

**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ
ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΔΥΟ ΙΧΝΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (Mn, Zn) ΣΕ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΑΓΓΟΥΡΙΑΣ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΑ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΑ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

Κωνσταντίνος Σ. Τζεράκης



ΑΘΗΝΑ 2014

Επιβλέπων: Νικόλαος Συγριμής, Καθηγητής

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ
ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΔΥΟ ΙΧΝΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (Mn, Zn) ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ
ΑΓΓΟΥΡΙΑΣ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΑ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

Κωνσταντίνος Σ. Τζεράκης

ΑΘΗΝΑ 2014

Επιβλέπων: Νικόλαος Συγριμής, Καθηγητής Γ.Π.Α.

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΔΥΟ ΙΧΝΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (Mn, Zn) ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΑΓΓΟΥΡΙΑΣ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΑ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

Κωνσταντίνος Σ. Τζεράκης

Επιβλέπων: Νικόλαος Συγριμής, Καθηγητής Γ.Π.Α.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Νικόλαος Συγριμής, Καθηγητής Γ.Π.Α., ως Επιβλέπων

Γεώργιος Μαυρογιανόπουλος, Καθηγητής Γ.Π.Α., ως Μέλος

Δημήτριος Σάββας, Αν. Καθηγητής Γ.Π.Α., ως Μέλος

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Νικόλαος Συγριμής, Καθηγητής Γ.Π.Α.

Γεώργιος Μαυρογιανόπουλος, Καθηγητής Γ.Π.Α.

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

Δημήτριος Μπουράνης, Καθηγητής Γ.Π.Α.

Κωνσταντίνος Κίττας, Καθηγητής Π.Θ.

Κωνσταντίνος Αρβανίτης, Αν. Καθηγητής Γ.Π.Α.

Στυλιανή Χωριανοπούλου, Λέκτορας Γ.Π.Α.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής ήταν η μελέτη των επιπτώσεων υψηλών συγκεντρώσεων Mn και Zn στην αγγουριά όταν καλλιεργείται σε κλειστά υδροπονικά συστήματα και η ανάπτυξη και βαθμονόμηση μοντέλων απορρόφησης των δύο αυτών ιχνοστοιχείων. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά δύο πειράματα. Στο πρώτο πείραμα διερευνήθηκε η επίδραση της συσσώρευσης Mn και Zn στο ριζικό περιβάλλον στα φυτά. Ο αρχικός στόχος αυτού του πειράματος ήταν να διαπιστωθεί τότε, κάτω από ποιες συνθήκες και με τι συμπτώματα εμφανίζεται τοξικότητα των δύο αυτών ιχνοστοιχείων στις υδροπονικές καλλιέργειες αγγουριάς. Στο δεύτερο πείραμα, διερευνήθηκε η επίδραση που ασκεί η συγκέντρωση του Mn και του Zn στο παρεχόμενο θρεπτικό διάλυμα στην απορρόφησή τους από την αγγουριά. Ο αρχικός στόχος αυτού του πειράματος ήταν η κατάρτιση τεκμηριωμένων συστάσεων για τις ενδεδειγμένες συγκεντρώσεις Mn και Zn στα θρεπτικά διαλύματα που χορηγούνται σε κλειστές υδροπονικές καλλιέργειες αγγουριάς. Στη συνέχεια τα δεδομένα αυτών των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν σε μία μετα-ανάλυση με στόχο την ανάπτυξη - βαθμονόμηση ενός μοντέλου απορρόφησης μαγγανίου και ψευδαργύρου με βάση την αθροιστική κατανάλωση νερού και στη συνέχεια τον έλεγχο της αξιοπιστίας των εκδοχών που προέκυψαν από την βαθμονόμηση του για τα δύο αυτά ιχνοστοιχεία.

Ειδικότερα στο πρώτο πείραμα αρχικά επιχειρήθηκε να καθοριστούν τα κρίσιμα επίπεδα συγκεντρώσεων Zn και Mn στο θρεπτικό διάλυμα και στα φύλλα αγγουριάς σε υδροπονική καλλιέργεια, να διερευνηθεί η υπόθεση ότι η συγκέντρωση του Mn και /ή του Zn στα φύλλα γίνεται κρίσιμη μόλις αρχίζει να διαταράσσει την φωτοσυνθετική λειτουργία και αν το Mn και ο Zn έχουν προσθετικές επιδράσεις όταν και τα δύο στοιχεία είναι σε υπερβολικές συγκεντρώσεις στο ριζικό περιβάλλον. Για το σκοπό αυτό, μια κανονική και μια υψηλή συγκέντρωση μαγγανίου (10 και 160 μM) συνδυάστηκαν με μια κανονική και μια υψηλή συγκέντρωση ψευδαργύρου (4 και 64 μM) σε θρεπτικό διάλυμα που δόθηκε σε φυτά αγγουριάς σε 16 ανεξάρτητα κλειστά υδροπονικά συστήματα για την αναπλήρωση της κατανάλωσης νερού και θρεπτικών στοιχείων. Οι συγκεντρώσεις όλων των θρεπτικών στοιχείων εκτός από το Mn και το Zn ήταν ίδιες σε όλες τις επεμβάσεις. Τα πρώτα συμπτώματα τοξικότητας Mn και Zn εμφανίστηκαν όταν η συγκέντρωση του Mn και του Zn στα φύλλα έφτασε τα 900 και 450 mg kg^{-1} σε ξηρό βάρος αντίστοιχα. Οι υψηλές συγκεντρώσεις Mn και/ή Zn στα φύλλα μείωσαν την βιομάζα των καρπών λόγω μείωσης του αριθμού των καρπών ανά φυτό, καθώς επίσης και τον καθαρό ρυθμό αφομοίωσης (NAR), την στοματική αγωγιμότητα και το ρυθμό αναπνοής ενώ αύξησαν τα επίπεδα του μεσοκυττάριου CO_2 . Αρχικά, οι συγκεντρώσεις του Mn ή του Zn στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα αυξάνονταν με γρήγορο ρυθμό αλλά βαθμιαία σταθεροποιήθηκαν σε συγκεκριμένα ανώτατα επίπεδα, ενώ οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις στα φύλλα αυξάνονταν σταθερά μέχρι το τέλος του πειράματος. Η απορρόφηση του Mg, του Ca, του Fe και του Cu επηρεάστηκαν αρνητικά ενώ του K και του P παρέμειναν ανεπηρέαστες από τις εξωτερικές συγκεντρώσεις του Mn και του Zn. Ο συνδυασμός υψηλού Mn και υψηλού Zn φαίνεται να έχει μη προσθετικές επιδράσεις στις παραμέτρους που διερευνήθηκαν.

Στο δεύτερο πείραμα εκτιμήθηκε η απορρόφηση του μαγγανίου και του ψευδαργύρου από την αγγουριά σε κλειστά υδροπονικά συστήματα με διαφορετικές συγκεντρώσεις Mn και Zn στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα στις μεσογειακές συνθήκες καλλιέργειας. Εφαρμόστηκαν τέσσερα επίπεδα Mn (10, 40, 80, 120 μM) με

κανονική συγκέντρωση Zn (μM) και τέσσερα επίπεδα Zn (6, 20, 40, 60 μM) με κανονική συγκέντρωση Mn (10 μM) στο θρεπτικό διάλυμα αναπλήρωσης νερού και θρεπτικών στοιχείων. Οι συγκεντρώσεις απορρόφησης του Mn και του Zn εκτιμήθηκαν με την εφαρμογή δύο διαφορετικών μεθόδων. Η πρώτη μέθοδος βασιζόταν στην απομάκρυνση του Mn, του Zn και του νερού από το ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα, ενώ η δεύτερη βασιζόταν στις συνολικές ποσότητες Mn και Zn που απορροφήθηκαν από τη φυτική βιομάζα σε συνδυασμό με την ολική απορρόφηση νερού. Και οι δύο μέθοδοι έδωσαν παρόμοιες συγκεντρώσεις απορρόφησης για το Mn στο χαμηλό επίπεδο τροφοδοσίας Mn και για τον Zn σε όλα τα επίπεδα τροφοδοσίας. Ωστόσο, στα τρία υψηλότερα επίπεδα τροφοδοσίας Mn, οι τιμές που εκτιμήθηκαν με βάση την απομάκρυνση από το ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα ήταν σημαντικά υψηλότερες από αυτές που βρέθηκαν με την μέτρηση της περιεκτικότητας σε Mn της φυτικής βιομάζας. Αυτές οι διαφορές στις τρεις επεμβάσεις με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις Mn αποδόθηκαν στην μερική δέσμευση του μαγγανίου από οξειδωτικά βακτήρια στο θρεπτικό διάλυμα.

Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η σχέση, μεταξύ της συγκέντρωσης απορρόφησης και της συγκέντρωσης στο ΑΘΔ χρησιμοποιήθηκε μια διαφορική εξίσωση που σχετίζει τον ρυθμό συσσώρευσης του Mn ή του Zn με τον ρυθμό πρόσληψης του θρεπτικού διαλύματος που χρησιμοποιήθηκε για την αντιστάθμιση των απωλειών διαπνοής. Η εξίσωση αυτή είχε αριθμητική λύση, σύμφωνα με την αριθμητική μέθοδο των Runge-Kutta, για την περίπτωση του Zn όπου η σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης απορρόφησης του Zn και της αντίστοιχης συγκέντρωσης στο ριζικό περιβάλλον ήταν εκθετική, ενώ για το Mn που η σχέση ήταν γραμμική η εξίσωση είχε αναλυτική λύση. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση του μοντέλου ήταν από πείραμα καλλιέργειας αγγουριάς σε κλειστό υδροπονικό σύστημα NFT όπου εφαρμόστηκαν τέσσερα επίπεδα Mn (10, 40, 80, 120 μM) με σταθερή συγκέντρωση ψευδαργύρου (6 μM) και τέσσερα επίπεδα Zn (6, 20, 40, 60 μM) με σταθερή συγκέντρωση μαγγανίου (10 μM). Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του μοντέλου, όπως βαθμονομήθηκε για το Mn και τον Zn, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το πρώτο πείραμα της παρούσας διατριβής. Οι θεωρητικά υπολογισμένες καμπύλες ακολούθησαν ένα κυρτό σχήμα, με αρχικά ταχεία αύξηση των συγκεντρώσεων Mn ή Zn στο ριζικό σύστημα και σταδιακή σταθεροποίηση καθώς η αθροιστική κατανάλωση νερού αυξανόταν. Αυτό το πρότυπο μεταβολής αποδόθηκε στην σταδιακή εξίσωση των συγκεντρώσεων εισόδου Mn ή Zn και των συγκεντρώσεων απορρόφησης τους από τα φυτά οι οποίες αυξάνονται με την συσσώρευση των στοιχείων αυτών στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα. Όπως έδειξε ο έλεγχος αξιοπιστίας της βαθμονόμησης των μοντέλων για το Mn και τον Zn, οι συγκεντρώσεις των δύο αυτών ιχνοστοιχείων στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα μπορούν να προβλεφτούν με αποδεκτή ακρίβεια χρησιμοποιώντας τα παραπάνω μοντέλα, αλλά μόνο στην περίπτωση υψηλών συγκεντρώσεων των στοιχείων αυτών στο ΘΔΑ.

Επιστημονική περιοχή: Αυτοματισμοί στη Γεωργία

Λέξεις κλειδιά: απορρόφηση θρεπτικών στοιχείων, ιχνοστοιχεία, τοξικότητα, μοντέλα απορρόφησης, αγγουριά, κλειστά υδροπονικά συστήματα

SUMMARY

The aim of this thesis was to develop and calibrate uptake models for the micronutrients Mn and Zn in cucumber cultivated in closed hydroponic systems. A total of two experiments were carried out in which investigated the effect of Mn and Zn accumulation in the root environment and its influences on plants, the effect of Mn and Zn concentration in the supplied nutrient solution in their uptake by the cucumber plants and the development, calibration and validation of manganese and zinc uptake models based on cumulative water consumption.

In order to establish critical Zn and Mn levels in both nutrient solutions and leaves of cucumber grown hydroponically, to assess the impact of gradual Zn and/or Mn accumulation in the external solution on nutrient uptake and gas exchange, and to find whether Mn and Zn have additive effects when the levels of both ions are excessively high in the root zone, a standard and a high manganese (Mn) level (10 and 160 μM) were combined with a standard and a high zinc (Zn) level (4 and 64 μM) in the nutrient solution supplied to cucumber in closed cycle hydroponic units to compensate for nutrient uptake. The concentrations of all nutrients except Mn and Zn were identical in all treatments. The first symptoms of Mn and Zn toxicity appeared when the concentrations of Mn and Zn in the leaves of cucumber reached 900 and 450 mg kg^{-1} in the dry weight, respectively. Excessively high Mn or/and Zn concentrations in the leaves reduced the fruit biomass production due to decreases in the number of fruits per plant, as well as the net assimilation rate, stomatal conductance, and transpiration rate, but increased the intercellular CO_2 levels. Initially, the Mn or Zn concentrations in the recirculating nutrient solution increased rapidly but gradually stabilized to maximal levels, while the corresponding concentrations in the leaves constantly increased until the end of the experiment. The uptake of Mg, Ca, Fe, and Cu was negatively affected, while that of K and P remained unaffected by the external Mn and Zn levels. The combination of high Mn and Zn seems to have no additive effects on the parameters investigated.

For the uptake estimation of manganese (Mn) and zinc (Zn) by cucumber in closed hydroponic systems at different Mn and Zn concentrations in the recycled nutrient solution under Mediterranean climatic conditions, four Mn levels (10, 40, 80, 120 mM) at a standard Zn concentration (6 mM) and four Zn levels (6, 20, 40, 60 mM) at a standard Mn concentration (10 mM) in the solution supplied to compensate for nutrient and water uptake by plants were applied as experimental treatments. The actual uptake concentrations of Mn and Zn were estimated by applying two different methods. The first method was based on the removal of Mn, Zn, and water from the recycling nutrient solution, whereas the second method was based on the total quantities of Mn and Zn that were recovered in plant biomass in combination with the total water uptake. Both methods gave similar uptake concentrations for Mn in the low-Mn supply level and Zn in all Zn levels. However, in the three higher Mn supply levels, the values estimated on the basis of nutrient removal from the recirculating nutrient solution were significantly higher than those found by measuring the total Mn content in plant biomass. These discrepancies in the three high-Mn treatments were possibly caused by partial immobilization of Mn by oxidizing bacteria in the nutrient solution.

For the development of uptake models of Mn and Zn which are based on the cumulative water consumption, used a differential equation that relates the rate of

accumulation of Mn or Zn with the uptake rate of the nutrient solution used for the compensation of transpiration losses. This equation, for the case of Zn, has a numerical solution, according to the numerical method of Runge-Kutta, where the relationship between the uptake concentration of Zn and the corresponding concentration in the root environment was exponential, while for Mn, that the relation was linear the equation was solved analytically. The data used for the calibration of the model was from a closed culture cucumber NFT hydroponic system where four levels (10, 40, 80, 120 μM) of Mn applied with a constant zinc concentration and four levels of Zn (6, 20, 40, 60 μM) with a constant concentration of manganese. For the validation of the models used data from a previous experiment. The theoretically calculated curves followed a curved shape, with rapid initial growth of Mn or Zn concentrations in the root zone and gradual stabilization as the cumulative water consumption increased. This was attributed to the gradual equalization of inlet concentrations of Zn or Mn and their uptake concentrations by plants which increase with the accumulation of these elements in the recirculating nutrient solution. As demonstrated by the validation of models, concentrations of Mn or Zn in the recirculating nutrient solution can be predicted with acceptable accuracy, based on the above models, only in case of high concentrations of these elements in the nutrient solution used for the replenishment of nutrient and water losses of the plants.

Scientific area: Automation in Agriculture

Keywords: nutrient uptake, modeling nutrient uptake, micronutrients, toxicity, cucumber, closed hydroponic systems

«Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από το τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα»

Νόμος 5343/52, άρθρο 202 §2

στην οικογένεια μου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Την παρούσα διατριβή πραγματοποίησα στο Εργαστήριο Υδροπονίας του Ινστιτούτου Ελιάς και Υποτροπικών Φυτών Χανίων της Γενικής Διεύθυνσης Αγροτικής Έρευνας του Ελληνικού Γεωργικού Οργανισμού «ΔΗΜΗΤΡΑ» κατά το χρονικό διάστημα 2008- 2013.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέποντα κ. Νικόλαο Συγριμή, Καθηγητή Γ.Π.Α. για την ανάθεση του θέματος, στα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής κ. Δημήτριο Σάββα, Αν. Καθ. Γ.Π.Α. για τη συνεχή καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές και παρατηρήσεις του σε κάθε στάδιο της διατριβής καθώς επίσης και στον κ. Γεώργιο Μαυρογιανόπουλο Καθ. Γ.Π.Α. για την άψογη συνεργασία του. Επίσης τον Δρ. Κων/νο Οικονομάκη τ. Ερευνητή Α΄ του ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε. και τον Δρ. Κωνσταντίνο Χατζουλάκη Ερευνητή Α΄ του ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε., για τη διαρκή ενθάρρυνση και υποστήριξη κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής. Ιδιαίτερως ευχαριστώ τους κ. Δ. Μπουράνη καθηγητή ΓΠΑ, κ. Κ. Κίττα καθηγητή ΠΘ, κ. Κ. Αρβανίτη Αν. Καθηγητή ΓΠΑ και την κα Σ. Χωριανοπούλου Λέκτορα ΓΠΑ για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή και τις παρατηρήσεις τους επί του κειμένου. Πολλές ευχαριστίες οφείλω στο προσωπικό του Ινστιτούτου Ελιάς και Υποτροπικών Φυτών Χανίων για την συμπαράστασή του και ιδιαίτερα την βοηθό εργαστηρίου κα Σοφία Σαλούστρου, την κα Δωροθέα Σαμιώτη, τον κ. Ευάγγελο Ποτεντσιανάκη, τον κ. Εμμανουήλ Σολανάκη και τον συνάδελφο Δρ. Γεώργιο Δούπη για την συνεισφορά του στις μετρήσεις φωτοσύνθεσης. Επίσης, ευχαριστώ τον γεωπόνο M.Sc. του Εργαστηρίου Γεωργικής Μηχανολογίας του τμήματος ΑΦΠ & ΓΜ κ. Αχιλλέα Αναστασίου για την βοήθειά του.

Ευχαριστίες οφείλω και στον ΕΛ.Γ.Ο. «ΔΗΜΗΤΡΑ» για την παραχώρηση χρήσης των εγκαταστάσεων του Ινστιτούτου για την εκπόνηση της διατριβής.

Οι μεγαλύτερες ευχαριστίες ανήκουν στην οικογένεια μου για την ηθική συμπαράσταση και για τον χρόνο που τους στέρησα.

