροιστική απορρόφηση νερού (L plant^{-1}), φυτών ασκόλυμπρου που αναπτύχθηκαν σε υπόστρωμα περλίτη, όπως επηρεάστηκε από τις διαφορετικές μεταχειρίσεις θρεπτικών διαλυμάτων (LN10, LN20, HN10 και HN20). Οι μέσες τιμές ($n = 4$) με διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας $P \leq 5\%$ σύμφωνα με τη δοκιμή Duncan..... 99
- Εικόνα 27.** Επίδραση των επεμβάσεων θρεπτικών διαλυμάτων (LN10, LN20, HN10 και HN20) για κάθε ξεχωριστό στάδιο συγκομιδής (30, 60 και 90 HMM) στις συγκεντρώσεις μακροθρεπτικών στοιχείων στο υπέργειο και υπόγειο τμήμα του φυτού, αντίστοιχα. Μέσοι όροι ($n = 4$) με διαφορετικά μικρά γράμματα σε κάθε ημερομηνία δειγματοληψίας διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας $P \leq 5\%$ σύμφωνα με την δοκιμή Duncan..... 103
- Εικόνα 28.** Επίδραση της συγκέντρωσης ολικού αζώτου (7,2 και 14,2 mM) και της αναλογίας $\text{NH}_4^+\text{-N}$ /total-N (0,05 και 0,10) του θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας των φυτών ασκόλυμπρου, στις συγκεντρώσεις απορρόφησης μακροθρεπτικών στοιχείων (mM) κατά τα στάδια καλλιέργειας 0-30 , 30-60 και 60-90 HMM. Οι μέσοι όροι με διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμή Duncan ($P \geq 5\%$). 104
- Εικόνα 29.** Πανοραμική όψη φυτών *S. hispanicus* L. που καλλιεργήθηκαν σε σάκους, 30 HMM. Κάθε σάκος απεικονίζει μία από τις τέσσερις επεμβάσεις θρεπτικού διαλύματος, (HN20, HN10, LN20 και LN10 από αριστερά προς τα δεξιά) 110
- Εικόνα 30.** Συμπτώματα σήψης που προκλήθηκαν από την επέμβαση με θρεπτικό διάλυμα HN20 στη κονδυλώδη ρίζα (e) του ασκόλυμπρου., σε σχέση με αντίστοιχα υγιή φύλλα (a, b, c, d) του ίδιου φυτού, 90 HMM. 110
- Εικόνα 31.** Συλλογή και καταγραφή κλάσματος απορροής (αριστερά) από κάθε πειραματικό τεμάχιο (κανάλια υποδοχής των σάκων) και εκτίμηση στοματικής αγωγιμότητας (δεξιά) με χρήση οργάνου AP4 (Delta-T Devices, Cambridge, UK)..... 111
- Εικόνα 32.** Αποτέφρωση φυτικού ιστού στους 550 °C (αριστερά) και διήθηση υδατικών εκχυλισμάτων (δεξιά)..... 111
- Εικόνα 33.** Προσδιορισμός οργανικού αζώτου στους φυτικούς ιστούς με τη μέθοδο Kjeldahl μετά την ανοργανοποίηση με H_2SO_4 (αριστερά) και εκτίμηση των συγκεντρώσεων P, K, Ca και Mg από τα ληφθέντα υδατικά εκχυλίσματα με χρήση οργάνου ICP-MS (NexION 2000, PerkinElmer) (δεξιά)..... 112