Κωνσταντίνος Τζεράκης

Χανιά, Ιανουάριος 2014

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΜΕΡΟΣ Α. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. Εισαγωγή – Σκοπός της εργασίας	1
ΜΕΡΟΣ Β. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	6
1. Η υδροπονία σαν μέθοδος καλλιέργειας	6
2. Θρεπτικά διαλύματα στην υδροπονία	6
2.1. Σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος	6
2.2. Η ποιότητα του νερού άρδευσης	8
2.3. Παρασκευή των θρεπτικών διαλυμάτων	9
2.4. Χαρακτηριστικά των θρεπτικών διαλυμάτων	10
3. Η απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων και η κίνησή τους εντός των φυτών	12
I. Αποπλασμική διάχυση	13
II. Ενεργητική απορρόφηση	14
III. Κίνηση εντός των φυτών	14
4. Τα ιχνοστοιχεία σαν απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία	15
5. Η απορρόφηση του μαγγανίου και του ψευδαργύρου και ο φυσιολογικός τους ρόλος στον μεταβολισμό των φυτών	17
5.1 Το Μαγγάνιο	17
5.2 Ο ψευδάργυρος	19
6. Έλλειψη και περίσσεια μαγγανίου και ψευδαργύρου στην αγγουριά.	22
6.1 Έλλειψη και τοξικότητα μαγγανίου	22
6.2 Έλλειψη και τοξικότητα ψευδαργύρου	23
7. Η ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος στις υδροπονικές καλλιέργειες	24
8. Μοντέλα απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων στα κλειστά υδροπονικά συστήματα	28
ΜΕΡΟΣ Γ. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	35
1. Περιγραφή υδροπονικού συστήματος	35
2. Φυτικό υλικό - Συνθήκες ανάπτυξης	45
3. Προσδιορισμός των θρεπτικών στοιχείων στα υδροπονικά διαλύματα	48
4. Προσδιορισμός των θρεπτικών στοιχείων στους φυτικούς ιστούς της αγγουριάς. ...	50
5. Προσδιορισμός των παραμέτρων ανταλλαγής των αερίων	52

ΜΕΡΟΣ Δ. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ	55
ΠΕΙΡΑΜΑ ΠΡΩΤΟ: ΒΑΘΜΙΑΙΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥ ΚΑΙ ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ ΣΤΟ ΡΙΖΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΗΣ ΑΓΓΟΥΡΙΑΣ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΤΑ ΦΥΤΑ	55
1.1. Εισαγωγή	55
1.2. Υλικά και Μέθοδοι.....	58
1.3. Αποτελέσματα	60
1.4. Συζήτηση.....	72
1.5. Συμπεράσματα	77
ΠΕΙΡΑΜΑ ΔΕΥΤΕΡΟ: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΤΟΥ Μn ΚΑΙ Ζn ΣΤΟ ΠΑΡΕΧΟΜΕΝΟ ΘΡΕΠΤΙΚΟ ΔΙΑΛΥΜΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΤΟΥΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΓΓΟΥΡΙΑ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	78
2.1. Εισαγωγή	78
2.2. Υλικά και Μέθοδοι.....	80
2.3. Αποτελέσματα και συζήτηση	83
2.4. Συμπεράσματα	92
ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΡΙΤΟ: ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥ ΚΑΙ ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ ΣΤΗΝ ΑΓΓΟΥΡΙΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	93
3.1. Εισαγωγή	93
3.2. Υλικά και μέθοδοι.....	95
3.3. Αποτελέσματα και συζήτηση	96
3.4. Συμπεράσματα	101
ΜΕΡΟΣ Ε: ΓΕΝΙΚΗ ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	103
ΜΕΡΟΣ ΣΤ. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	108

ΜΕΡΟΣ Α. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Εισαγωγή – Σκοπός της εργασίας

Η καλλιέργεια της αγγουριάς (οικογένεια: *Cucurbitaceae*, είδος: *Cucumis sativus* L.) στο θερμοκήπιο είναι σημαντική τόσο για την ελληνική όσο και για την παγκόσμια οικονομία. Είναι φυτό θερμής εποχής με ουδέτερο φωτοπεριοδισμό και καλλιεργείται για τον καρπό του που καταναλώνεται άγουρος – νωπός, στις σαλάτες ενώ υπάρχουν και ποικιλίες κατάλληλες για τουρσί. Η αγγουριά καλλιεργείται σε μεγάλες εκτάσεις στην Ασία, την Ευρώπη και την βόρεια & κεντρική Αμερική. Από τις κυριότερες χώρες παραγωγής είναι η Κίνα με μεγάλη διαφορά από τις υπόλοιπες ενώ από τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης τις μεγαλύτερες ποσότητες παράγουν κατά σειρά η Ισπανία, η Πολωνία, η Ολλανδία, η Γερμανία, η Ρουμανία και η Ελλάδα (Πηγή: FAO Production Yearbook 2009). Στη χώρα μας, η αγγουριά καλλιεργείται σε σημαντικές εκτάσεις (υπαίθρια, θερμοκήπια και χαμηλά τούνελ) 22.140 στρ. με συνολική παραγωγή 175.440 τόνους το 2009 (Πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων). Η καλλιέργεια της αγγουριάς σε υψηλά θερμοκήπια (14.377 στρ. για το 2006) συναντάται στην Κρήτη στους νομούς Λασιθίου (Ιεράπετρα), Ηρακλείου (Τυμπάκι) και Χανίων (Κίσσαμος), ενώ από την υπόλοιπη Ελλάδα στην Πελοπόννησο (Μεσσηνία, Ηλεία, Λακωνία) και μικρότερες ποσότητες στη περιοχή της Θεσσαλονίκης και τα νησιά.

Από το σύνολο της καλλιεργούμενης έκτασης σε υψηλά θερμοκήπια υπολογίζεται ότι ένα ποσοστό περίπου 4 % εφαρμόζει υδροπονία με τάση για περαιτέρω αύξηση καθότι η πλειοψηφία των νέων, μεγάλης έκτασης (>10 στρ.) σύγχρονων θερμοκηπιακών μονάδων υιοθετεί την υδροπονία. Ωστόσο, η υδροπονία είναι πολύ λίγο διαδεδομένη στην Ελλάδα σε σχέση με τον υπόλοιπο κόσμο όπου η μορφή αυτή καλλιέργειας χρησιμοποιείται ευρέως εδώ και δεκαετίες με πολλαπλά οφέλη για τους καλλιεργητές και το περιβάλλον. Η χώρα μας λόγω της γεωγραφικής της θέσης και των ευνοϊκών κλιματικών συνθηκών ενδείκνυται για την ανάπτυξη της υδροπονίας. Η εξάπλωση της υδροπονίας στα θερμοκήπια σε συνδυασμό με σωστή διαχείριση θα καταστήσει τις θερμοκηπιακές καλλιέργειες ανταγωνιστικές σε ένα περιβάλλον με συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις ποιότητας.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της υδροπονίας σύμφωνα με τους Μαυρογιαννόπουλο (1994, 2007) και Olymrios (1999) είναι:

1. Η αύξηση της απόδοσης των παραγόμενων προϊόντων από 20 έως 50%, συγκριτικά με καλλιέργειες σε έδαφος, λόγω της βελτιστοποίησης του ριζικού περιβάλλοντος.
2. Η παραγωγή προϊόντων, υψηλής ποιότητας λόγω καλύτερης θρέψης των φυτών αφού τα φυτά λαμβάνουν θρεπτικά στοιχεία σε σωστές αναλογίες.
3. Η πρωίμιση της παραγωγής, λόγω των υψηλότερων μέσων θερμοκρασιών στον χώρο του ριζοστρώματος.
4. Το κόστος θέρμανσης είναι μειωμένο καθώς το ριζικό σύστημα έχει μικρότερο όγκο σε σχέση με το έδαφος και βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους με αποτέλεσμα να είναι ευκολότερη η θέρμανση του.
5. Η δυνατότητα φύτευσης νέας καλλιέργειας αμέσως μετά την απομάκρυνση της προηγούμενης.
6. Η παραγωγή προϊόντων με λιγότερα αγροχημικά αφού δεν είναι απαραίτητη η απολύμανση του υποστρώματος. δεν είναι απαραίτητες πρακτικές όπως η απολύμανση του υποστρώματος.
7. Επιτυγχάνεται εξοικονόμηση νερού και λιπασμάτων καθώς περιορίζονται οι απώλειες από επιφανειακές διαρροές και διείσδυση του νερού στο έδαφος ιδιαίτερα στα κλειστά συστήματα.
8. Ο καλύτερος έλεγχος της θρέψης των φυτών με δυνατότητα διόρθωσης σε περίπτωση απόκλισης.
9. Λιγότερα προβλήματα από ασθένειες του εδάφους, έντομα εδάφους και νηματώδης.
10. Απαλλαγή από την κατεργασία του εδάφους και την ζιζανιοκτονία και φύτευση με λιγότερη χειρωνακτική εργασία.
11. Η δυνατότητα καλλιέργειας φυτών σε προβληματικά εδάφη από φυσικής ή χημικής απόψεως ή ακόμα και σε περιοχές χωρίς έδαφος (βραχώδεις).
12. Η δυνατότητα καλλιέργειας σε περιοχές με νερό άρδευσης υψηλής αγωγιμότητας (1-1,5 ds/m) με ανοικτό υδροπονικό σύστημα.
13. Αποφυγή μόλυνσης των υπογείων υδροφορέων από την έκπλυση λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών ουσιών με την εφαρμογή κλειστών υδροπονικών συστημάτων.

Ωστόσο η υδροπονική καλλιέργεια παρουσιάζει και τα εξής μειονεκτήματα:

1. Το αρχικό κόστος εγκατάστασης ενός υδροπονικού συστήματος είναι υψηλότερο σε σχέση με καλλιέργεια στο έδαφος. Το πόσο υψηλότερο θα είναι εξαρτάται από το σύστημα που θα εφαρμοστεί. Ωστόσο ορισμένα υδροπονικά συστήματα (π.χ. NFT) έχουν χαμηλότερο λειτουργικό κόστος.
2. Η ανοχή σε καλλιεργητικά λάθη που αφορούν τη σύνθεση, το pH και την αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος είναι μικρότερη σε σχέση με το έδαφος το οποίο διαθέτει ρυθμιστική ικανότητα.
3. Τα κλειστά υδροπονικά συστήματα είναι πιο ευάλωτα σε καθολική μόλυνση από ασθένειες που μεταδίδονται μέσω του θρεπτικού διαλύματος, όπως φουζάριο, βερτιτσίλιο και πύθιο.
4. Ο καλλιεργητής που θα ασχοληθεί με την υδροπονική καλλιέργεια, ιδιαίτερα στα κλειστά συστήματα, θα πρέπει να έχει επιπλέον γνώσεις φυσιολογίας φυτών, στοιχειώδους χημείας και να είναι εξοικειωμένος με συστήματα αυτομάτου ελέγχου των θρεπτικών διαλυμάτων.
5. Με την πάροδο του χρόνου στα κλειστά συστήματα έχουμε συσσώρευση αλάτων στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα και είναι αναγκαία κατά χρονικά διαστήματα η χημική ανάλυση του διαλύματος ή η απόρριψή του.

Ανεξάρτητα από τα πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα της υδροπονίας όσον αφορά την ανάπτυξη των φυτών η υδροπονία κερδίζει συνεχώς έδαφος και για τους παρακάτω λόγους:

- Την κατάργηση της χρήσης του βρωμιούχου μεθυλίου ως κύριου χημικού απολυμαντικού του εδάφους και η έλλειψη υποκατάστατου με ανάλογη αποτελεσματικότητα.
- Την αξιοποίηση εγχώριων πρώτων υλών ή προϊόντων και την τυποποίησή τους σαν υποστρώματα υδροπονικών καλλιεργειών.
- Την εξέλιξη της τεχνολογίας στα θέματα μηχανολογικού εξοπλισμού και αυτοματισμών στα θερμοκήπια με μείωση του αρχικού κεφαλαίου εγκατάστασης
- Την βελτίωση της υφιστάμενης τεχνογνωσίας σε θέματα θρέψης των φυτών και διαχείρισης της άρδευσης με τη χρήση ευφυών συστημάτων.

Με τη χρήση κλειστών υδροπονικών συστημάτων για την καλλιέργεια κηπευτικών στα θερμοκήπια, αποφεύγεται η ρύπανση των υδροφορέων με νιτρικά και φωσφορικά άλατα προερχόμενα από τη λίπανση των καλλιεργειών, ενώ ταυτόχρονα γίνεται σημαντική εξοικονόμηση νερού και λιπασμάτων. Λόγω του ότι η ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος αυτή καθεαυτή δεν φαίνεται να περιορίζει τις αποδόσεις ή την ποιότητα των προϊόντων, υπάρχει μια στροφή των καλλιεργητών στα κλειστά υδροπονικά συστήματα για την παραγωγή κηπευτικών εκτός εποχής στα θερμοκήπια. Μια σημαντική παράμετρος η οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στα κλειστά υδροπονικά συστήματα είναι η συσσώρευση αλάτων στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα η οποία προέρχεται από τον υψηλότερο ρυθμό εισαγωγής των θρεπτικών στοιχείων σε σχέση με το ρυθμό απορρόφησής τους από τα φυτά. Η αναπλήρωση των θρεπτικών στοιχείων στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα για να είναι ακριβής θα πρέπει να βασίζεται σε μοντέλα απορρόφησης για κάθε θρεπτικό στοιχείο και καλλιέργεια ούτως ώστε να αποφεύγεται η αντικατάσταση του θρεπτικού διαλύματος λόγω υπερβολικής αύξησης ή μείωσης κάποιου στοιχείου στο διάλυμα. Παρόλο που είναι διαθέσιμα τέτοιου είδους μοντέλα (Savvas, 2002, Pardossi *et al.*, 2004, Silberbush *et al.*, 2005, Anastasiou, 2005) εντούτοις η εφαρμογή τους στα εμπορικά θερμοκήπια καθίσταται δύσκολη διότι βασίζονται σε μεγάλο αριθμό μεταβλητών, αρκετές από τις οποίες δεν μπορούν να παρακολουθούνται συνεχώς στη διάρκεια της καλλιέργειας. Επομένως, υπάρχει η ανάγκη δημιουργίας μοντέλων που να χρησιμοποιούν μικρό αριθμό μεταβλητών και εύκολα μετρήσιμων. Στην περίπτωση της θρεπτικής κατάστασης στο περιβάλλον των ριζών των φυτών, αυτό είναι δυνατό με την συσχέτιση της συγκέντρωσης των συσσωρευόμενων ιόντων με μια εύκολα μετρήσιμη μεταβλητή όπως είναι η αθροιστική κατανάλωση του εισερχόμενου στο σύστημα νερού. Μοντέλα βασιζόμενα στην παραπάνω μεταβλητή έχουν δημιουργηθεί για την αγγουριά όσον αφορά τη συσσώρευση ιόντων Na^+ και Cl^- , (Savvas *et al.*, 2005). Όσον αφορά τα ιχνοστοιχεία, έχει συσχετισθεί μόνο η συγκέντρωσή τους στο ριζικό περιβάλλον της αγγουριάς με την περιεκτικότητά τους στους φυτικούς ιστούς (Sonneveld and de Bes, 1984). Ωστόσο, δεδομένα που να σχετίζονται με την επίδραση υψηλών ή χαμηλών συγκεντρώσεων ιχνοστοιχείων στο ριζικό περιβάλλον με αγρονομικές και φυσιολογικές παραμέτρους της αγγουριάς σε

υδροπονική καλλιέργεια είναι ανεπαρκή στη διεθνή βιβλιογραφία. Από τα απαραίτητα ιχνοστοιχεία, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η μελέτη του μαγγανίου και του ψευδαργύρου διότι και τα δυο επηρεάζουν τη φωτοσύνθεση με αποτέλεσμα να έχουν παρόμοια αγρονομικά συμπτώματα ενώ σε πολλές περιπτώσεις υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ τους όσον αφορά την απορρόφησή τους από τα φυτά (Singh and Steenberg, 1974). Επίσης, τα όρια μεταξύ έλλειψης, επάρκειας και τοξικότητας Mn και Zn είναι σχετικά περιορισμένα, με αποτέλεσμα να είναι συχνές οι διαταραχές θρέψης από σφάλματα στη σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος, ιδιαίτερα στα κλειστά υδροπονικά συστήματα, όπου υπάρχει σταδιακή μεταβολή στη συγκέντρωση των ιχνοστοιχείων με την πάροδο του χρόνου (Bugbee, 2004)

Με βάση τα παραπάνω, οι επιμέρους στόχοι της παρούσης διατριβής είναι:

1. Η εκτίμηση των ανώτατων ορίων συγκέντρωσης Mn ή Zn στα φύλλα, πάνω από τα οποία είναι πιθανή η εμφάνιση ορατών συμπτωμάτων τοξικότητας μαγγανίου ή ψευδαργύρου στην αγγουριά.
2. Να διερευνηθεί κατά πόσο τα τοξικά επίπεδα Mn ή Zn μειώνουν την καθαρή φωτοσύνθεση και την παραγωγή βιομάζας.
3. Να διερευνηθεί ο ρυθμός συσσώρευσης των παραπάνω ιχνοστοιχείων στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα όταν εισέρχονται στο υδροπονικό σύστημα σε συγκεντρώσεις υψηλότερες από τις κανονικές.
4. Να διερευνηθεί η επίδραση της υψηλής συγκέντρωσης Mn ή/και Zn στην απορρόφηση των μακροστοιχείων και των υπόλοιπων ιχνοστοιχείων.
5. Η εκτίμηση των συγκεντρώσεων απορρόφησης Mn και Zn από την αγγουριά όταν καλλιεργείται σε ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα υπό μεσογειακές συνθήκες.
6. Η προσομοίωση των μεταβολών των συγκεντρώσεων μαγγανίου και ψευδαργύρου στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα σε κλειστά υδροπονικά συστήματα, χρησιμοποιώντας μοντέλα που βασίζονται στην αθροιστική κατανάλωση νερού.
7. Επαλήθευση (validation) των μοντέλων με δεδομένα ανεξάρτητου πειράματος.

ΜΕΡΟΣ Β. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1. Η υδροπονία σαν μέθοδος καλλιέργειας

Η ανάγκη τροποποίηση του περιβάλλοντος ανάπτυξης των φυτών με στόχο την αύξηση της παραγωγής και της ποιότητας των προϊόντων οδήγησε στην δημιουργία θερμοκηπίων όπου επιτυγχάνονται ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας, υγρασίας και φωτισμού όσον αφορά κυρίως το υπέργειο μέρος των φυτών. Στη δημιουργία τροποποιημένου περιβάλλοντος προκειμένου να δημιουργηθούν ιδανικές συνθήκες ανάπτυξης και του ριζικού συστήματος αποβλέπει η υδροπονική καλλιέργεια. Υδροπονία ή εκτός εδάφους καλλιέργεια καλείται η καλλιέργεια φυτών χωρίς τη χρήση εδάφους όπου η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος γίνεται εντός στερεών αδρανών υποστρωμάτων εμποτισμένων με τεχνητό θρεπτικό διάλυμα ή εντός θρεπτικού διαλύματος από το οποίο τα φυτά λαμβάνουν τις απαραίτητες για την ανάπτυξή τους ποσότητες νερού και θρεπτικών στοιχείων (Ravin, 2007). Έτσι η υδροπονία είναι μια σύγχρονη τεχνική καλλιέργειας όπου η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος γίνεται σε υποστρώματα ή κανάλια συνεχούς ροής θρεπτικού διαλύματος. Οι μέθοδοι ανάπτυξης των φυτών εκτός εδάφους εμπίπτουν σε δύο γενικές κατηγορίες (Σάββας, 2012):

A. Υδροκαλλιέργειες ή καλλιέργειες σε θρεπτικό διάλυμα (water culture), όπου δεν γίνεται χρήση υποστρώματος και οι ρίζες των φυτών αναπτύσσονται σε στάσιμο ή ρέον θρεπτικό διάλυμα το οποίο ανακυκλώνεται (π.χ. τεχνική λεπτής στοιβάδας θρεπτικού διαλύματος) και

B. Καλλιέργειες σε υπόστρωμα (aggregate culture), όπου μέσο ανάπτυξης του ριζικού συστήματος είναι κάποιο υπόστρωμα (π.χ. πετροβάμβακας, περλίτης, ελαφρόπετρα, άμμος, χαλίκια κ.ά.) και το θρεπτικό διάλυμα παρέχεται στα φυτά από το σύστημα άρδευσης μέσω του υποστρώματος. Το πλεονάζον θρεπτικό διάλυμα που δεν μπορεί να συγκρατηθεί από το υπόστρωμα είτε απορρίπτεται (ανοικτό σύστημα) είτε ανακυκλώνεται (κλειστό σύστημα).