Πίνακας 1. Διατροφική αξία ασκόλυμπρου σύμφωνα με τους Sánchez-Mata και Tardío, (2016), Petropoulos et al., (2018) και Ozel-Tasci και Gulec, (2023).	13
Πίνακας 2. Χημική σύσταση και χαρακτηριστικά του νερού άρδευση.	39
Πίνακας 3. Σύνθεση θρεπτικών διαλυμάτων των τεσσάρων μεταχειρίσεων σύμφωνα με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά μικροστοιχείων και ιχνοστοιχείων (mM και μM, αντίστοιχα) του θρεπτικού διαλύματος σε δύο σχέσεις N/K (χαμηλή και υψηλή) και δύο επίπεδα ηλεκτρικής αγωγιμότητας (2,2 και 2,8 dS m ⁻¹).	40
Πίνακας 4. Αποτελέσματα των μετρήσεων της επίδρασης των 4 θρεπτικών διαλυμάτων στον αριθμό των φύλλων, του νωπού βάρους των φύλλων και των ριζών (g), της διαμέτρου της ροζέτας των φύλλων, του σχετικού φθορισμού και της πυκνότητας της χλωροφύλλης των φύλλων. Οι μέσοι όροι της ίδιας στήλης ακολουθούνται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά με βάση το κριτήριο Duncan (p=0,05).....	43
Πίνακας 5. Συγκέντρωση θρεπτικών μακροστοιχείων των φύλλων και ριζοκόνδυλων σε χειμερινή καλλιέργεια ασκόλυμπρου για τις μεταχειρίσεις S1: Χαμηλή αγωγιμότητα, S2: Υψηλή αγωγιμότητα, N1: Χαμηλή σχέση N/K, N2: Υψηλή σχέση N/K. Οι μέσοι όροι της ίδιας στήλης ακολουθούνται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά με βάση το κριτήριο Duncan (p=0,05).....	44
Πίνακας 6. Σύνθεση θρεπτικού διαλύματος.....	49
Πίνακας 7. Επίδραση των μεταχειρίσεων στα ποσοτικά χαρακτηριστικά του φυτού, αριθμό φύλλων (N _L), νωπό βάρος φύλλων (WFL), νωπό βάρος κονδυλόριζας (WDR), ξηρό βάρος φύλλων (WDL), ξηρό βάρος κονδυλόριζας (WDL), 90 και 120 ημέρες μετά τη μεταφύτευση (HMM).....	55
Πίνακας 8. Συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων του ασκόλυμπρου σε φύλλα (L) και ρίζα (R) για τα 4 επίπεδα αλατότητας, 90 ημέρες μετά την μεταφύτευση (HMM). Διαφορετικά μικρά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές σε επίπεδο σημαντικότητας 5%.	55
Πίνακας 9. Μεταχειρίσεις υποστρωμάτων και οι αναλογίες του στο μίγμα.....	67
Πίνακας 10. Ειδικό φαινόμενο βάρος (BD), ενεργό πορώδες (EPS), υδατοϊκανότητα (WC; ποσοστιαία περιεκτικότητα νερού σε μύζηση 10 cm), εύκολα διαθέσιμο νερό (EAW; ποσοστιαία περιεκτικότητα νερού σε μύζηση μεταξύ 10 και 50 cm), ρυθμιστική χωρητικότητα σε νερό (WBC; Ποσοστιαία περιεκτικότητα νερού σε μύζηση 50 και 100 cm) και αεροπερατότητα (AC; ποσοστιαία περιεκτικότητα σε νερό μεταξύ 0 και 10 cm μύζησης) στα υποστρώματα κοκοφοίνικα (4K0Π), περλίτη (0K4Π) και μιγμάτων τους (3K1Π, 2K2Π, και 1K3Π).....	76
Πίνακας 11. Αποτελέσματα ποσοτικών παραμέτρων παραγοντικής ανάλυσης του μίγματος κοκοφοίνικα και περλίτη και του τύπου υποδοχέα υδροπονικής καλλιέργειας σκόλυμπρου, 100 ημέρες μετά την μεταφύτευση (HMM). Οι συντομογραφίες (NL), (WFL), (WFR), (LR) and (RDL) υποδηλώνουν τον αριθμό φύλλων, νωπό βάρος φύλλων [g], νωπό βάρος κονδυλόριζας [g], διάμετρος ροζέτας [cm], αντίστοιχα. Μέσες τιμές στην ίδια στήλη ακολουθούνται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σύμφωνα με τη δοκιμή πολλαπλού εύρους του Duncan σε επίπεδο σημαντικότητας 5%. Το επίπεδο σημαντικότητας συμβολίζεται με	

n.s., μονό ή διπλό αστερίσκο για απουσία διαφοράς, διαφορά σε επίπεδο σημαντικότητας $P < 0,05$ και $P < 0,01$, αντίστοιχα. 78