2. Θρεπτικά διαλύματα στην υδροπονία

2.1. Σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος

Προϋπόθεση για την ανάπτυξη των φυτών σε μια υδροπονική καλλιέργεια είναι η χρήση θρεπτικών διαλυμάτων με κατάλληλη σύνθεση που θα τροφοδοτούν τα

φυτά με τα απαραίτητα στοιχεία. Θρεπτικά διαλύματα για την ανάπτυξη των φυτών χρησιμοποιήθηκαν από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα, όταν η αναγκαιότητα των ανόργανων στοιχείων για την ανάπτυξη των φυτών άρχισε να γίνεται γνωστή από τους Justus von Liebig. Αρχικά τα θρεπτικά διαλύματα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των φυτών στις λεγόμενες «υδατικές καλλιέργειες» είχαν απλή σύνθεση και περιείχαν τα κύρια θρεπτικά στοιχεία από άλατα όπως KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, KHPO_4 , MgSO_4 και λίγο σίδηρο (Hoagland and Arnon, 1950). Η σχετική επιτυχία αυτών των θρεπτικών διαλυμάτων οφειλόταν στην άγνωστη μέχρι τότε συμβολή των ιχνοστοιχείων που υπήρχαν ως ακαθαρσίες στα χρησιμοποιούμενα άλατα. Η αναγκαιότητα των ιχνοστοιχείων έγινε γνωστή κυρίως στις αρχές του 20^{ου} αιώνα όταν βελτιώθηκε η καθαρότητα των λιπασμάτων. Η πρώτη συστηματική περιγραφή του τρόπου παρασκευής των θρεπτικών διαλυμάτων δόθηκε από τους Hoagland και Arnon το 1950 και από τότε πολλές δημοσιεύσεις με πειράματα όπου χρησιμοποιούνται θρεπτικά διαλύματα αναφέρονται στους παραπάνω ερευνητές. Ωστόσο, η χρήση των ανωτέρω θρεπτικών διαλυμάτων και των καλούμενων «γενικής χρήσεως» που έχουν προταθεί από τον Steiner, (1961 και 1984) είναι κατάλληλα μόνο για μικρής κλίμακας πειράματα και με την προϋπόθεση ότι το θρεπτικό διάλυμα θα αντικαθίσταται κατά τακτά χρονικά διαστήματα. (Sonneveld and Voogt, 2009)

Για τον καθορισμό της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος για μια συγκεκριμένη καλλιέργεια θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε η συνολική συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων, οι μεταξύ τους αναλογίες και το pH του διαλύματος να είναι κατάλληλες σε σχέση με το είδος του καλλιεργούμενου φυτού, το στάδιο ανάπτυξής του και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Επίσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η σύσταση του νερού άρδευσης σε ανόργανα ιόντα. Το θρεπτικό διάλυμα θα πρέπει να είναι πλήρες, δηλαδή να περιέχει όλα τα απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών θρεπτικά στοιχεία, εκτός από τον άνθρακα που προσλαμβάνεται από την ατμόσφαιρα ως CO_2 . Το υδρογόνο και το οξυγόνο είναι συστατικά του νερού ενώ οξυγόνο προσλαμβάνονται και από τον ατμοσφαιρικό αέρα μέσω της αναπνοής. Το χλώριο, το οποίο είναι απαραίτητο στοιχείο, περιέχεται σχεδόν πάντοτε σε επαρκείς ποσότητες ως χλωριούχο ανιόν στο νερό άρδευσης αλλά και στις προσμίξεις των λιπασμάτων. Όλα τα υπόλοιπα χημικά στοιχεία τα μακροστοιχεία N, P, S, K, Ca και τα ιχνοστοιχεία Fe, Mn, Zn, Cu, B και Mo θα πρέπει να προστεθούν στο θρεπτικό

διάλυμα (Σάββας, 2012). Το Ni παρόλο που θεωρείται απαραίτητο δεν προστίθενται διότι δεν έχουν προσδιοριστεί τα όρια επάρκειας και τοξικότητας και συνήθως περιέχεται στις προσμίξεις άλλων λιπασμάτων. Το Na και το Co είναι αναγκαία για μερικά φυτά και ωφέλιμα για άλλα. Το Na υπάρχει σχεδόν πάντοτε στο νερό άρδευσης ενώ το Co προέρχεται κυρίως από προσμίξεις άλλων λιπασμάτων. Το Si έχει προσδιοριστεί ως ωφέλιμο για ορισμένα φυτά, κυρίως τα κολοκυνθοειδή και το τριαντάφυλλο, χωρίς να θεωρείται απαραίτητο για την ανάπτυξη τους (Sonneveld and Voogt, 2009).

Τα θρεπτικά στοιχεία προστίθενται στο διάλυμα υπό μορφή ανόργανων αλάτων ή οξέων τα οποία θα πρέπει να είναι πλήρως διαλυτά και να μην περιέχουν τοξικά συστατικά. Ο σίδηρος προστίθεται κατά κανόνα σε χηλική μορφή (οργανικά σύμπλοκα) διότι τα ανόργανα άλατα του Fe στις συνηθισμένες τιμές pH στα θρεπτικά διαλύματα σχηματίζουν αδιάλυτο υδροξείδιο του σιδήρου ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) (Jacobson, 1951).

Οι μέθοδοι για την παρασκευή θρεπτικών διαλυμάτων για διάφορες καλλιέργειες, βασίζονται κυρίως σε κάποια τιμή στόχο για το pH, την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και κυρίως τις αναλογίες των μακροστοιχείων μεταξύ τους. Στην διεθνή βιβλιογραφία γίνεται αναφορά για αυτές τις μεθόδους από τους Steiner (1961, 1984), Savvas and Adamidis (1999), Savvas (2001), Adams (2002), Sonneveld (2002) και Jones (2005).

2.2. Η ποιότητα του νερού άρδευσης

Το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή των θρεπτικών διαλυμάτων στην υδροπονία συνήθως προέρχεται από γεωτρήσεις, πηγάδια, φράγματα ή από φυσικές πηγές και περιέχει σημαντικές ποσότητες ανόργανων ιόντων. Από τα μακροστοιχεία συνήθως περιέχει ασβέστιο, μαγνήσιο, θείο (SO_4^{2-}) και άζωτο (NO_3^-), ενώ από τα ιχνοστοιχεία μπορεί να υπάρχουν χλώριο, σίδηρος, μαγγάνιο, ψευδάργυρος, χαλκός και βόριο. (Σάββας, 2012). Η χημική σύνθεση του νερού άρδευσης είναι σημαντική για την προετοιμασία του θρεπτικού διαλύματος και επηρεάζει την συσσώρευση αλάτων στο περιβάλλον των ριζών. Το ιδανικό θα ήταν οι συγκεντρώσεις των ιόντων στο νερό άρδευσης να είναι ίσες ή χαμηλότερες από τις συγκεντρώσεις απορρόφησης των ιόντων από τα φυτά. Σε αυτή την περίπτωση οι απορροές από το υδροπονικό σύστημα θα μπορούσαν να επαναχρησιμοποιηθούν

χωρίς να έχουμε απώλειες σε θρεπτικά στοιχεία και νερό. Για την παρασκευή του ΘΔ οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στο αρχικό νερό άρδευσης θα πρέπει να αφαιρεθούν από τις συγκεντρώσεις των στοιχείων που θα πρέπει να προστεθούν στο σύστημα για την ομαλή ανάπτυξη των φυτών. Όταν η συγκέντρωση ενός ιόντος στο νερό άρδευσης που χρησιμοποιείται για την Παρασκευή ενός θρεπτικού διαλύματος είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη συγκέντρωση απορρόφησης, τότε έχουμε συσσώρευση του ιόντος αυτού στο ριζικό περιβάλλον. Σε αυτή την περίπτωση οι απορροές δεν μπορούν εξ ολοκλήρου να επαναχρησιμοποιηθούν και θα πρέπει ένα μέρος ή εξ ολοκλήρου να απορρίπτεται (Sonneveld, 2002). Η μέγιστη αποδεκτή συγκέντρωση ενός ιόντος πέρα από την οποία το θρεπτικό διάλυμα θα πρέπει να απορρίπτεται εξαρτάται από το είδος του φυτού και τις συνθήκες ανάπτυξης (Sonneveld, 2000).

2.3. Παρασκευή των θρεπτικών διαλυμάτων

Για την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος (ΘΔ) που θα παρασχεθεί στα φυτά αρχικά δημιουργούνται πυκνά διαλύματα (μητρικά διαλύματα) με τα αρχικά λιπάσματα τα οποία τοποθετούνται σε δοχεία των 100-5000 λίτρων. Το διάλυμα που θα παρασχεθεί στα φυτά (αραιό διάλυμα) προκύπτει από αραιώση των πυκνών διαλυμάτων με νερό, συνήθως σε αναλογία 1/100 – 1/200 ανάλογα με την πυκνότητα των μητρικών διαλυμάτων σε σχέση με το αραιό τελικό διάλυμα. Αναγκαίο είναι να χρησιμοποιηθούν τουλάχιστον δύο δοχεία πυκνών διαλυμάτων διότι το νιτρικό ασβέστιο σε υψηλές συγκεντρώσεις δημιουργεί αδιάλυτα άλατα με θειικά και φωσφορικά λιπάσματα. Στο πρώτο δοχείο (Α) προστίθεται οπωσδήποτε το νιτρικό ασβέστιο, νιτρικό αμμώνιο, ένα μέρος του νιτρικού καλίου και ο χηλικός σίδηρος. Στο δεύτερο (Β) προστίθενται όλα τα θειικά και φωσφορικά λιπάσματα (θειικό κάλιο, θειικό μαγνήσιο, φωσφορικό μονοαμμώνιο, φωσφορικό μονοκάλιο, φωσφορικό οξύ) και τα ιχνοστοιχεία εκτός του χηλικού σιδήρου. Το νιτρικό μαγνήσιο μπορεί να προστεθεί και στα δύο δοχεία ενώ αν δεν υπάρχει και τρίτο δοχείο (Γ) με νιτρικό οξύ για τη ρύθμιση του pH αυτό μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε από τα δύο δοχεία. Σε σπάνιες περιπτώσεις και μόνο σε συστήματα με ανακύκλωση του ΘΔ είναι αναγκαίο και ένα τέταρτο δοχείο με KHCO_3 ή KOH για την ανύψωση του pH. (Μαυρογιαννόπουλος, 2007, Σάββας, 2012).

2.4. Χαρακτηριστικά των θρεπτικών διαλυμάτων

1. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα μετράει την ικανότητα του θρεπτικού διαλύματος να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Μονάδα μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας η οποία έχει καθιερωθεί διεθνώς είναι το dS/m ή mS/cm (1 dS/m =1 mS/cm) και σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των ιόντων που περιέχονται στο διάλυμα (Gray, 2004). Ωστόσο, τα φυσικά νερά και τα θρεπτικά διαλύματα περιέχουν περισσότερα του ενός άλατα των οποίων η συγκέντρωση δεν συνδέεται με την ίδια ακριβώς σχέση με την ηλεκτρική αγωγιμότητα του διαλύματος. Εντούτοις, οι διαφορές αυτές μεταξύ των συνηθισμένων αλάτων που περιέχονται στα φυσικά νερά είναι μικρές και η συνολική τους συγκέντρωση (σε meq/l) μπορεί να εκτιμηθεί με αποδεκτή ακρίβεια μέσω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με τη βοήθεια μίας εμπειρικής σχέσης που έχει υπολογισθεί πειραματικά από τους Savvas and Adamidis (1999):

$$C = 9,819E - 1,462$$

Παρεμφερείς τιμές C με αυτές που υπολογίζονται μέσω της σχέσης των Savvas and Adamidis (1999) δίνει και μια άλλη εμπειρική συνάρτηση ($C = 10,52E^{-2}$) η οποία προκύπτει από μια σχέση που έχουν προτείνει οι Sonneveld *et al.* (1999) για την σύνδεση της E με την C (Σάββας, 2012).

2. Το pH των θρεπτικών διαλυμάτων

Το pH του θρεπτικού διαλύματος επηρεάζει σημαντικά την διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων στο φυτό. Οι υδροπονικές καλλιέργειες χαρακτηρίζονται από μικρή ρυθμιστική ικανότητα σε σχέση με το έδαφος και οι αλλαγές στο pH του θρεπτικού διαλύματος επηρεάζουν άμεσα την διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων. Όταν το pH είναι υψηλότερο ή χαμηλότερο από κάποιες τιμές που θεωρούνται ως ανώτερα ή κατώτερα επιθυμητά όρια, πολλά θρεπτικά στοιχεία καθίστανται δυσδιάλυτα, και επομένως μη διαθέσιμα για τα φυτά, ενώ άλλα απορροφούνται ταχύτερα (π.χ. Mn, Al). Οι επιθυμητές τιμές pH κυμαίνονται μεταξύ 5,5 και 6,3, ενώ τα περισσότερα είδη καλλιεργούμενων φυτών αναπτύσσονται χωρίς

πρόβλημα σε τιμές μεταξύ 5,0 και 7,0. Τιμές μεγαλύτερες από 7,0 είναι βλαπτικές διότι οδηγούν σε μειωμένη διαθεσιμότητα των μεταλλικών ιχνοστοιχείων (Fe, Mn, Zn, Cu) και του φωσφόρου καθώς καθίστανται δυσδιάλυτα ενώ σε τιμές υψηλότερες του 8 δημιουργούνται σοβαρά προβλήματα λόγω καθίζησης των ανθρακικών αλάτων Ca και Mg (Σάββας, 2012). Αντίστοιχα, σε τιμές κάτω από 5 κάποια θρεπτικά στοιχεία όπως το Mn και ο Zn καθώς και μη θρεπτικά χημικά στοιχεία (π.χ. Al), καθίστανται πολύ ευδιάλυτα με συνέπεια να αυξάνεται η διαθεσιμότητά τους σε τοξικά επίπεδα (Sonneveld, 2002).

Η απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά επηρεάζει το pH του θρεπτικού διαλύματος στην περιοχή των ριζών λόγω των διαφορών μεταξύ των θρεπτικών στοιχείων στους μηχανισμούς και τους ρυθμούς πρόσληψής τους από τα φυτά. Όταν ο λόγος της συνολικής απορρόφησης ανιόντων προς κατιόντα υπερβαίνει τη μονάδα σε χιλιοστοισοδύναμα, τα φυτά εισάγουν περισσότερο αρνητικό φορτίο θρεπτικών ιόντων στα κύτταρα σε σχέση με το θετικό φορτίο. Για να εξισορροπηθεί αυτή η διαφορά ηλεκτροχημικού δυναμικού, τα κύτταρα απελευθερώνουν HCO_3^- ή OH^- με αποτέλεσμα την αύξηση του pH στο περιβάλλον των ριζών. Η απορρόφηση των ανιόντων είναι μεγαλύτερη όταν τα φυτά είναι κάτω από ευνοϊκές συνθήκες περιβάλλοντος για ανάπτυξη (υψηλή ηλιοφάνεια και κανονική θερμοκρασία) διότι απορροφούν με έντονο ρυθμό NO_3^- . Το αντίθετο συμβαίνει όταν επικρατούν συνθήκες φτωχού φωτισμού και η ανάπτυξη είναι περιορισμένη. Κατά κανόνα όμως, το περιβάλλον στα θερμοκήπια ρυθμίζεται, ώστε να έχουμε ευνοϊκές συνθήκες, επομένως το κατά κανόνα το pH αυξάνεται. Για την καλύτερη εξισορρόπηση του pH στο περιβάλλον των ριζών χρησιμοποιείται και αμμωνιακό άζωτο (NH_4^+) σε ένα ποσοστό 5 -15% του συνολικού αζώτου, ώστε να μειωθεί η απορρόφηση NO_3^- και να αυξηθεί η απορρόφηση NH_4^+ με συνέπεια την μείωση της ολικής απορρόφησης ανιόντων και την ισόποση αύξηση της ολικής απορρόφησης κατιόντων χωρίς μεταβολή της συνολικής απορρόφησης αζώτου. Η χρήση αμμωνιακού αζώτου δεν ακυρώνει την ανάγκη ρύθμισης του pH στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας, η οποία γίνεται με αυτόματη έγχυση νιτρικού ή φωσφορικού οξέος σε αυτό κατά την παρασκευή του (Σάββας, 2012).

3. Η απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων και η κίνησή τους εντός των φυτών

Η κύρια πηγή θρεπτικών στοιχείων για τα φυτά είναι το μέσο ανάπτυξης του ριζικού συστήματος, δηλαδή, το θρεπτικό διάλυμα, το έδαφος ή το υπόστρωμα ανάπτυξης. Γενικά, τα φυτά εύκολα απορροφούν τα θρεπτικά στοιχεία που είναι διαλυμένα στο εδαφικό διάλυμα ή στο θρεπτικό διάλυμα στην περίπτωση της υδροπονίας όταν αυτά είναι σε μορφή ιόντων (Kabata-Pendias and Pendias, 2001).

Κατά κανόνα, υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των συγκεντρώσεων που έχουν τα ανόργανα στοιχεία στο έδαφος και των θρεπτικών απαιτήσεων των φυτών. Το έδαφος μπορεί να περιέχει σε μεγάλες συγκεντρώσεις ανόργανα στοιχεία τα οποία δεν είναι αναγκαία για την ανάπτυξη των φυτών. Γι αυτό το λόγο, στην πορεία της εξέλιξης, ο μηχανισμός με τον οποίο τα φυτά απορροφούν τα θρεπτικά στοιχεία έχει καταστεί εκλεκτικός (Marschner, 1995). Από τα αποτελέσματα πολλών μελετών έχει αποδειχθεί ότι η απορρόφηση ιόντων από τα φυτά χαρακτηρίζεται από τα παρακάτω (Mengel and Kirkby, 2001):

1. **Εκλεκτικότητα.** Ορισμένα θρεπτικά στοιχεία προσλαμβάνονται κατά προτίμηση ενώ άλλα θρεπτικά στοιχεία ή μη θρεπτικά ιόντα δεν προτιμούνται ή σχεδόν αποκλείονται.
2. **Συσώρευση.** Η συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων στους φυτικούς ιστούς μπορεί να είναι πολύ υψηλότερη σε σχέση με το εξωτερικό διάλυμα.
3. Τα **μοντέλα απορρόφησης** των θρεπτικών στοιχείων διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των φυτικών ειδών.

Η απορρόφηση ιόντων από τις ρίζες γίνεται κυρίως από την περιοχή της ρίζας όπου υπάρχουν ριζικά τριχίδια. Από τη στιγμή που ένα ιόν θα φτάσει στην επιφάνεια της ρίζας δύναται να εισαχθεί είτε συμπλαστικά, δηλαδή να περάσει την πλασματική μεμβράνη των επιδερμικών κυττάρων της ρίζας είτε αποπλαστικά, δηλαδή με διάχυση μεταξύ των επιδερμικών κυττάρων μέσω των κυτταρικών τους τοιχωμάτων. Από τον αποπλαστικό χώρο του φλοιού της ρίζας ένα ιόν μπορεί είτε να περάσει την πλασματική μεμβράνη των κυττάρων του φλοιού και να εισαχθεί στο εσωτερικό των κυττάρων (συμπλαστική κίνηση) είτε με ακτινική διάχυση να φτάσει μέχρι την ενδοδερμίδα. Σε όλες τις περιπτώσεις το ιόν θα πρέπει να εισαχθεί στον συμπλασματικό χώρο των κυττάρων για να μπορέσει να φτάσει στον ξυλώδη ηθμό καθώς υπάρχει η κασπαρική ταινία η οποία εμποδίζει την απευθείας διάχυση των

ιόντων στον ξυλώδη ηθμό μέσω του αποπλάστη. Συνεπώς, τα ιόντα των ΘΣ εξαναγκάζονται να εισέλθουν στο κυτόπλασμα των ενδοδερμικών κυττάρων, ώστε να προχωρήσουν προς τον κεντρικό κύλινδρο της ρίζας. Μετά την είσοδο στο κυτόπλασμα των κυττάρων της ενδοδερμίδας, η περαιτέρω μετακίνηση των ιόντων είναι πλέον συμπλασμική με τη βοήθεια του ενδοπλασμικού δικτύου το οποίο τους επιτρέπει την μετακίνηση από κύτταρο σε κύτταρο. Έτσι τα μετακινούμενα ιόντα δεν είναι αναγκαίο να διαπεράσουν ξανά το πλασμαμάλημμα για να εξέλθουν από το ένα κύτταρο και να εισέλθουν ξανά στο επόμενο ώστε να μετακινηθούν συμπλασμικά μέχρι να φθάσουν στα αγγεία του ξύλου και να εισέλθουν σε αυτά. Η μεταφορά των θρεπτικών στοιχείων από τον πρωτοπλάστη των κυττάρων του ξυλώδους παρεγχύματος στα αγγεία του ξύλου συνιστά διακοπή της συμπλασμικής κίνησης και έξοδο στον αποπλάστη (Marschner, 1995, Taiz and Zeiger, 2002).

1. Αποπλασμική διάχυση.

Η μετακίνηση ουσιών χαμηλού μοριακού βάρους όπως είναι τα ιόντα, τα οργανικά οξέα, τα αμινοξέα και τα σάκχαρα από το εξωτερικό διάλυμα στα κυτταρικά τοιχώματα ή στον ελεύθερο χώρο μεταξύ των κυττάρων είναι μια μη μεταβολική ή παθητική διαδικασία η οποία γίνεται με διάχυση ή μαζική ροή. Ωστόσο, τα κυτταρικά τοιχώματα μπορούν να αλληλεπιδρούν με τις ουσίες αυτές και μπορεί να περιορίζουν ή να διευκολύνουν την μετακίνησή τους στις θέσεις απορρόφησης της κυτταρικής μεμβράνης των ριζικών κυττάρων. Τα κυτταρικά τοιχώματα έχουν πόρους διαμέτρου μικρότερης από 5 nm με αποτέλεσμα να επιτρέπουν την διέλευση διαλυμένων ουσιών μικρού μοριακού βάρους όπως είναι τα ανόργανα θρεπτικά στοιχεία και οι χαμηλού μοριακού βάρους οργανικές ουσίες (χηλικές ενώσεις μετάλλων, φουλβικά οξέα και τοξίνες) στον ελεύθερο χώρο μεταξύ των κυττάρων ενώ εμποδίζεται η διέλευση ιών και παθογόνων των οποίων η διάμετρος είναι μεγάλη σε σχέση με τη διάμετρο των πόρων. Στον αποπλαστικό χώρο των ριζικών κυττάρων υπάρχουν αρνητικά φορτισμένες καρβοξυλικές ρίζες με τις οποίες γίνεται ανταλλαγή κατιόντων. Έτσι, κατιόντα από το εξωτερικό διάλυμα συσσωρεύονται με μη μεταβολικό τρόπο στον ελεύθερο χώρο ενώ τα ανιόντα απωθούνται (Marschner, 1995). Ο αριθμός των θέσεων ανταλλαγής κατιόντων (ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων CEC) στα κυτταρικά τοιχώματα διαφέρει σημαντικά μεταξύ των φυτικών ειδών με τα δικοτυλήδονα να

έχουν πολύ περισσότερες θέσεις σε σχέση με τα μονοκοτυλήδονα. Επίσης η πτώση του pH μειώνει την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων. (Allan and Jarrell, 1989).

II. Ενεργητική απορρόφηση

Παρότι υπάρχει μια επιλεκτικότητα των κυτταρικών τοιχωμάτων όσον αφορά την δέσμευση κατιόντων, οι κύριες θέσεις από τις οποίες γίνεται επιλογή των ιόντων και των ουσιών που θα απορροφηθούν είναι στην πλασματική μεμβράνη των κυττάρων. Η κυτταρική μεμβράνη είναι ένα εμπόδιο ενάντια στη διάχυση των ουσιών από τον αποπλάστη στο κυτόπλασμα και αντιστρόφως. Επίσης, είναι η κύρια θέση ενεργής μεταφοράς και προς τις δύο κατευθύνσεις. Άλλο ένα εμπόδιο στην διάχυση είναι το τονοπλάστης που περιβάλλει το χυμοτόπιο. Στα περισσότερα φυτικά κύτταρα το χυμοτόπιο καταλαμβάνει περισσότερο από το 80-90 % του όγκου του κυττάρου και είναι η αποθήκη των ιόντων και άλλων ουσιών. Η ικανότητα αυτών των βιολογικών μεμβρανών να μεταφέρουν ουσίες σχετίζεται με την χημική τους σύνθεση και την μοριακή τους δομή (Marschner, 1995). Η μεταφορά των ιόντων ή ουσιών διαμέσου των μεμβρανών δεν είναι αναγκαστικά μια διαδικασία η οποία απαιτεί κατανάλωση ενέργειας. Ουσίες που είναι σε υψηλότερη συγκέντρωση στην μια πλευρά της μεμβράνης μπορεί να μεταφερθούν στην άλλη με διάχυση από την υψηλότερη προς τη χαμηλότερη συγκέντρωση. Αυτή η μεταφορά προς τη χαμηλότερη συγκέντρωση είναι, σε θερμοδυναμική βάση, παθητική και γίνεται με τη βοήθεια μεταφορέων ή διαμέσου υδατικών πόρων (Clarkson, 1977). Αντίθετα, η μεταφορά προς υψηλότερη συγκέντρωση συνδέεται άμεσα ή έμμεσα με κάποιο μηχανισμό κατανάλωσης ενέργειας.

III. Κίνηση εντός των φυτών

Η μετακίνηση του νερού, των ανόργανων στοιχείων και των χαμηλού μοριακού βάρους οργανικών ουσιών σε μεγάλες αποστάσεις εντός του φυτού λαμβάνει χώρα στο ξυλώδες και το φλοιώδες αγγειακό σύστημα των φυτών. Η μεταφορά από τις ρίζες στους βλαστούς συμβαίνει κυρίως μέσω των αγγείων που σχηματίζουν τα νεκρά κύτταρα του ξύλου, οφείλεται στην διαφορά υδατικού δυναμικού μεταξύ φύλλων και ρίζας και γι αυτό το λόγο είναι πάντοτε ανοδική. Αντίθετα με τα ξυλώδη αγγεία στο φλοιό η μεταφορά γίνεται μέσω των ζωντανών κυττάρων του φλοιού και μπορεί να

γίνει και προς τις δύο κατευθύνσεις (προς τα πάνω ή προς τα κάτω). Η κατεύθυνση της κίνησης καθορίζεται από τις θρεπτικές ανάγκες των οργάνων ή των ιστών του φυτού (Marschner, 1995).

4. Τα ιχνοστοιχεία σαν απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία

Σαν απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία, ορίζονται τα χημικά στοιχεία τα οποία χωρίς την παρουσία τους τα φυτά δεν μπορούν να ολοκληρώσουν τον βιολογικό τους κύκλο, δεν μπορούν να αντικατασταθούν από άλλα και εμπλέκονται άμεσα στον μεταβολισμό των φυτών (Arnon and Stout, 1939). Ανάλογα με την απαιτούμενη ποσότητα που χρειάζονται τα φυτά τα θρεπτικά στοιχεία χωρίζονται σε μακροστοιχεία και μικροστοιχεία ή ιχνοστοιχεία. Τα μακροστοιχεία απαιτούνται σε μεγαλύτερες ποσότητες από τα φυτά σε σύγκριση με τα ιχνοστοιχεία όπως υποδηλώνει και η ονομασία τους. Με βάση τον παραπάνω ορισμό τα στοιχεία που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών είναι 16. Αυτά περιλαμβάνουν τα μακροστοιχεία άνθρακα (C), υδρογόνο (H), οξυγόνο (O), άζωτο (N), φώσφορο (P), κάλιο (K), ασβέστιο (Ca), μαγνήσιο (Mg), και θείο (S), ενώ από τα ιχνοστοιχεία τον σίδηρο (Fe), το μαγγάνιο (Mn), το χαλκό (Cu), τον ψευδάργυρο (Zn), το μολυβδαίνιο (Mo), το βόριο (B), και το χλώριο (Cl) το οποίο αν και συναντάται σε σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις στα φυτά εντάσσεται στα ιχνοστοιχεία. Εκτός από αυτά τα στοιχεία υπάρχουν ενδείξεις ότι και το νικέλιο (Ni) είναι απαραίτητο για ορισμένα φυτά (Eskew *et al.*, 1983, Brown *et al.*, 1987).

Εκτός από τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία, υπάρχουν και ανόργανα στοιχεία τα οποία αποκαθιστούν τοξικές επιδράσεις άλλων στοιχείων ή απλά αντικαθιστούν ανόργανα στοιχεία σε μερικές λιγότερο εξειδικευμένες λειτουργίες, όπως είναι η ωσμωτική πίεση, τα οποία χαρακτηρίζονται ως ωφέλιμα στοιχεία (Marschner, 1995). Σε αυτά εντάσσονται το νάτριο (Na), το πυρίτιο (Si), το κοβάλτιο (Co), και το βανάδιο (V). Η αναγκαιότητα του Na για τα φυτά με C₄ φωτοσυνθετικό μηχανισμό αναφέρεται από τον Brownell, (1968) ενώ θεωρείται απαραίτητο για άριστη ανάπτυξη στο σέλινο, το σπανάκι, το ζαχαρότευτλο, το παντζάρι και το γογγύλι (Lehr, 1953). Το πυρίτιο είναι το δεύτερο σε αφθονία στοιχείο στο έδαφος αλλά δεν θεωρείται απαραίτητο για τα φυτά σύμφωνα με τα κριτήρια των Arnon and Stout. Υπάρχουν όμως ισχυρές ενδείξεις ότι το Si έχει ωφέλιμες επιδράσεις στην ανάπτυξη των φυτών κάτω από συνθήκες

βιοτικής ή αβιοτικής καταπόνησης (Rogalla and Rmheld, 2002, Heckman *et al.*, 2003). Το κοβάλτιο ενώ είναι αναγκαίο για την δέσμευση του ατμοσφαιρικού αζώτου από τα αζωτοβακτήρια, τα ριζόβια των ψυχανθών και τα κυανοβακτήρια, δεν είναι απαραίτητο για τα ανώτερα φυτά (Marschner, 1995). Το βανάδιο είναι απαραίτητο μόνο για μερικούς μικροοργανισμούς (Nicholas, 1961).

Πίνακας 1. Μέσες συγκεντρώσεις ανόργανων στοιχείων σε ξηρούς φυτικούς ιστούς που είναι επαρκείς για ικανοποιητική ανάπτυξη (ταξινόμηση με βάση τον σχετικό αριθμό ατόμων) *

Ανόργανο στοιχείο	Συντομο-γραφία	$\mu\text{mol g}^{-1}$ Ξηρού Βάρους.	mg kg^{-1} (ppm)	%	Σχετικός αριθμός ατόμων
Μολυβδαίνιο	Mo	0,001	0,1		1
Νικέλιο	Ni	~0,001	~0,1		1
Χαλκός	Cu	0,10	6≈		100
Ψευδάργυρος	Zn	0,30	20		300
Μαγγάνιο	Mn	1,0	50		1 000
Σίδηρος	Fe	2,0	100		2 000
Βόριο	B	2,0	20		2 000
Χλώριο	Cl	3,0	100		3 000
Θείο	S	30		0,1	30 000
Φώσφορος	P	60		0,2	60 000
Μαγνήσιο	Mg	80		0,2	80 000
Ασβέστιο	Ca	125		0,5	125 000
Κάλιο	K	250		1	250 000
Άζωτο	N	1000		1,5	1 000 000

*Από Marschner, 1995

Με την συνεχή βελτίωση των αναλυτικών τεχνικών και ειδικότερα την παραγωγή χημικών ουσιών υψηλής καθαρότητας ο αριθμός των ανόργανων στοιχείων που θεωρούνται απαραίτητα μπορεί να αυξηθεί στο μέλλον

περιλαμβάνοντας στοιχεία τα οποία είναι αναγκαία για τα φυτά σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις. Τα περισσότερα μικροστοιχεία είναι κυρίως συστατικά ενζύμων και για αυτό το λόγο είναι αναγκαία σε μικρές ποσότητες σε αντίθεση με τα μακροστοιχεία που είναι είτε συστατικά οργανικών ουσιών (πρωτεΐνες, νουκλεϊνικά οξέα) ή ενεργούν ως ωσμωτικά. Οι διαφορές όσον αφορά τον ρόλο κάθε ανόργανου στοιχείου αντανακλώνται και στις μέσες συγκεντρώσεις στους φυτικούς ιστούς που αυτά είναι επαρκή για κανονική ανάπτυξη (Πίνακας 1).

5. Η απορρόφηση του μαγγανίου και του ψευδαργύρου και ο φυσιολογικός τους ρόλος στον μεταβολισμό των φυτών

5.1 Το Μαγγάνιο

Το μαγγάνιο βρίσκεται στο μέσο της πρώτης σειράς των στοιχείων μετάπτωσης και στη φύση υπάρχει σε αρκετές οξειδωτικές καταστάσεις. Στα φυτά συνηθισμένες οξειδωτικές καταστάσεις είναι Mn^{2+} , Mn^{3+} , Mn^{4+} , Mn^{5+} με κυρίαρχη την Mn^{2+} . Η τελευταία εύκολα οξειδώνεται στη λιγότερο σταθερή μορφή Mn^{3+} . Με την μείωση του pH η ποσότητα του ανταλλάξιμου μαγγανίου (Mn^{2+}) στο εδαφικό διάλυμα αυξάνει. Αυτή η μορφή μαγγανίου είναι διαθέσιμη στα φυτά και εύκολα μπορεί να εισέλθει στα κύτταρα της ρίζας και να μετακινηθεί στους βλαστούς όπου τελικά συσσωρεύεται (Marschner, 1995). Αντίθετα, άλλες μορφές που κυριαρχούν σε υψηλότερες τιμές pH, όπως Mn^{3+} , Mn^{4+} δεν είναι διαθέσιμες και δεν συσσωρεύονται στα φυτά (Rengel, 2000). Έτσι, τα φυτά απορροφούν το μαγγάνιο με τη δισθενή μορφή Mn^{2+} . Η πρόσληψη του μαγγανίου από τις ρίζες γίνεται σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση είναι γρήγορη, αντιστρέψιμη, μη μεταβολική με τα Mn^{2+} και Ca^{2+} ή άλλα ιόντα να ανταλλάσσονται ελεύθερα στη ριζόσφαιρα. Σε αυτή τη φάση το Mn^{2+} απορροφάται από τα αρνητικά φορτισμένα κυτταρικά τοιχώματα στον αποπλαστικό χώρο των ριζών (Humphries *et al.*, 2007). Η πόλωση της κυτταρικής μεμβράνης λόγω αποβολής ιόντων υδρογόνου (H^+) προκαλεί οξύνιση του εξωτερικού διαλύματος η οποία οδηγεί σε αυξημένη απορρόφηση Mn^{2+} . Η επαναφορά H^+ στο κυτόπλασμα μειώνει την πόλωση της μεμβράνης και παρεμποδίζει την πρόσληψη Mn (Yan *et al.*, 1992).

Η δεύτερη φάση, που αφορά την είσοδο του Mn^{2+} στο συμπλάστη, είναι αργή, με το Mn^{2+} να μην ανταλλάσσεται εύκολα και να εξαρτάται από τον μεταβολισμό του

φυτού χωρίς να είναι ξεκάθαρος ο ακριβής μηχανισμός απορρόφησης (Humphries *et al.*, 2007).

Το μαγγάνιο γενικά έχει την τάση να συσσωρεύεται κυρίως στο υπέργειο μέρος του φυτού και λιγότερο στο ριζικό σύστημα. Το μέρος του φυτού όπου εμφανίζονται συμπτώματα έλλειψης μαγγανίου δείχνει την κινητικότητα του εντός του φυτού. Το μαγγάνιο θεωρείται δυσκίνητο στοιχείο το οποίο δεν μετατοπίζεται εύκολα και επομένως συμπτώματα δεν εμφανίζονται στα παλαιά φύλλα. Συμπτώματα έλλειψης μαγγανίου εμφανίζονται κυρίως στα νεαρά, πλήρως ανεπτυγμένα φύλλα και λιγότερο στα φύλλα της κορυφής. Η εμφάνιση πιο έντονων συμπτωμάτων σε αυτά τα φύλλα υποδηλώνει μια αυξημένη ανάγκη σε μαγγάνιο σε σχέση με τα φύλλα της κορυφής η οποία πιθανότατα οφείλεται σε αντίστοιχα υψηλότερη ταχύτητα αύξησης της βιομάζας τους (Humphries *et al.*, 2007).

Η θέση του μαγγανίου στα φυτά είναι σημαντικός παράγοντας στην έκφραση των συμπτωμάτων έλλειψης και επηρεάζεται από την κινητικότητά του στο ξύλο και στον ηθμό. Το μαγγάνιο μετακινείται εύκολα από τη ρίζα στο υπέργειο μέρος μέσα στον χυμό του ξύλου διαμέσου του ρεύματος της διαπνοής. Αντίθετα, η μετακίνησή του εντός του ηθμού είναι δύσκολη με το μαγγάνιο των φύλλων να καθίσταται αμετακίνητο, ενώ το μαγγάνιο που βρίσκεται στη ρίζα και τον βλαστό δύναται να ξαναμετακινηθεί (Loneragan, 1988).