Πίνακας 12. Συγκεντρώσεις μακρο- και μικρο-θρεπτικών στοιχείων (g kg^{-1} ξηρό βάρος) σε πλήρως ανεπτυγμένα φύλλα του *S. hispanicus*, 100 ημέρες μετά τη μεταφύτευση. Οι τιμές αποτελούν τον μέσο όρο 4 επαναλήψεων. Διαφορετικά γράμματα κάθε γραμμής υποδηλώνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των υποστρωμάτων σε επίπεδο σημαντικότητας 5% σύμφωνα με τη δοκιμή πολλαπλού εύρους Duncan 80

Πίνακας 13. Συνθέσεις θρεπτικών διαλυμάτων των τεσσάρων μεταχειρίσεων του πειράματος.. 93

Πίνακας 14. Επίδραση της συγκέντρωσης ολικού N (LN: 7,2 mM N, HN: 14,2 mM N) και της αναλογίας $\text{NH}_4\text{-N/ολικού-N}$ (10: 0,1; 20: 0,2) του τροφοδοτούμενου θρεπτικού διαλύματος στην ανάπτυξη και τη φωτοσυνθετική ικανότητα των φυτών στις 90 ημέρες μετά τη μεταφύτευση (HMM). Οι μέσοι όροι των τιμών ($n = 4$) με διαφορετικά μικρά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας $P \leq 5\%$ σύμφωνα με την δοκιμή Duncan. 100

Πρωτοτυπία της διδακτορικής διατριβής

Από την παρούσα διδακτορική διατριβή προέκυψαν πρωτότυπα δεδομένα τόσο σε βασική όσο και σε εφαρμοσμένη έρευνα. Τα πρωτότυπα αυτά στοιχεία έχουν ήδη παρουσιαστεί σε επιστημονικά συνέδρια ή δημοσιευτεί σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά τα κυριότερα των οποίων αναφέρονται κατωτέρω:

- Αποδείχθηκε η δυνατότητα εμπορικής καλλιέργειας του άγριου λαχανεύομενου είδους ασκόλυμπρου με την σύγχρονη μέθοδο της υδροπονίας
- Μελετήθηκε η επίδραση του επιπέδου ολικού αζώτου και της αναλογίας αμμωνιακού/ολικό αζώτο του παρεχόμενου θρεπτικού διαλύματος στην θρέψη του ασκόλυμπρου
- Μελετήθηκε η επίδραση της αλατότητας του θρεπτικού διαλύματος στα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του ασκόλυμπρου σε υδροπονική καλλιέργεια. Ο ασκόλυμπρος αποδείχθηκε ανθεκτικός σε μέτρια επίπεδα αλατότητας του θρεπτικού διαλύματος
- Αξιολογήθηκαν δύο υποστρώματα υδροπονικής καλλιέργειας (κοκκοφοίνικας και περλίτης καθώς και μίγματά τους), και προσδιορίστηκαν οι υδραυλικές τους ιδιότητες
- Αξιολογήθηκε η επίδραση της γεωμετρίας του υποδοχέα στα εμπορικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά του ασκόλυμπρου και ιδιαίτερα της ανάπτυξης του εδώδιμου ριζοκόνδουλου
- Προσδιορίστηκαν οι συγκεντρώσεις απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων του θρεπτικού διαλύματος του ασκόλυμπρου, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη κατάρτιση μιας βέλτιστης σύνθεσης θρεπτικού διαλύματος σε ανοικτό και κλειστό σύστημα εκτός εδάφους καλλιέργειας του φυτού.
- Προσδιορίστηκε του βέλτιστο στάδιο συγκομιδής του φυτού σε ανοικτό σύστημα εκτός εδάφους καλλιέργειας
- Επιτεύχθηκε βελτίωση της απόδοσης της συσκευής προσδιορισμού υδραυλικών χαρακτηριστικών εδάφους Hyprop Hydraulic Properties Analyzer (HYPROP2, Meter Group, USA) με κατάλληλο έλεγχο της θερμοκρασίας και της ροής αέρα στην μονάδα του αναλυτή (<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13082>), δεδομένο που μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια των δεδομένων χρήσης του οργάνου σε αναλύσεις υδραυλικών ιδιοτήτων διαφόρων υποστρωμάτων καλλιέργειας.

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

Επιστημονικές δημοσιεύσεις που προέκυψαν από την παρούσα διδακτορική διατριβή.

Στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής προέκυψαν οι παρακάτω δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά:

- Papadimitriou, D.M., Daliakopoulos, I.N., Kontaxakis, E., Sabathianakis, M., Manios, T., Savvas, D., 2022. Effect of moderate salinity on Golden Thistle (*Scolymus hispanicus* L.) grown in a soilless cropping system. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 303, 111182. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111182>
- Papadimitriou, D.M., Daliakopoulos, I.N., Louloudakis, I., Savvidis, T.I., Sabathianakis, I., Savvas, D., Manios, T., 2024. Impact of container geometry and hydraulic properties of coir dust, perlite, and their blends used as growing media, on growth, photosynthesis, and yield of Golden Thistle (*S. hispanicus* L.). *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 323, 112425. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112425>
- Papadimitriou, D.M., Daliakopoulos, I.N., Lydakis-Simantiris, N., Cheiladaki, I., Manios, T., Savvas, D., 2024. Nitrogen source and supply level impact water uptake, yield, and nutrient status of golden thistle (*Scolymus hispanicus* L.) in a soilless culture. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113384>

Επίσης, πραγματοποιήθηκαν παρουσιάσεις σε διεθνή συνέδρια:

- Papadimitriou, D., Daliakopoulos, I., Kontaxakis, E., 2022. Preliminary results of container and substrate effect on yield characteristics of *Scolymus hispanicus* L. in soilless cultivation system. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-11398>
- Papadimitriou, D., Daliakopoulos, I., Manios, T., & Savvas, D. (2022). Salinity tolerance in *Scolymus hispanicus* L: preliminary findings from a soilless cultivation. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-14357>
- Papadimitriou, D., Kontaxakis, E., Daliakopoulos, I., Manios, T., Savvas, D., 2020. Effect of N:K Ratio and Electrical Conductivity of Nutrient Solution on Growth and Yield of Hydroponically Grown Golden Thistle (*Scolymus hispanicus* L.). *Proceedings* 30, 87.

Βιογραφικό σημείωμα

Papadimitriou Dimitrios

A. Kalokairinou 13, Heraklion, Crete

e-mail: dimpapst@gmail.com

Cell.: +30 6979341412

Education

- 2019 - 2024** **PhD candidate.** Laboratory of Vegetable Production / Agricultural University of Athens
- Doctoral thesis:** "Effect of growing media and nutrient solution composition on yield and quality characteristics of *Scolymus hispanicus* L. grown in soilless cultivation system"
- 2015 - 2016** **Master's degree (MSc):** Integrated Systems of Crop Production. Faculty of Crop Science, Agricultural University of Athens
- 2007 - 2014** Undergraduate studies: Department of Crop Science - Agricultural University of Athens (AUA).
- Undergraduate thesis:** "Comparative bioactivity of essential oils from two *Mentha pulegium* (Lamiaceae) chemotypes against *Aphis gossypii*, *Aphis spiraecola*, *Tetranychus urticae* and the generalist predator *Nesidiocoris tenuis*."

Work experience

- 2016 - 2018** GEP Field Trials Officer. MAGMA AGRICULTURAL INPUTS.SA.

Publications

1. Papadimitriou, D.M., Petrakis, E.A., Arvaniti, K.A., Kimbaris, A.C., Polissiou, M.G., Perdiki, D.C., 2019. Comparative bioactivity of essential oils from two *Mentha pulegium* (Lamiaceae) chemotypes against *Aphis gossypii*, *Aphis spiraecola*, *Tetranychus urticae* and the generalist predator *Nesidiocoris tenuis*. *Phytoparasitica* 47, 683–692. <https://doi.org/10.1007/S12600-019-00770-X/FIGURES/2>
2. Moschou, C.E., Papadimitriou, D.M., Galliou, F., Markakis, N., Papastefanakis, N., Daskalakis, G., Sabathianakis, M., Stathopoulou, E., Bouki, C., Daliakopoulos, I.N., Manios, T., 2022. Grocery Waste Compost as an Alternative Hydroponic Growing Medium. *Agronomy* 12, 789. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040789>