Το μαγγάνιο είναι απαραίτητο για τον μεταβολισμό των φυτών καθώς συμμετέχει σε περίπου 35 ένζυμα στο φυτό και διεξάγει δύο σημαντικές λειτουργίες στις πρωτεΐνες: α) καταλυτική σαν μέταλλο και β) ενεργοποίηση ενζύμων. Παραδείγματα του καταλυτικού του ρόλου είναι η συμμετοχή του στο αντιοξειδωτικό ένζυμο υπεροξειδική δισμουτάση (superoxide dismutase=SOD) που προστατεύει τα κύτταρα από τη δράση των ελευθέρων ριζών, στην οξαλική οξειδάση (oxalate oxidase) και στο φωτοσύστημα II (Barber, 2003). Παραδείγματα ενζύμων που ενεργοποιούνται από το μαγγάνιο είναι το μηλικό ένζυμο, η ισοκιτρική αφυδρογονάση, η καρβοξυλάση του φωσφοενολοπυροσταφυλικού (PEP) και το ένζυμο λύαση της φαινυλαλάνινης-αμμωνίας (PAL). Ο ρόλος του μαγγανίου στα περισσότερα από τα πολλά ένζυμα που ενεργοποιούνται από αυτό το ιχνοστοιχείο είναι λιγότερο εξειδικευμένος και μπορεί να υποκατασταθεί από το μαγνήσιο. Πρωτεΐνες που ανήκουν σε αυτή την ομάδα εμπλέκονται στη διαδρομή του σικιμικού οξέος που οδηγεί στο σχηματισμό

αρωματικών αμινοξέων, λιγνινών, φλαβονοειδών και της φυτορμόνης ινδολοακετυλικό οξύ (IAA) (Marschner, 1995).

Η έλλειψη του μαγγανίου είναι επικίνδυνη για τους χλωροπλάστες διότι επηρεάζει το μηχανισμό διάσπασης του νερού στο φωτοσύστημα II (PS II), το οποίο παρέχει τα αναγκαία ηλεκτρόνια για την φωτοσύνθεση. Ωστόσο, και η περίσσεια μαγγανίου φαίνεται να δημιουργεί ιδιαίτερο πρόβλημα στο μηχανισμό της φωτοσύνθεσης (Mukhopadhyay and Sharma, 1991). Έτσι το μαγγάνιο έχει δύο ρόλους στις μεταβολικές διαδικασίες του φυτού: ως απαραίτητο θρεπτικό στοιχείο σε κανονικές συγκεντρώσεις και ως τοξικό στοιχείο όταν βρίσκεται σε υψηλές συγκεντρώσεις (El-Jaoual and Cox, 1998).

5.2 Ο ψευδάργυρος

Ο ψευδάργυρος είναι το πρώτο στοιχείο της 12^{ης} ομάδας του περιοδικού συστήματος και κατά ορισμένα χημικά χαρακτηριστικά μοιάζει με το μαγνήσιο, διότι το ιόν του είναι παρόμοιου μεγέθους και έχει μια οξειδωτική κατάσταση +2. Στα φυτά ο ψευδάργυρος βρίσκεται μόνο με τη μορφή του δισθενούς Zn^{2+} και δεν συμμετέχει σε οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις, καθώς έχει μία οξειδωτική κατάσταση, σε αντίθεση με το Mn.

Ο ψευδάργυρος προσλαμβάνεται από τα φυτά στην ιοντική μορφή ως ελεύθερος Zn^{2+} αλλά σε υψηλό pH είναι πιθανό να απορροφάται και ως μονοσθενές κατιόν ($ZnOH^+$) (Marschner, 1995).

Μελέτες σχετικές με την απορρόφηση Zn^{2+} από διάφορα είδη σιτηρών σε διάφορες συγκεντρώσεις ψευδαργύρου σε θρεπτικά διαλύματα έχουν δείξει ότι η απορρόφηση του Zn^{2+} εξαρτάται από την συγκέντρωσή του και μπορεί να κορεστεί, κάτι που υποδεικνύει μετακίνηση μέσω κάποιου φορέα (Hart *et al.* 1998). Η απορρόφηση φαινόταν να μειώνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες κάτι που υποδεικνύει εξάρτηση από τον μεταβολισμό. Οι Reid *et al.* (1996) που μέτρησαν την απορρόφηση του ψευδαργύρου σε άγλη αναφέρουν ένα διφασικό πρότυπο απορρόφησης, μέσω δύο χωριστών συστημάτων: ένα υψηλής συγγένειας που φτάνει σε κορεσμό σε συγκέντρωση 100 nM και ένα χαμηλής συγγένειας που έχει γραμμική εξάρτηση σε συγκεντρώσεις τουλάχιστον μέχρι 50 mM. Ισχυρή απόδειξη της ύπαρξης και των δύο

συστημάτων (χαμηλής συγγένειας – υψηλών συγκεντρώσεων και υψηλής συγγένειας – χαμηλών συγκεντρώσεων) στην απορρόφηση του Zn^{2+} ήρθε από μετρήσεις απορρόφησης του ραδιοϊσοτόπου $^{65}Zn^{2+}$ σε ποικιλίες σιταριού που αναπτύχθηκαν υδροπονικά σε συγκεντρώσεις ψευδαργύρου που κυμαίνονταν από 0.1 nM σε 80 mM. Έτσι, ένα σύστημα μεταφοράς υψηλής συγγένειας σχηματίζει τον κυρίαρχο μηχανισμό μεταφοράς Zn^{2+} στα εδάφη που η συγκέντρωση του Zn^{2+} στο εδαφικό διάλυμα είναι κοντά στα χαμηλότερα όρια της κλίμακας των nM (Hacisalihoglu *et al.*, 2001). Αρκετές πρωτεΐνες – μεταφορείς που τύπου ZIP (Zrt-Irt like πρωτεΐνες) και CDF (cation diffusion facilitator) φαίνεται ότι είναι σημαντικές για την μεταφορά των ιόντων ψευδαργύρου στα κύτταρα (Grotz *et al.*, 1998, Moreau *et al.*, 2002).

Η κινητικότητα του ψευδαργύρου στον ηθμό είναι σχετικά υψηλή (Haslett *et al.*, 2001). Ο ψευδάργυρος έχει υψηλή κινητικότητα από τα φύλλα στις ρίζες, στους βλαστούς και τους αναπτυσσόμενους καρπούς αλλά και από τη μια ρίζα στην άλλη (Rengel, 2001). Η ζήτηση ψευδαργύρου από ένα ιστό είναι ο ρυθμιστής της μεταφοράς του ψευδαργύρου μέσω του ηθμού (Pearson *et al.*, 1995). Η μεταφορά του Zn μέσω του ηθμού γίνεται με τη μορφή συμπλόκων με οργανικά οξέα όπως είναι το κιτρικό και το μηλικό οξύ (White, 1981) ή με την νικοτιαναμίνη (Schmidke and Stephan, 1995).

Ο ψευδάργυρος είναι συστατικό ενζύμων για την σύνθεση πρωτεϊνών και την παραγωγή ενέργειας, συμβάλει στη δομική ακεραιότητα των βιολογικών μεμβρανών και προστατεύει τα κύτταρα από οξειδωτικό στρες. Αναλυτικότερα, ο ψευδάργυρος έχει τις παρακάτω δράσεις:

A. Ενζυμική – πρωτεϊνική δραστηριότητα.

Περισσότερες από 1200 πρωτεΐνες υπολογίζεται ότι περιέχουν, είναι συνδεδεμένες ή μεταφέρουν Zn^{2+} . Επίσης σημαντικός είναι ο ρόλος του ψευδαργύρου στην ανάπτυξη των σπόρων καθώς φυτά με έλλειψη ψευδαργύρου εμφανίζουν καθυστέρηση στην ωρίμανση των σπόρων. Τα περισσότερα ένζυμα που περιέχουν ψευδάργυρο εμπλέκονται στην μεταγραφή του DNA και την επεξεργασία και μετάφραση του RNA. Αρκετά ένζυμα τα οποία εμπλέκονται στη σύνθεση και διατήρηση του DNA ή του RNA όπως οι DNA πολυμεράσες, RNA πολυμεράσες, ακετυλάσες ιστονών και ένζυμα που εμπλέκονται στη επεξεργασία του RNA στα

μιτοχόνδρια και τους χλωροπλάστες είναι όλα εξαρτώμενα από τον ψευδάργυρο (Kramer and Clemens, 2006).

Στους χλωροπλάστες τα ένζυμα που εξαρτώνται από τον ψευδάργυρο πραγματοποιούν αρκετές σημαντικές λειτουργίες. Η στρωματική πεπτιδάση των χλωροπλαστών (SPP), που καταλύει την αφαίρεση μετακινούμενων πεπτιδίων από πρόδρομες πρωτεΐνες που έχουν εισαχθεί στους χλωροπλάστες, είναι εξαρτώμενη από τον ψευδάργυρο σε αναλογία με ότι συμβαίνει και στο μιτοχονδριακό σύστημα (Richter and Lampra, 2003). Οι εντός των χλωροπλαστών πρωτεολυτικές δραστηριότητες είναι εξαρτώμενες από τον ψευδάργυρο, όπως για παράδειγμα οι διαδικασίες επισκευής του φωτοσυστήματος II με ανακύκλωση της κατεστραμμένης από το φως D1 πρωτεΐνης (Bailey *et al.*, 2002).

Η έλλειψη ψευδαργύρου μειώνει την καθαρή φωτοσύνθεση στα φυτά διαταράσσοντας την δραστηριότητα της καρβονικής ανυδράσης, η οποία είναι ένα ένζυμο απαραίτητο για τη δέσμευση του CO₂ στα C₄ φυτά, της Cu-Zn υπεροξειδικής δισμουτάσης και της D-ριβουλόζης- 5 φωσφορικής 3-επιμεράσης, ένα ένζυμο του κύκλου του Calvin (Jelakovic *et al.*, 2003).

Εκτός του ότι είναι συστατικό μεταλλοενζύμων, ο ψευδάργυρος είναι και συστατικό αρκετών ρυθμιστικών πρωτεϊνών που αλληλεπιδρούν με το DNA και ελέγχουν την έκφραση των γονιδίων. Με τη μορφή δακτυλίου ο ψευδάργυρος σχηματίζει δομικά μοτίβα στην περιοχή πρόσδεσης των μεταγραφικών πρωτεϊνών στο DNA (Berg and Shi, 1996).

B. Δομική ακεραιότητα των βιολογικών μεμβρανών

Ο ψευδάργυρος επηρεάζει την περατότητα των πλασματικών μεμβρανών καθώς η έλλειψή του κάνει τις μεμβράνες περισσότερο διάτρητες λόγω απώλειας της δομικής τους ακεραιότητας. Οι Cakmak και Marschner (1988) αναφέρουν αυξημένη απώλεια διαλυτών (K⁺, αμινοξέων, σακχάρων, φαινολών) από τις ρίζες τεσσάρων διαφορετικών φυτών με έλλειψη ψευδαργύρου, η οποία μπορούσε να αποκατασταθεί με παροχή ψευδαργύρου, κάτι που δεν εμφανίζεται με το ασβέστιο, του οποίου η επίδραση είναι γνωστή στην περατότητα των μεμβρανών.

Γ. Αντιοξειδωτική δραστηριότητα

Το οξειδωτικό στρες προέρχεται από την παραγωγή ενεργών μορφών οξυγόνου (reactive oxygen species =ROS) σε ποσότητες μεγαλύτερες από αυτές που μπορούν αποτελεσματικά να αδρανοποιηθούν από το αντιοξειδωτικό σύστημα του φυτού. Ο ψευδάργυρος προστατεύει το φυτό από την οξειδωτική ζημιά με δύο τρόπους: α) εμποδίζοντας την αυξημένη παραγωγή ROS και β) με την ταχεία αποτοξικοποίησή τους. Έτσι ο ψευδάργυρος εμποδίζει την παραγωγή ROS εμποδίζοντας την δραστηριότητα του ενζύμου NADPH (nicotinamide adenine dinucleotide phosphate-oxidase =NADPH) που βρίσκεται στις κυτταρικές μεμβράνες και καταλύει την παραγωγή υπεροξειδικών ιόντων. (Cakmak, 2000).

6. Έλλειψη και περίσσεια μαγγανίου και ψευδαργύρου στην αγγουριά.

Διαταραχές στη θρέψη των φυτών από έλλειψη ή περίσσεια ιχνοστοιχείων είναι ένα συνηθισμένο πρόβλημα στην εκτός εδάφους καλλιέργεια λαχανικών. Τα ιχνοστοιχεία είναι ανόργανα στοιχεία που είναι αναγκαία για τα φυτά σε μικρές ποσότητες. Ωστόσο, αποκλίσεις από τις συγκεντρώσεις για άριστη ανάπτυξη μπορεί να αποβούν ζημιογόνες για τα φυτά. Παρακάτω αναφέρονται τα κυριότερα συμπτώματα που προκαλούνται στα φυτά από έλλειψη ή περίσσεια μαγγανίου και ψευδαργύρου με έμφαση στην αγγουριά.

6.1 Έλλειψη και τοξικότητα μαγγανίου

Η άριστη συγκέντρωση μαγγανίου στους φυτικούς ιστούς της αγγουριάς κυμαίνεται μεταξύ 30-60 ppm ξ.β. στα νεαρά φύλλα και 100-250 ppm στα παλαιότερα. Όταν η συγκέντρωση του μαγγανίου στα νεαρά φύλλα είναι κάτω από 50 ppm, μπορεί να υπάρξει απώλεια στις αποδόσεις, ενώ όταν είναι κάτω από 12-15 ppm συνήθως εμφανίζονται συμπτώματα έλλειψης στα φύλλα. Η έλλειψη μαγγανίου συχνά συγχέεται με την τροφопενία σιδήρου καθότι πραγματική έλλειψη μαγγανίου είναι σπάνια. Τα συμπτώματα της έλλειψης μαγγανίου εμφανίζονται κυρίως στα νεαρά φύλλα. Στην πραγματικότητα, εξ αιτίας του ανταγωνισμού μεταξύ σιδήρου και μαγγανίου η έλλειψη μαγγανίου μπορεί να οφείλεται σε τοξικότητα σιδήρου. Η διάγνωση της έλλειψης μαγγανίου δεν είναι εύκολη διότι τα συμπτώματα μεταξύ έλλειψης σιδήρου, τοξικότητας σιδήρου και έλλειψης μαγγανίου είναι παρόμοια. Η

τροφοπενία μαγγανίου διακρίνεται από αυτήν του σιδήρου κατά το ότι το περιφερειακό και τα μεσονεύριο μέρος του φύλλου γίνονται σταδιακά ανοιχτοπράσινα προς κιτρινοπράσινα ενώ τα νεύρα παραμένουν πράσινα.

Συμπτώματα τοξικότητας μαγγανίου εμφανίζονται όταν η συγκέντρωση του μαγγανίου είναι μεγαλύτερη από 500 ppm για τα νεαρά και 800 ppm ξ.β. για τα παλαιότερα φύλλα. Σημαντικές απώλειες στις αποδόσεις έχουμε όταν η συγκέντρωση του μαγγανίου φτάσει τα 2000-5000 ppm στα νεαρά και παλαιά φύλλα αντίστοιχα. Η τοξικότητα μαγγανίου εμφανίζεται πρώτα στα κατώτερα φύλλα όπου εμφανίζουν ανοιχτοπράσινες περιοχές μεταξύ των νεύρων. Τα νεύρα έχουν πιο σκούρο χρώμα και κηλίδες εμφανίζονται στους βλαστούς και στα νεύρα από την κάτω πλευρά των φύλλων (Paradopoulos, 1994). Επίσης, στην τοξικότητα μαγγανίου τα φύλλα εμφανίζουν χαρακτηριστικές καστανές νεκρωτικές κηλίδες (El-Jaouai and Cox, 1998).

6.2 Έλλειψη και τοξικότητα ψευδαργύρου

Η άριστη συγκέντρωση ψευδαργύρου στα νεαρά πλήρως ανεπτυγμένα φύλλα της αγγουριάς κυμαίνεται από 40 έως 100 ppm σε ξ.β. Συμπτώματα έλλειψης εμφανίζονται όταν η συγκέντρωση του Zn στα φύλλα είναι χαμηλότερη από 20-25 ppm σε ξ.β. Έλλειψη ψευδαργύρου εμφανίζεται όταν τα φυτά αναπτύσσονται υδροπονικά με θρεπτικό διάλυμα που δεν περιέχει καθόλου ψευδάργυρο. Η προσθήκη υψηλών ποσοτήτων φωσφόρου στο θρεπτικό διάλυμα μπορεί να προκαλέσει έλλειψη ψευδαργύρου διότι σχηματίζεται αδιάλυτος φωσφορικός ψευδάργυρος (Sonneveld, 2002). Ο χαλκός και πιθανότατα ο σίδηρος, το μαγνήσιο και το ασβέστιο παρεμποδίζουν την απορρόφηση του ψευδαργύρου. Τα συμπτώματα της τροφοπενίας ψευδαργύρου είναι συνήθως ελαφρά μεσονεύρια στίγματα που αναπτύσσονται πρώτα στα κατώτερα φύλλα και εξαπλώνονται προς τα πάνω ενώ τα μεσογονάτια διαστήματα παραμένουν κοντά και τα φύλλα μικρά. Σε περιπτώσεις μεγάλης έλλειψης τα κοντά μεσογονάτια κάνουν την κορυφή των φυτών να έχει θαμνώδη εμφάνιση. Η όλη ανάπτυξη του φυτού είναι περιορισμένη και τα φύλλα γίνονται κιτρινοπράσινα εκτός από τα νεύρα τα οποία παραμένουν πράσινα (Paradopoulos, 1994).

Τοξικότητα ψευδαργύρου εμφανίζεται όταν η συγκέντρωση υπερβαίνει τα 300 ppm στα πλήρως ανεπτυγμένα φύλλα. Συνήθως η τοξικότητα ψευδαργύρου οφείλεται

στην απελευθέρωση ψευδαργύρου από χρήση γαλβανισμένων εξαρτημάτων ή σωληνώσεων στα υδροπονικά συστήματα ή σε εδάφη που γειτνιάζουν με ορυχεία ψευδαργύρου. Τα συμπτώματα της τοξικότητας ψευδαργύρου περιλαμβάνουν μείωση του μεγέθους των φύλλων, η περιφέρεια των νεαρών φύλλων και τα μεσονεύρια διαστήματα γίνονται κιτρινωπά ενώ τα νεύρα έχουν σκούρο πράσινο χρωματισμό. Τα νεύρα εμφανίζονται πιο σκοτεινά και βαθυπράσινα σε σχέση με την τροφοπενία μαγγανίου (Adams, 1985).

7. Η ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος στις υδροπονικές καλλιέργειες

Στα υδροπονικά συστήματα με συνεχή ροή του θρεπτικού διαλύματος όπως το NFT η παροχή θρεπτικού διαλύματος στα φυτά υπερβαίνει κατά πολύ την κατανάλωση νερού από την καλλιέργεια. Το ίδιο ισχύει και για καλλιέργειες που αναπτύσσονται σε υποστρώματα καθώς η παροχή θρεπτικού διαλύματος κατά τακτά χρονικά διαστήματα υπερβαίνει την απορρόφηση από την καλλιέργεια. Η συλλογή και επαναχρησιμοποίηση του θρεπτικού διαλύματος που στραγγίζει από το ριζικό περιβάλλον λέγεται «ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος» και τα συστήματα που την περιλαμβάνουν ονομάζονται «κλειστά υδροπονικά συστήματα» (Savvas, 2002).

Η συλλογή και η επαναχρησιμοποίηση των απορροών από τα θερμοκήπια μειώνει την απόρριψη λιπασμάτων στο έδαφος με συνέπεια να αποφεύγεται η μόλυνση των υδροφορέων με νιτρικά και φωσφορικά άλατα και άλλα ανεπιθύμητα ιόντα. Έτσι, με την ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος κατά κύριο λόγο προστατεύεται το περιβάλλον. Ένα άλλο, εξίσου σημαντικό, πλεονέκτημα των κλειστών υδροπονικών συστημάτων είναι η εξοικονόμηση λιπασμάτων και νερού. Ωστόσο, η εφαρμογή των κλειστών συστημάτων έχει ορισμένα μειονεκτήματα. Η επαναχρησιμοποίηση του θρεπτικού διαλύματος έχει αυξημένο κίνδυνο μετάδοσης παθογόνων και διάδοσής τους σε όλα τα φυτά. Έτσι μπορεί να χρειασθεί πρόσθετος εξοπλισμός, ώστε να απολυμαίνεται το θρεπτικό διάλυμα πριν την ανακύκλωσή του, ο οποίος αυξάνει το αρχικό κόστος εγκατάστασης. Ακόμα, η ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος μπορεί να οδηγήσει σε συσσώρευση NaCl στο περιβάλλον των ριζών στις περιπτώσεις που η συγκέντρωση NaCl στο νερό άρδευσης δεν είναι πολύ χαμηλή, με συνέπεια να μειώνεται η παραγωγή (Savvas, 2002).

Το θρεπτικό διάλυμα που προέρχεται από τις απορροές του ριζικού περιβάλλοντος (διάλυμα απορροής) διαφέρει στη σύνθεσή του από αυτό που παρέχεται στην καλλιέργεια μέσω του συστήματος άρδευσης (Raviv *et al.*, 1998). Τα χαρακτηριστικά του θρεπτικού διαλύματος που αλλάζουν όταν αυτό έρχεται σε επαφή με το ριζικό σύστημα είναι οι συγκεντρώσεις των ιόντων, οι αναλογίες μεταξύ των ιόντων και το pH. Έτσι, αυτό το διάλυμα δεν μπορεί άμεσα να δοθεί ξανά στα φυτά αν δεν αναπληρωθούν τα θρεπτικά στοιχεία και το νερό που απορροφήθηκε από το ριζικό σύστημα των φυτών.

Η απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά είναι επιλεκτική και εξαρτάται περισσότερο από τις θρεπτικές απαιτήσεις της καλλιέργειας την συγκεκριμένη χρονική στιγμή παρά από τη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα (Marschner, 1995, Le Bot *et al.*, 1998). Η απορρόφηση ορισμένων μονοσθενών ιόντων από τη ρίζα όπως είναι το K^+ , τα φωσφορικά και τα νιτρικά ιόντα, πραγματοποιείται πολύ αποτελεσματικά με ενεργή απορρόφηση από το ριζικό περιβάλλον (Maathuis and Sanders, 1996, Schachtman *et al.*, 1998, Crawford and Glass, 1998). Έτσι, τα φυτά μπορούν να ικανοποιήσουν τις θρεπτικές τους απαιτήσεις σε αυτά τα μακροστοιχεία ακόμα και όταν οι συγκεντρώσεις τους στο θρεπτικό διάλυμα είναι χαμηλές, εφόσον η παροχή τους είναι συνεχής και δεν εξαντλούνται (Drew and Saker, 1984). Αντίθετα, η ενεργή απορρόφηση των δισθενών μακροστοιχείων όπως τα θειικά είναι λιγότερο αποτελεσματική (Schiff, 1983) ενώ η μεταφορά άλλων στοιχείων όπως του Ca^{2+} και του Mg^{2+} κατά κανόνα γίνεται παθητικά (Yang and Jie, 2005). Συνήθως οι συγκεντρώσεις αυτών των στοιχείων στο έδαφος είναι κοντά στις συγκεντρώσεις απορρόφησης από τα φυτά και γι αυτό το λόγο τα φυτά δεν έχουν αναπτύξει κατά την εξέλιξή τους μηχανισμούς πιο αποτελεσματικής απορρόφησης, αντίθετα με ότι συμβαίνει με την πρόσληψη του φωσφόρου (Schachtman *et al.*, 1998).

Η αποτελεσματικότητα της απορρόφησης των μικροστοιχείων εμφανίζει επίσης μεγάλη διακύμανση. Έτσι, η απορρόφηση του μαγγανίου είναι ενεργητική ακόμα και σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις (Rengel, 2000) ενώ του βορίου είναι μάλλον παθητική (Hu and Brown, 1997) και γι αυτό το λόγο περισσότερο εξαρτώμενη από την συγκέντρωσή του στο ριζικό περιβάλλον. Η απορρόφηση του σιδήρου, του ψευδαργύρου, του χαλκού και του μολυβδαινίου μπορεί να προσαρμοστεί στις

ανάγκες του φυτού όταν οι συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών στο ριζικό περιβάλλον είναι εντός μιας περιορισμένης κλίμακας τιμών η οποία είναι διαφορετική για κάθε ιχνοστοιχείο (Sonneveld and de Bes, 1984).

Λόγω του ότι τα φυτά εμφανίζουν διαφορετική ικανότητα απορρόφησης για κάθε θρεπτικό στοιχείο, η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος στο ριζικό περιβάλλον των φυτών αναπόφευκτα γίνεται διαφορετική από τη σύνθεση που είχε το διάλυμα όταν δόθηκε στα φυτά. Έτσι, η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος που απορρέει από το ριζικό περιβάλλον των φυτών στις υδροπονικές καλλιέργειες έχει διαφορετική σύνθεση από αυτήν του διαλύματος με το οποίο τροφοδοτήθηκαν τα φυτά. Τα θεϊκά ιόντα έχουν την τάση να συσσωρεύονται στο ριζικό περιβάλλον λόγω διαφορετικής ικανότητας απορρόφησης των τριών μακροανιόντων από τα φυτά. Επίσης, οι συγκεντρώσεις του Na^+ και του Cl^- στο ριζικό περιβάλλον έχουν την τάση να αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου με ρυθμούς που εξαρτώνται από την συγκέντρωση των ιόντων αυτών στο νερό άρδευσης. Αυτό είναι αποτέλεσμα των συνήθως χαμηλών συγκεντρώσεων απορρόφησης των Na^+ και Cl^- σε σχέση με την συγκέντρωσή τους στο νερό άρδευσης (Savvas, 2002, Savvas et al., 2005a).

Τα φυτά είναι ικανά να προσαρμόζουν τον ρυθμό απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων ανάλογα με τις θρεπτικές τους απαιτήσεις οι οποίες εξαρτώνται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος (Mankin and Fynn, 1996), το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας και το φορτίο των καρπών (Magalhaes and Wilcox, 1983). Οι παραπάνω παράγοντες μπορούν μόνο χονδρικά να προβλεφθούν με συνέπεια η σύνθεση του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος στα φυτά που αναπτύσσονται υδροπονικά να μην μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια. Έτσι, η αναπλήρωση των θρεπτικών στοιχείων με τις κατάλληλες ποσότητες από κάθε στοιχείο είναι δύσκολη, ειδικά όταν πρόκειται για εμπορικές καλλιέργειες όπου η όλη διαδικασία θα πρέπει να γίνεται αυτόματα. Για να επιτευχθεί ακριβής αναπλήρωση των στοιχείων που απορροφούνται από τα φυτά θα πρέπει να γίνεται συνεχής παρακολούθηση της συγκέντρωσης του κάθε στοιχείου στο διάλυμα. Κάτι τέτοιο, προς το παρόν είναι ανέφικτο σε εμπορική κλίμακα στα θερμοκήπια (Kläring, 2001). Γι αυτό το λόγο, η αναπλήρωση των θρεπτικών στοιχείων βασίζεται σε συχνές χημικές αναλύσεις του διαλύματος απορροής στο εργαστήριο καθώς επίσης και σε μαθηματικά μοντέλα που προκύπτουν από σχετικά πειράματα προσομοίωσης (Savvas, 2002). Για αυτά τα

μοντέλα γίνεται εκτενέστερη αναφορά στην επόμενη παράγραφο, δεδομένου ότι η παρούσα διδακτορική διατριβή αποσκοπεί στην προσομοίωση της απορρόφησης Μn και Ζn σε κλειστές υδροπονικές καλλιέργειες αγγουριάς.

8. Μοντέλα απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων στα κλειστά υδροπονικά συστήματα

Στα κλειστά υδροπονικά συστήματα το θρεπτικό διάλυμα μπορεί να ανακυκλώνεται χωρίς μείωση την ανάπτυξης των φυτών, εφόσον η ιοντική σύσταση και η ολική περιεκτικότητα σε άλατα (ηλεκτρική αγωγιμότητα ή EC) του διαλύματος δεν αποκλίνουν από τα ανώτατα και κατώτατα όρια τιμών για τη συγκεκριμένη καλλιέργεια. Για να συνεχιστεί η ανακύκλωση στην περίπτωση που εμφανιστούν τέτοιες αποκλίσεις, αυτές θα πρέπει να διορθωθούν με την προσθήκη νερού και θρεπτικών στοιχείων σε κατάλληλες αναλογίες. Οι αλλαγές στην αγωγιμότητα και στη σύνθεση του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος οφείλονται στο ότι τα φυτά απορροφούν το νερό και τα θρεπτικά στοιχεία με διαφορετικές αναλογίες από αυτές με τις οποίες τροφοδοτούνται. Με σκοπό τη μείωση του περιβαλλοντικού αλλά και οικονομικού κόστους λόγω αναγκαστικής απόρριψης του ΘΔ η ανακύκλωση θα πρέπει να συνεχίζεται για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, πράγμα που απαιτεί συχνές χημικές αναλύσεις, οι οποίες μπορεί να γίνονται ή με απευθείας παρακολούθηση on line με δαπανηρούς αισθητήρες ιόντων (Gielsing *et al.*, 2005) ή off line με ανάλυση σε συμβατικά εργαστήρια ή χρησιμοποιώντας φορητά test kits (Maggini *et al.*, 2010). Από τις παραπάνω τρεις επιλογές, στην πραγματικότητα η πρώτη είναι ακόμη σε θεωρητικό επίπεδο, δεδομένου ότι προς το παρόν οι διαθέσιμοι αισθητήρες στερούνται αξιοπιστίας όταν χρησιμοποιούνται συνεχώς σε εμπορικά θερμοκήπια (Σάββας, 2012).

Μοντέλα απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων μπορούν να εφαρμοστούν σε συστήματα υποστήριξης λήψεως αποφάσεων (Decision support systems) για την διαχείριση του ΘΔ, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση των παραγωγών από τις συχνές αναλύσεις των θρεπτικών διαλυμάτων. Με αυτή την έννοια, τα μοντέλα μπορούν να θεωρηθούν ως υποκατάστατο των αναλύσεων ή των αισθητήρων (Lieth, 1999). Η ολοένα και αυξανόμενη επιτυχία των μοντέλων απορρόφησης έχει προάγει την ανάπτυξη εργαλείων για την δημιουργία μοντέλων τα οποία έχουν διαφορετικά επίπεδα πολυπλοκότητας και αξιοπιστίας. Τα μοντέλα αυτά αποσκοπούν στην περιγραφή ή και την πρόβλεψη διαδικασιών που σχετίζονται με την διατροφή των φυτών (Le Bot *et al.*, 1998). Η έκταση στην οποία τα διάφορα μοντέλα εξετάζουν το μηχανισμό της μελετώμενης διαδικασίας καθορίζει κατά πόσο είναι εμπειρικό ένα

μοντέλο. Τα λεγόμενα «μηχανιστικά» (mechanistic) μοντέλα έχουν καλύτερο γνωστικό δυναμικό και πρόβλεψη και μπορούν να δημιουργήσουν νέα γνώση, ωστόσο, τα λεγόμενα εμπειρικά (empirical) μοντέλα τα οποία βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα έχουν μεγαλύτερη πρακτική αξία λόγω της μειωμένης πολυπλοκότητας των μελετώμενων φαινομένων. Συχνά επιλέγονται και μοντέλα που συνδυάζουν και τις δύο προσεγγίσεις όπως είναι τα εμπειρικά μοντέλα με μερικές μηχανιστικές υποθέσεις. Σε αυτά τα μοντέλα, για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται παράγοντες (ανεξάρτητες μεταβλητές) που υποτίθεται ότι επηρεάζουν τις σχέσεις των θρεπτικών στοιχείων, όπως είναι οι περιβαλλοντικές συνθήκες και η κατανάλωση νερού και μπορούν να θεωρηθούν ως μηχανιστική υπόθεση σε εμπειρικά μοντέλα απορρόφησης. Αντίστοιχα, πολλά μηχανιστικά μοντέλα χρησιμοποιούν εμπειρικά δεδομένα και εξισώσεις (Le Bot *et al.*, 1998, Mathieu *et al.*, 1999).

Σε σχετικά πρόσφατα άρθρα έχουν αναφερθεί και οι δύο τύποι μοντέλων για τη διατροφή των φυτών στην υδροπονία. Οι Klaring and Cierpinski (1998) χρησιμοποίησαν εμπειρικά μοντέλα για την φωτοσύνθεση και την εξατμισοδιαπνοή για να υπολογίσουν την συγκέντρωση απορρόφησης σε φυτά πιπεριάς σε καλλιέργεια πετροβάμβακα και να αναπτύξουν ένα αλγόριθμο για την ρύθμιση της συγκέντρωσης των θρεπτικών στοιχείων με βάση την ηλιακή ακτινοβολία. Ανάλογα μοντέλα που βασίζονται στην ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται εντός του θερμοκηπίου έχουν προταθεί για τον υπολογισμό της απορρόφησης του αζώτου στο χρυσάνθεμο (Zerche, 2001) και την τριανταφυλλιά (Brun and Morisot, 1996) σε καλλιέργεια εκτός εδάφους. Επίσης, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks) έχουν χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση της απορρόφησης νερού και θρεπτικών στοιχείων από τους Guidotti *et al.* (1998).

Η δημιουργία αξιόπιστων και αποτελεσματικών μοντέλων βασίζεται στην ικανότητα του μοντελιστή να συνδέει τις μεταβλητές εισόδου με τις μεταβλητές εξόδου οι οποίες θα πρέπει να είναι οι καταλληλότερες ώστε να προσομοιάζουν με αυτό που συμβαίνει στην πραγματικότητα.

Για να επιτευχθεί το δύσκολο έργο της οικοδόμησης ενός μοντέλου, οι μοντελιστές συνήθως ακολουθούν τα παρακάτω βήματα:

- 1) Απεικονίζουν τα δεδομένα σε διαγράμματα και τα προσαρμόζουν με διάφορες στατιστικές διαδικασίες.

2) Μετά τον παραπάνω χειρισμό των δεδομένων, οι μοντελιστές αναπτύσσουν ένα μοντέλο με βαθμονόμηση των παραμέτρων.

Μέχρι αυτό το σημείο ο μοντελιστής δεν γνωρίζει την αξιοπιστία του μοντέλου και για αυτό το λόγω θα πρέπει να γίνει αξιολόγηση η οποία επιτυγχάνεται ως εξής:

1. Έλεγχος των επιδόσεων του μοντέλου με:

α. σύγκριση των μοντέλων σε σχέση με τα δεδομένα (επαλήθευση).

β. κατανόηση του πώς οι μεταβλητές και οι παράμετροι μπορούν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά του μοντέλου (ανάλυση ευαισθησίας).

γ. ερμηνεία των παραμέτρων σε σχέση με αυτό που μοντελοποιείται.

2. Επικύρωση του μοντέλου που περιλαμβάνει:

α. τη συλλογή νέων δεδομένων.

β. δοκιμή μοντέλου με το νέο σύνολο δεδομένων.

Τα παραπάνω βήματα συνήθως γίνονται από την ίδια ομάδα που πρότεινε το μοντέλο. Παρ' όλα αυτά, η σταθερότητα των μοντέλων μπορεί να ανιχνευθεί καλά μόνο με την διευρυμένη εφαρμογή τους, ειδικά αν ο σκοπός τους είναι να προσομοιώσει τις συμπεριφορές διαφόρων ειδών και / ή συστημάτων καλλιέργειας.

Οι Carmassi *et al.* (2005) περιγράφουν ένα απλό μαθηματικό μοντέλο για την εκτίμηση της συγκέντρωσης των θρεπτικών στοιχείων κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας και την συσσώρευση των μη θρεπτικών ιόντων στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα κλειστών υδροπονικών συστημάτων. Το μοντέλο αυτό προϋποθέτει μία γραμμική σχέση μεταξύ της **συγκέντρωσης απορρόφησης** και της **συγκέντρωσης στο θρεπτικό διάλυμα ριζοστρώματος** και μπορεί να εφαρμοστεί στη διαχείριση του θρεπτικού διαλύματος, ιδιαίτερα όταν το διαθέσιμο νερό άρδευσης είναι χαμηλής ποιότητας.

Το μοντέλο προέρχεται από το ισοζύγιο απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων από την καλλιέργεια σε γραμμοισοδύναμα (U , meq) την περίοδο μεταξύ n και $n-1$ ημερών ή εβδομάδων όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$U = VC_{n-1} + V_R C_R - VC_n \quad (1)$$

όπου V και C είναι ο όγκος του ανακυκλούμενου διαλύματος σε λίτρα και η ιονική συγκέντρωση σε (meq/l), αντίστοιχα. Τα V_R και C_R είναι ο όγκος και η ιονική συγκέντρωση του θρεπτικού διαλύματος που προστίθεται στο σύστημα κατά τη διάρκεια ενός δεδομένου διαστήματος. Δεδομένου ότι η εξάτμιση από το υπόστρωμα

και οι διαρροές είναι γενικά αμελητέα, το V_R αντιστοιχεί περίπου στο νερό που προσλαμβάνεται από την καλλιέργεια (V_u). Έτσι, η συγκέντρωση απορρόφησης ιόντων (C_u) εκφράζεται στην Εξίσωση 2:

$$C_u = U/V_u \quad (2)$$

Με υποκατάσταση του U από την εξίσωση (1) το C_u μπορεί να υπολογιστεί ως εξής (εξίσωση 3):

$$C_u = C_R + (C_{n-1} - C_n) V/V_u \quad (3)$$

Με αναδιάταξη της εξίσωσης 3, είναι δυνατόν να προβλεφθεί η μεταβολή στην συγκέντρωση C (ΔC) κατά τη διάρκεια ενός δεδομένου διαστήματος επί τη βάση της αρχικής C , V , V_u , και C_u , ως εξής στην Εξίσωση 4:

$$\Delta C = C_n - C_{n-1} = (C_R - C_u) V_u/V \quad (4)$$

Η εξίσωση 4 είναι έγκυρη **όταν η C_u είναι σταθερή και τα ιόντα συσσωρεύονται γραμμικά στο ανακυκλούμενο διάλυμα.**

Ως εκ τούτου, το μοντέλο προσομοιώνει τις αλλαγές στη συγκέντρωση ιόντων του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος ανάλογα με τους σχετικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη θρέψη των φυτών στην υδροπονία, όπως είναι: η ποιότητα του νερού άρδευσης, ο όγκος του ανακυκλούμενου διαλύματος, η πρόσληψη νερού από την καλλιέργεια, και τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά του καλλιεργειών, οι οποίοι περιγράφονται από την C_u . Στην C_u περιλαμβάνεται τόσο η πραγματική απορρόφηση της ρίζας όσο και η απώλεια των θρεπτικών στοιχείων από την καθίζηση στο υπόστρωμα.