3. Papadimitriou, D.M., Daliakopoulos, I.N., Kontaxakis, E., Sabathianakis, M., Manios, T., Savvas, D., 2022. Effect of moderate salinity on Golden Thistle (*Scolymus hispanicus* L.) grown in a soilless cropping system. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 303, 111182. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111182>
4. Georgantopoulos, P.S., Papadimitriou, D., Constantinopoulos, C., Manios, T., Daliakopoulos, I.N., Kosmopoulos, D., 2023. A Multispectral Dataset for the Detection of Tuta Absoluta and Leveillula Taurica in Tomato Plants. *Smart Agric. Technol.* 4, 100146. <https://doi.org/10.1016/J.ATECH.2022.100146>
5. Kontaxakis, E., Papadimitriou, D., Daliakopoulos, I., Sabathianakis, I., Stavropoulou, A., Manios, T., 2023. Water Availability in Pumice, Coir, and Perlite Substrates Regulates Grapevine Growth and Grape Physicochemical Characteristics in Soilless Cultivation of Sugraone and Prime Cultivars (*Vitis vinifera* L.). *Agriculture* 13, 1690. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091690>
6. Papadimitriou, D.M., Daliakopoulos, I.N., Louloudakis, I., Savvidis, T.I., Sabathianakis, I., Savvas, D., Manios, T., 2024. Impact of container geometry and hydraulic properties of coir dust, perlite, and their blends used as growing media, on growth, photosynthesis, and yield of Golden Thistle (*S. hispanicus* L.). *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 323, 112425. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112425>
7. Christoforidi, I., Daliakopoulos, I.N., Papadimitriou, D., Tzanakakis, V., Louloudakis, I., Papadopoulos, I., Pnevmatikakis, M., Tsitsiridou, M., Kafkala, T., Kontekas, K., Galliaki, M., Markakis, N., Manios, T., Paschalidis, K., Psaroudaki, A., 2024. Effect of foliar fertilization on *Urospermum picroides*, an indigenous plant of the traditional cretan-mediterranean diet. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 332, 113202. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113202>
8. Kamarianakis, Z., Perdikakis, S., Daliakopoulos, I.N., Papadimitriou, D.M., Panagiotakis, S., 2024. Design and Implementation of a Low-Cost, Linear Robotic Camera System, Targeting Greenhouse Plant Growth Monitoring. *Futur. Internet* 16, 145. <https://doi.org/10.3390/fi16050145>
9. Papadimitriou, D. M., Daliakopoulos, I. N., Lydakakis-Simantiris, N., Cheiladaki, I., Manios, T., & Savvas, D. (2024). Nitrogen source and supply level impact water uptake, yield, and nutrient status of golden thistle in a soilless culture. *Scientia Horticulturae*, 336, 113384. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113384>

Participation in projects

[2018– 2021] “DRIP project: Development of an Advanced Precision Drip Irrigation System for Tree Crops.” This research has been co-financed by the European Union and Greek national funds through the Operational Program Competitiveness, Entrepreneurship and Innovation, under the call RESEARCH-CREATE-INNOVATE (project code: T1EDK-03372) (8/2018 – 9/2021)

[2018– 2021] “SOUP project: Soilless Culture Upgrade.” This research has been co-financed by the European Union and Greek national funds through the Operational Program Competitiveness, Entrepreneurship, and Innovation, under the call RESEARCH-CREATE-INNOVATE (project codes: T1EDK-04171) (06/2018 – 06/2021)

[2018– 2021] “Hydrask project: Hydroponic Scolymus” This research has been co-financed by the European Union and Greek national funds through the Operational Program Competitiveness, Entrepreneurship, and Innovation, under the call RESEARCH-CREATE-INNOVATE (project codes: T1EDK-05550) (05/2018 – 05/2021)

[2022– 2024] “REACT4MED: Inclusive Outscaling of Agro-Ecosystem Restoration Actions for the Mediterranean”. funded by the Partnership for Research and Innovation in the Mediterranean Area (PRIMA), (Grant Agreement No. 2122).

[2023– today] “LIGHTGR: Lightweight Structures and Use of Alternative Water Sources for the Development of Green Roof Systems in Existing Buildings as an Adaptive Measure to Climate Change in Urban Areas (PHYSICAL ENVIRONMENT & INNOVATIVE ACTIONS 2022), (Grant Agreement No. 2122).

Grants

- The PhD research work was supported by the Hellenic Foundation for Research and Innovation (HFRI) under the HFRI PhD Fellowship grant (Fellowship Number: 240).