Εάν η συσσώρευση ιόντων στο ανακυκλούμενο διάλυμα **δεν είναι γραμμική** με την πρόσληψη νερού από την καλλιέργεια, μια διαφορετική συνάρτηση θα πρέπει χρησιμοποιηθεί που να λαμβάνει υπόψη την επίδραση της εξωτερικής συγκέντρωσης στην C_u . Η εξίσωση 5 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τη σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης απορρόφησης C_u για ένα δεδομένο ιόν και της συγκέντρωσης του στο το ανακυκλούμενο διάλυμα (Silberbush and Ben-Asher, 2001, Sonneveld, 2000):

$$C_u = \rho C \quad (5)$$

Το ρ είναι συντελεστής που προσδιορίζεται πειραματικά. Υποκαθιστώντας την εξίσωση 5 στην εξίσωση 4 και με αναδιάταξη προκύπτει η εξίσωση:

$$(C_n - C_{n-1})/(V_u/V) = C_R - \rho C \quad (6)$$

Στη παραπάνω εξίσωση το V_u παριστάνει την πρόσληψη νερού από την καλλιέργεια μεταξύ των βημάτων $n-1$ και n . Για μικρές προσαιξήσεις, η εξίσωση 6 μπορεί να γραφτεί σε μορφή διαφορικής εξίσωσης:

$$dC/d(V_u/V) + pC = C_R \quad (7)$$

Η ολοκλήρωση της εξίσωσης 7 με την αρχική κατάσταση $C = C_R$ για $V_u/V = 0$, οδηγεί στην ακόλουθη έκφραση:

$$C_i = (C_R - C_R/p) \exp(-pV_u/V) + C_R/p \quad (8)$$

όπου C_i είναι η συγκέντρωση ιόντων στο ανακυκλούμενο διάλυμα στο βήμα i .

Οι συγκεντρώσεις ιόντων στα βήματα $n-1$ και n , αντίστοιχα, μπορούν να εκφραστούν μέσω της εξίσωσης 8. Τέλος, η σύγκριση των δύο εκφράσεων δίνει την αλλαγή στην συγκέντρωση ιόντων μεταξύ των βημάτων $n-1$ και n , όπως φαίνεται στην εξίσωση 9:

$$C_n = (C_{n-1} - C_R/p) \exp(-pV_u/V) + C_R/p \quad (9)$$

Στο μοντέλο, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) μπορεί να υπολογιστεί με βάση την συνολική συγκέντρωση των διαλυμένων ιόντων, σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο, όπως αναφέρεται από Sonneveld *et al.*, (1999):

$$EC \text{ (dS/m)} = 0,19 + 0,095 C^{\text{Cat}} \quad (10)$$

όπου C^{Cat} είναι το άθροισμα των συγκεντρώσεων των κατιόντων σε meq/L ή με τη βοήθεια της σχέσης (Savvas and Adamidis, 1999) :

$$EC \text{ (dS/m)} = (C^{\text{Cat}} + 1,462)/9,819 \quad (11)$$

Οι εξισώσεις (10) και (11) είναι έγκυρες αν υποτεθεί ότι η κατιονική-ανιονική ισορροπία διατηρεί την ηλεκτροχημική ουδετερότητα του διαλύματος.

Τα παραπάνω μοντέλα συσσώρευσης αλάτων βασίζονται στην υπόθεση ότι η διαφορά μεταξύ της συγκέντρωσης του θρεπτικού διαλύματος στο δοχείο ανάμιξης και στο ριζικό σύστημα (υπόστρωμα) είναι αμελητέα και ότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης απορρόφησης και της συγκέντρωσης στο θρεπτικό διάλυμα στο περιβάλλον των ριζών όπως φαίνεται από την (5). Από τους Sonneveld *et al.*, (1999) και Savvas *et al.*, (2005) περιγράφεται ένα αντίστοιχο μοντέλο που χρησιμοποιεί εκθετική σχέση μεταξύ των ανωτέρω παραμέτρων και το οποίο έχει αποδειχθεί ότι παρέχει σημαντικά μεγαλύτερη ακρίβεια στις προβλέψεις (Savvas *et al.*, 2006, 2007).

Παρακάτω αναφέρεται αυτό το μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της συσσώρευσης του NaCl σε υδροπονική καλλιέργεια αγγουριάς (Savvas *et al.*, 2005a), τομάτας (Varlagas *et al.*, 2010), φασολιού (Savvas *et al.*, 2007) και πιπεριάς (Savvas *et al.*, 2008).

Επειδή η αύξηση των συγκεντρώσεων Na και Cl στο περιβάλλον των ριζών συνοδεύεται από ανάλογη αύξηση των συγκεντρώσεων απορρόφησης έως ότου οι συγκεντρώσεις απορρόφησης εξισωθούν με τις συγκεντρώσεις των ιόντων αυτών στο χρησιμοποιούμενο νερό άρδευσης, η σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων απορρόφησης του Na και του Cl (C_{iu} , $i=Na, Cl$) και των συγκεντρώσεών τους στο περιβάλλον της ρίζας (C_{ir}) μπορούν να περιγραφούν μέσω της εξίσωσης (Savvas *et al.*, 2005a):

$$C_{iu} = aC_{ir}^b + c \quad (12)$$

Τα a , b και c είναι σταθερές που εξαρτώνται από το είδος του καλλιεργούμενου φυτού και μπορούν να υπολογιστούν με γραμμική ανάλυση της παλινδρόμησης από πειράματα βαθμονόμησης της παραπάνω εξίσωσης.

Από το ισοζύγιο μαζών προκύπτει ότι, σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα, η αύξηση της συγκέντρωσης του Na και του Cl στο περιβάλλον της ρίζας είναι ανάλογη της αύξησης της αθροιστικής κατανάλωσης νερού από τα φυτά (V_{cw}) και της διαφοράς μεταξύ των εισερχόμενων (C_{iw}) και των απορροφούμενων από τα φυτά (C_{iu}) ποσοτήτων Na ή Cl και αντιστρόφως ανάλογη προς το συνολικό όγκο του θρεπτικού διαλύματος που περιέχεται στο σύστημα (V_{ts}). Στις καλλιέργειες σε θρεπτικό διάλυμα (π.χ. NFT), ο V_{ts} συμπίπτει με τον όγκο του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος ενώ στις καλλιέργειες σε υποστρώματα αντιστοιχεί στο άθροισμα του διαλύματος απορροής και του διαλύματος που συγκρατείται στο υπόστρωμα. Η μαθηματική διατύπωση της παραπάνω σχέσης είναι ως εξής (Savvas *et al.*, 2005):

$$dC_{ir} = dV_{cw}(C_{iw} - C_{iu})/V_{ts} \quad (13)$$

Με αντικατάσταση της C_{iu} στην (13) σύμφωνα με την (12) και με αναδιάταξη, προκύπτει η παρακάτω διαφορική εξίσωση:

$$dC_{ir}/dV_{cw} = (C_{iw} - aC_{ir}^b + c)/V_{ts} \quad (14)$$

Η εξίσωση (14) δεν επιδέχεται κανονική λύση (αναλυτική λύση) αλλά μπορεί να επιλυθεί αριθμητικά (αριθμητική λύση) σύμφωνα με την μέθοδο των Runge – Kutta (Butcher, 1987).

Με την (14) καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων Na και Cl στο θρεπτικό διάλυμα που περιέχεται στο κλειστό υδροπονικό σύστημα (C_{ir}) σε συνάρτηση με μία μόνο μεταβλητή, την αθροιστική κατανάλωση νερού (V_{cw}). Η εξίσωση (14) χρησιμοποιήθηκε

με επιτυχία για την προσομοίωση των συγκεντρώσεων Na και Cl στο διάλυμα ριζοστρώματος σε καλλιέργεια αγγουριάς σε κλειστό υδροπονικό σύστημα (Savvas *et al.*, 2005). Το παραπάνω προσομοίωμα προϋποθέτει ότι οι συγκεντρώσεις Na στο διάλυμα ριζοστρώματος και στο διάλυμα απορροής συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό. Όταν αυτό δεν συμβαίνει, οι τιμές C_{ir} που προβλέπονται μέσω της (14) κυμαίνονται ανάμεσα στις τιμές που επικρατούν στο διάλυμα ριζοστρώματος και αυτών στο διάλυμα απορροής. Στα κλειστά συστήματα καλλιέργειας σε θρεπτικό διάλυμα (πχ. NFT) οι παραπάνω τιμές συμπίπτουν.

Το παραπάνω μοντέλο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα λήψης και εκτέλεσης αποφάσεων (DSS) σε πραγματικό χρόνο με ενσωμάτωση του μοντέλου στο σύστημα, οπότε είναι δυνατόν να ελέγχεται αυτόματα πότε θα απορρίπτεται το διάλυμα απορροής ή το ανακυκλούμενο διάλυμα με βάση την ανώτατη επιτρεπτή συγκέντρωση του ιόντος στο ριζικό περιβάλλον ή ποιο μέρος της ηλεκτρικής αγωγιμότητας αντιστοιχεί στο συσσωρευόμενο ιόν και επομένως ποια θα είναι η τιμή στόχος της EC, ώστε να παρέχονται επαρκείς ποσότητες θρεπτικών στοιχείων στα φυτά (Σάββας, 2012).

Ένας από τους στόχους της παρούσας εργασίας είναι να αναπτυχθούν εμπειρικά μοντέλα απορρόφησης για το μαγγάνιο και τον ψευδάργυρο, σε συνάρτηση με την συγκέντρωση των στοιχείων αυτών στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα. Για την προσομοίωση της συσσώρευσης Mn και Zn στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια αγγουριάς θα μπορούσε να γίνει χρήση αντίστοιχων μοντέλων που προσομοιώνουν την συσσώρευση του Na και του Cl σε κλειστά υδροπονικά συστήματα.

ΜΕΡΟΣ Γ. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

1. Περιγραφή υδροπονικού συστήματος

1.1 Θερμοκήπιο

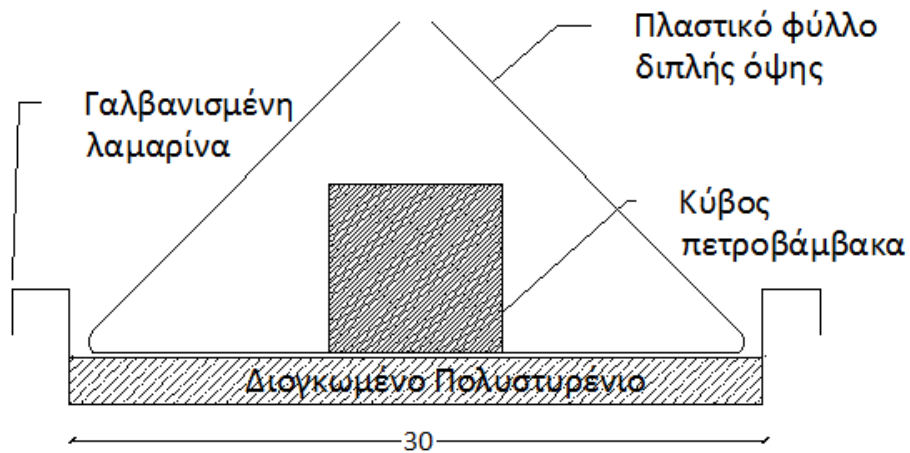
Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις του Ινστιτούτου Υποτροπικών και Ελιάς Χανίων, (35° 29' Β, 24° 2' Α υψόμετρο 8 μ.) σε μεταλλικό μη θερμαινόμενο θερμοκήπιο με κάλυψη από γυαλί. Το θερμοκήπιο διέθετε σύστημα εξαερισμού – μείωσης της θερμοκρασίας με παθητικό αερισμό από παράθυρα οροφής και πλευρικά των οποίων το άνοιγμα ή κλείσιμο ελεγχόταν από θερμοστάτη χώρου. Το έδαφος του θερμοκηπίου ήταν εξ ολοκλήρου καλυμμένο με σπλισμένο σκυρόδεμα ενώ υπήρχε κατά μήκος του θερμοκηπίου, στην ανατολική πλευρά στο εσωτερικό, αυλάκι αποχέτευσης πλάτους 50 cm και βάθους 45-60 cm εντός του οποίου τοποθετήθηκαν τα δοχεία συλλογής και ανακύκλωσης του θρεπτικού διαλύματος. Η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στο θερμοκήπιο ήταν συνεχής καθώς υπήρχε ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος συνδεδεμένο με αυτόματη εκκίνηση σε περίπτωση διακοπής ρεύματος.

1.2 Κατασκευή καναλιών – διάταξη

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων κατασκευάσθηκε εγκατάσταση αποτελούμενη από 18-24 ανεξάρτητα μεταξύ τους υδροπονικά συστήματα τοποθετημένα σε διπλές γραμμές, οι οποίες διαχωριζόταν από ενδιάμεσο διάδρομο. Επιλέχθηκε σύστημα NFT διότι είναι το πλέον κατάλληλο για μελέτη των θρεπτικών απαιτήσεων των φυτών (Hewitt and Watson, 1980) σε σχέση με τα συστήματα με υποστρώματα τα οποία έχουν το μειονέκτημα της συσσώρευσης αλάτων στο υπόστρωμα με αποτέλεσμα να μην γνωρίζουμε την ακριβή σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος στο περιβάλλον της ρίζας.

Τα κανάλια κατασκευάσθηκαν από γαλβανισμένη λαμαρίνα μετά από κατάλληλη διαμόρφωση σε στράντζα ούτως ώστε από ένα φύλλο λαμαρίνας (1 x 2 m) να σχηματιστούν δύο κανάλια πλάτους 30 cm, ύψους 5cm και μήκους 2 μέτρων. Τα διαμορφωμένα φύλλα τοποθετήθηκαν πάνω σε μεταλλικά στηρίγματα ώστε να έχουν κλίση 2% και να είναι δυνατή η επανακυκλοφορία του θρεπτικού διαλύματος (ΘΔ). Πάνω στη λαμαρίνα τοποθετήθηκαν πλάκες διογκωμένου πολυστυρενίου πάχους 2

cm και πλάτους 30 cm ούτως ώστε η θερμοκρασία του διαλύματος να διατηρείται περισσότερο κατά τη διάρκεια της νύχτας (Σχήμα 1). Η τελική διαμόρφωση του καναλιού έγινε με την βοήθεια πλαστικού φύλλου πολυαιθυλενίου διπλής όψης, άσπρο στην εξωτερική επιφάνεια και μαύρο στην εσωτερική, πλάτους 80 cm το οποίο απλώθηκε κατά μήκος του καναλιού ώστε να σχηματιστεί ένα λούκι μέσα στο οποίο κυκλοφορούσε συνεχώς ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα σ' ένα στρώμα που το πάχος του δεν ξεπερνούσε το 1 cm. Πάνω από κάθε κανάλι υπήρχε σύρμα για την πρόσδεση του σπάγκου στήριξης των φυτών και των άκρων του πλαστικού φύλλου.



Σχήμα 1. Τομή καναλιού NFT.

Κάθε κανάλι είχε το δικό του δοχείο, χωρητικότητας 60 λίτρων, για την συλλογή και αναδιανομή του θρεπτικού διαλύματος (δοχείο θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας) καθώς και την δική του αντλία και το δικό του σύστημα σωληνώσεων. Το θρεπτικό διάλυμα αντλούταν από το δοχείο τροφοδοσίας στο κανάλι με ρυθμό $0,4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Τα κανάλια είχαν κλίση 2% ώστε να είναι δυνατή η επανακυκλοφορία του ΘΔ. Η παραπάνω διάταξη συνιστούσε ένα αυτόνομο κλειστό σύστημα επανακυκλοφορίας του θρεπτικού διαλύματος σύμφωνα με τις αρχές της τεχνικής λεπτής στοιβάδας θρεπτικού διαλύματος (Graves, 1983).

Σε κάθε δοχείο διαλύματος τροφοδοσίας υπήρχε ένας πλωτήρας (floater) που ρύθμιζε την αυτόματη συμπλήρωση του διαλύματος που απορροφούταν από τα φυτά. Μέσω του πλωτήρα, η στάθμη του θρεπτικού διαλύματος στο δοχείο θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας (ΘΔΤ) διατηρούταν συνεχώς σε ένα προκαθορισμένο

σταθερό επίπεδο. Για τον σκοπό αυτό υπήρχε και ένα δεύτερο δοχείο με αραιό θρεπτικό διάλυμα (δοχείο θρεπτικού διαλύματος αναπλήρωσης) το οποίο εφεξής θα αναφέρεται ως διάλυμα αναπλήρωσης (ΘΔΑ). Το δοχείο ΘΔΑ ήταν τοποθετημένο σε μεγαλύτερο ύψος από το δοχείο ΘΔΤ, ώστε μέσω βαρύτητας και με την βοήθεια του πλωτήρα να συμπληρώνεται αυτόματα η ποσότητα θρεπτικού διαλύματος που απορροφούσαν τα φυτά στο δοχείο ΘΔΤ.

Πάνω σε κάθε κανάλι, το οποίο είχε μήκος 6,5 m τοποθετήθηκαν 12 σπορόφυτα αγγουριάς *Cucumis sativus* L.- (Σικυός ο ήμερος) υβριδίου Myrthos RZ., τα οποία κλαδεύτηκαν σύμφωνα με το σύστημα της ομπρέλας (Klieber *et al.*, 1993) και υποστηλώθηκαν με πλαστικό σπάγγο που δέθηκε σε ύψος 2,5 m πάνω από τα κανάλια σε οριζόντιο σύρμα.



Εικόνα 1. Άποψη της πειραματικής εγκατάστασης.

1.3 Θρεπτικά διαλύματα

I. Θρεπτικό διάλυμα για σπορόφυτα

Μετά την φύτευση των σπόρων στους κύβους πετροβάμβακα εφαρμόστηκαν ελαφρά ποτίσματα με θρεπτικό διάλυμα (διάλυμα σπορόφυτων), ώστε τα φυτά να μη

στερηθούν νερό και θρεπτικά στοιχεία. Στον πίνακα 1 δίνεται η σύνθεση του διαλύματος που χρησιμοποιήθηκε στο σπορείο:

Πίνακας 1. Σύνθεση θρεπτικού διαλύματος για το πότισμα των σπορόφυτων.

Μακροστοιχείο	(mmol l ⁻¹)	Ιχνοστοιχείο	(μmol l ⁻¹)
Ca ²⁺	9,4	Fe	15,0
Mg ²⁺	4,0	Mn	10,0
K ⁺	6,50	Zn	5,0
NH ₄ ⁺	1,0	Cu	0,8
SO ₄ ²⁻	4,56	B	40,0
NO ₃ ⁻	15,0	Mo	0,5
H ₂ PO ₄ ⁻	1,0		

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του παραπάνω διαλύματος ήταν 2,2 dS m⁻¹ και το pH ρυθμίστηκε στο 5,6 με προσθήκη νιτρικού οξέος 68%.

II. Εναρκτήριο θρεπτικό διάλυμα (ΕΘΔ)

Αρχικά τα δοχεία ΘΔΤ πληρώθηκαν με ένα θρεπτικό διάλυμα το οποίο εφεξής θα καλείται **εναρκτήριο θρεπτικό διάλυμα (ΕΘΔ)**. Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στο εναρκτήριο θρεπτικό διάλυμα ήταν οι ίδιες σε όλα τα δοχεία (πειραματικά τεμάχια) συμπεριλαμβανομένων και των συγκεντρώσεων μαγγανίου και ψευδαργύρου. Η σύσταση του εναρκτήριου θρεπτικού διαλύματος παρατίθεται στον Πίνακα 2:

Πίνακας 2. Σύνθεση εναρκτήριου θρεπτικού διαλύματος (ΕΘΔ)

Μακροστοιχείο	(mmol l ⁻¹)	Ιχνοστοιχείο	(μmol l ⁻¹)
Ca ²⁺	11,0	Fe	20,0
Mg ²⁺	4,50	Mn	12,0
K ⁺	7,50	Zn	5,0
NH ₄ ⁺	1,0	Cu	1,0
SO ₄ ²⁻	5,65	B	40,0
NO ₃ ⁻	17,0	Mo	0,5
H ₂ PO ₄ ⁻	1,0		

Η αγωγιμότητα και το pH του παραπάνω διαλύματος ήταν $2,5 \text{ dS m}^{-1}$ και 5,6 αντίστοιχα.

III. Θρεπτικό διάλυμα αναπλήρωσης ΘΔΑ I

Για να διατηρηθούν οι συγκεντρώσεις στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα (ΑΘΔ) σε σχετικά σταθερές τιμές (εκτός αυτών του Mn και του Zn), ένα διάλυμα αναπλήρωσης (ΘΔΑ I) μικρότερης αγωγιμότητας εισερχόταν αυτόματα στο υδροπονικό σύστημα, σε όλες τις πειραματικές μονάδες με την βοήθεια ενός πλωτήρα ώστε να αναπληρώνονται οι απώλειες σε νερό και θρεπτικά στοιχεία από την απορρόφηση των φυτών. Η σύνθεση του διαλύματος (εκτός των συγκεντρώσεων Mn και Zn που ήταν διαφορετικές σε κάθε μεταχείριση) φαίνεται στον Πίνακα 3:

Πίνακας 3. Σύνθεση θρεπτικού διαλύματος αναπλήρωσης I (ΘΔΑ I) εκτός των συγκεντρώσεων Mn και Zn

Μακροστοιχείο	(mmol l ⁻¹)	Ιχνοστοιχείο	(μmol l ⁻¹)
Ca ²⁺	6,0	Fe	15,0
Mg ²⁺	2,60		
K ⁺	8,0		
NH ₄ ⁺	1,3	Cu	0,75
SO ₄ ²⁻	2,55	B	25,0
NO ₃ ⁻	13,75	Mo	0,5
H ₂ PO ₄ ⁻	1,25		

IV. Θρεπτικό διάλυμα αναπλήρωσης ΘΔΑ II

Επειδή η συνεχής ανακύκλωση του ΘΔ είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της αγωγιμότητας του ΑΘΔ λόγω συσσώρευσης αλάτων που προέρχονται από την μη εξ ολοκλήρου απορρόφηση κάποιων θρεπτικών στοιχείων που εισέρχονται στο σύστημα μέσω του ΘΔΑ, ένα δεύτερο ΘΔΑ με μειωμένες συγκεντρώσεις μακροστοιχείων και ίδιες συγκεντρώσεις ιχνοστοιχείων με το ΘΔΑ I χρησιμοποιήθηκε, ώστε να εμποδιστεί η αύξηση της αγωγιμότητας του ΑΘΔ. Στον Πίνακα 4 δίνεται η σύνθεση του ΘΔΑ II.

Πίνακας 4. Σύνθεση θρεπτικού διαλύματος αναπλήρωσης II (ΘΔΑ II) εκτός των συγκεντρώσεων Mn και Zn

Μακροστοιχείο	(mmol l ⁻¹)	Ιχνοστοιχείο	(μmol l ⁻¹)
Ca ²⁺	3,25	Fe	15,0
Mg ²⁺	1,75		
K ⁺	6,75		
NH ₄ ⁺	1,25	Cu	0,75
SO ₄ ²⁻	1,65	B	25,0
NO ₃ ⁻	10,0	Mo	0,5
H ₂ PO ₄ ⁻	1,0		

Ο όγκος του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος σε όλες τις πειραματικές μονάδες ήταν 6 λίτρα ανά φυτό.

1.3. Παρασκευή των θρεπτικών διαλυμάτων

Για την παρασκευή των αραιών θρεπτικών διαλυμάτων που χορηγήθηκαν στα φυτά χρησιμοποιήθηκαν 9 δοχεία πυκνών διαλυμάτων όγκου 50 L για τη σύνθεση των οποίων ελήφθη υπόψη η περιεκτικότητα σε θρεπτικά στοιχεία του νερού αρδεύσεως της περιοχής η σύνθεση του οποίου δίνεται παρακάτω (πίνακας 5):

Πίνακας 5. Χημική ανάλυση του νερού αρδεύσεως

pH	8,12	Σκληρότητα (Γερμ. Βαθμοί)	7,63 mg CaO/100ml
EC	0,26 dS/m	Σκληρότητα (Γαλ. Βαθμοί)	13,63 mg CaCO ₃ /100ml
SAR	0,17	Σύνολο αλάτων	166,4 mg/l

Μακροστοιχείο	(mmol l ⁻¹)	mg/l
Ασβέστιο	0,905	36,2
Μαγνήσιο	0,455	11
Κάλιο	0,01	0,449
Νάτριο	0,19	4,46
Χλώριο	0,6	21,27
Θειϊκά	0,52	50
Διττανθρακικά (HCO ₃ ⁻)	2,4	146.4
Νιτρικά	0,03	0,4
Φώσφορος	0,01	0,177

Ιχνοστοιχείο	(μmol l ⁻¹)	mg/l
Σίδηρος	0,82	0,046
Μαγγάνιο	0,05	0,003
Ψευδάργυρος	0,28	0,018
Χαλκός	0	0
Βόριο	0,09	0,001
Μολυβδαίνιο	0	0

Από τις ποσότητες λιπασμάτων που θα έπρεπε να προστεθούν σε αποσταγμένο νερό για να προκύψουν τα θρεπτικά διαλύματα αφαιρέθηκαν οι ποσότητες που υπήρχαν στο νερό άρδευσης. Χρησιμοποιήθηκαν 9 δοχεία για την παρασκευή των παρακάτω πυκνών διαλυμάτων:

1. Δοχείο πυκνού διαλύματος A1 (λιπάσματα Ca, Fe, NH₄⁺) για την παρασκευή του εναρκτήριου θρεπτικού διαλύματος στα δοχεία ΘΔΤ.
2. Δοχείο πυκνού διαλύματος B1 (λιπάσματα SO₄²⁻, H₂PO₄⁻) για την παρασκευή εναρκτήριου θρεπτικού διαλύματος στα δοχεία ΘΔΤ.
3. Δοχείο πυκνού διαλύματος A2 (λιπάσματα Ca, Fe, NH₄⁺) για την παρασκευή διαλύματος αναπλήρωσης I στα δοχεία ΘΔΑ.
4. Δοχείο πυκνού διαλύματος B2 (λιπάσματα SO₄²⁻, H₂PO₄⁻) για την αρχική παρασκευή διαλύματος αναπλήρωσης I στα δοχεία ΘΔΑ.

5. Δοχείο πυκνού διαλύματος A3 (λιπάσματα Ca, Fe, NH_4^+) για την παρασκευή διαλύματος αναπλήρωσης II στα δοχεία ΘΔΑ.
6. Δοχείο πυκνού διαλύματος B3 (λιπάσματα SO_4^{2-} , H_2PO_4^-) για την αρχική παρασκευή διαλύματος αναπλήρωσης II στα δοχεία ΘΔΑ.
7. Δοχείο αραιού διαλύματος νιτρικού οξέως 5% για την ρύθμιση του pH σε όλα τα πειραματικά τεμάχια.
8. Δοχείο πυκνού διαλύματος Mn (MnSO_4) για την επίτευξη των διαφορετικών επιπέδων Mn στα θρεπτικά διαλύματα.
9. Δοχείο πυκνού διαλύματος Zn (ZnSO_4) για την επίτευξη των διαφορετικών επιπέδων Zn στα θρεπτικά διαλύματα.

Σε κάθε δοχείο ΘΔΑ υπήρχε παροχή νερού, ώστε να είναι δυνατή η επιτόπια παρασκευή νέου θρεπτικού διαλύματος αναπλήρωσης όταν εξαντλούταν το παλιό με προσθήκη νερού και των κατάλληλων ποσοτήτων πυκνών διαλυμάτων A2, B2 ή A3 και B3.

Οι ποσότητες λιπασμάτων που απαιτήθηκαν για την παρασκευή των πυκνών διαλυμάτων A1, B1 (εναρκτήριο θρεπτικό διάλυμα), καθώς και A2, B2, A3, B3 (θρεπτικά διαλύματα αναπλήρωσης) παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6. Ποσότητες λιπασμάτων που απαιτήθηκαν για την παρασκευή των πυκνών διαλυμάτων.

	ΘΔΤ	ΘΔΑ Ι	ΘΔΑ ΙΙ	Μονάδα μέτρησης
Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)	2,52	1,90	1,40	dS/m
pH	5,6	5,6	5,6	
Πυκνό διάλυμα Α	50	50	50	Litres
Νιτρικό Ασβέστιο $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	5,000	2,298	0,813	Kg
Νιτρικό Κάλιο KNO_3	1,472	1,901	1,598	Kg
Νιτρική Αμμωνία NO_3NH_4	0,030	0,350	0,440	Kg
Χηλικός Σίδηρος 6% Fe	0,093	0,070	0,070	Kg
Πυκνό διάλυμα Β	50	50	50	Litres
Νιτρικό Κάλιο KNO_3	1,472	1,901	1,598	Kg
Θειικό Μαγνήσιο MgSO_4	2,391	1,221	0,697	Kg
Θειικό Κάλιο K_2SO_4	0,731	0,208	0,186	Kg
Φωσφορικό Οξύ H_3PO_4	0,341	0,427	0,341	Litres
Νιτρικό Οξύ HNO_3	0,282	0,200	0,282	Litres
Θειικό Μαγγάνιο MnSO_4 *	10,14	8,45	8,45	g
Θειικός Ψευδάργυρος ZnSO_4 *	4,99	3,55	3,55	g
Θειικός Χαλκός CuSO_4	1,22	0,91	0,91	g
Βορικό Οξύ HBO_3	12,36	7,73	7,73	g
Επταμολυβδαινικό Αμμώνιο	0,44	0,44	0,44	g

* Οι ποσότητες του θειικού μαγγανίου και του θειικού ψευδαργύρου διέφεραν ανάλογα με το πείραμα

Οι ποσότητες λιπασμάτων που απαιτήθηκαν για την παρασκευή πυκνών διαλυμάτων α) νιτρικού οξέως, β) MnSO_4 και γ) ZnSO_4 δίνονται στον Πίνακα 7:

Πίνακας 7. Παρασκευή πυκνών διαλυμάτων α) νιτρικού οξέως, β) MnSO₄, γ) ZnSO₄.

Πυκνό διάλυμα	Ποσότητα λιπάσματος	Μονάδα μέτρησης	Τελικός όγκος πυκνού διαλύματος (λίτρα)
HNO ₃	0,3	Λίτρα (68%)	50
MnSO ₄	42,25	g	50
ZnSO ₄	28,75	g	50

1.4. Έλεγχος του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος

Για τον έλεγχο αποκλίσεων στις τιμές του pH και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας γινόταν καθημερινά μετρήσεις με φορητό όργανο Hanna instruments μοντέλο HI98130 waterproof το οποίο επέτρεπε την παράλληλη μέτρηση pH, EC και θερμοκρασίας. Για τη βαθμονόμηση του pH χρησιμοποιήθηκαν πρότυπα διαλύματα pH=4, 7, και 10. Η διόρθωση του pH γινόταν με προσθήκη κατάλληλης ποσότητας αραιωμένου (5%) νιτρικού οξέος.

1.5. Μέτρηση κατανάλωσης θρεπτικού διαλύματος αναπλήρωσης

Η μέτρηση της κατανάλωσης του θρεπτικού διαλύματος αναπλήρωσης γινόταν σε καθημερινή βάση κάθε πρωί με μέτρηση της στάθμης του διαλύματος στο δοχείο του ΘΔΑ. Η μέτρηση γινόταν με πλαστική ράβδο βαθμονομημένη με κλίμακα ούτως ώστε κάθε υποδιαίρεση να αντιστοιχεί σε ένα λίτρο. Τα δοχεία ΘΔΑ είχαν χωρητικότητα 75 λίτρων όσες και οι υποδιαίρεσεις της ράβδου. Όταν η στάθμη του δοχείου ήταν πολύ χαμηλή γινόταν προσθήκη νερού και πυκνών διαλυμάτων A2, B2 ή A3 και B3 μέχρι πληρώσεως του δοχείου.

1.6. Καταγραφή θερμοκρασίας

Καθημερινά γινόταν καταγραφή της θερμοκρασίας του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος ταυτόχρονα με την μέτρηση του pH και της αγωγιμότητας. Η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου καταγραφόταν κάθε 30 λεπτά μέσω αισθητήρα θερμοκρασίας που διέθετε και καταγραφικό HOBO Temp (Onset computer corporation).

2. Φυτικό υλικό - Συνθήκες ανάπτυξης

2.1. Φυτικό υλικό

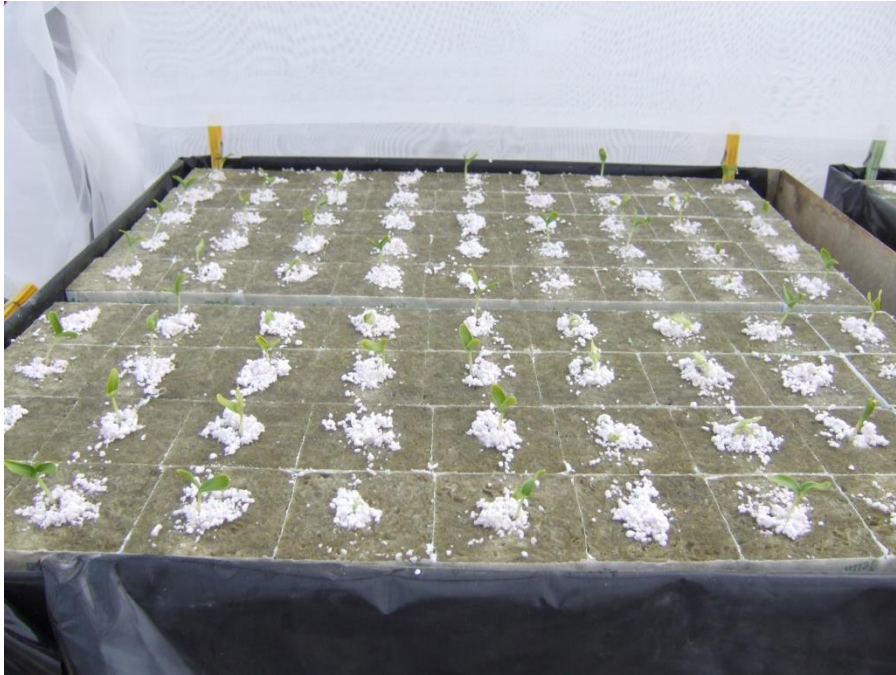
Για την διεξαγωγή των πειραμάτων τοξικότητας – έλλειψης και ανάπτυξης μοντέλων απορρόφησης ιχνοστοιχείων στην αγγουριά, επιλέχθηκε το υβρίδιο Myrthos (24-122 RZ®) του οίκου Rijk Zwaan Ολλανδίας το οποίο είναι κατάλληλο για φύτευση από Ιανουάριο μέχρι Σεπτέμβριο με πολύ πρώιμη παραγωγή. Έχει καλή προσαρμοστικότητα στις συνθήκες της Κρήτης καθώς κατέχει μεγάλο ποσοστό μεταξύ των καλλιεργούμενων υβριδίων αγγουριάς για παραγωγή σε θερμοκήπιο. Παράγει 1-2 καρπούς ανά μασχάλη οι οποίοι είναι ευθύγραμμοι, μακριοί με σκούρο πράσινο χρώμα. Χαρακτηρίζεται μέτριας ζωηρότητας με αραιά φύλλα. Το παραπάνω υβρίδιο παρουσιάζει μεγάλη ανθεκτικότητα στο Ωίδιο (*Sphaerotheca fuliginea* or *Podospaeria xanthii*) και στο κλαδοσπόριο (*Cladosporium cucumerinum*), ανθεκτικότητα στον ιό του μωσαϊκού της αγγουριάς (Cucumber mosaic cucumovirus, CMV), ανθεκτικότητα στον ιό των κίτρινων νεύρων της αγγουριάς (Cucumber vein yellowing ipomovirus, CVYV) και στο κάψιμο κορυφής.

Πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε δύο πειραματικές περιόδους,. Η πρώτη πειραματική περίοδος, κατά την οποία μελετήθηκε η τοξικότητα μαγγανίου και ψευδαργύρου, αφορούσε το διάστημα από Σεπτέμβριο έως Δεκέμβριο 2007 και η δεύτερη που αφορούσε την ανάπτυξη μοντέλων απορρόφησης, από το Σεπτέμβριο 2009 έως Ιανουάριο 2010.

2.2. Σπορά

Οι σπόροι της αγγουριάς σπάρθηκαν σε κύβους πετροβάμβακα (Grodan Delta) διαστάσεων 7,5x7,5x7,5 cm οι οποίοι είχαν στην πάνω επιφάνεια τρύπα διαμέτρου 2 cm για την τοποθέτηση του σπόρου. Ο σπόρος καλύφθηκε με μικρή ποσότητα περλίτη. Τα παραπάνω υλικά επιλέχθηκαν διότι είναι αδρανή, δεν περιέχουν αφομοιώσιμα θρεπτικά συστατικά που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ανόργανη θρέψη των φυτών ενώ εξασφαλίζουν επαρκή υγρασία και αερισμό στα νεαρά φυτά. Για την βλάστηση των σπόρων οι κύβοι πετροβάμβακα τοποθετήθηκαν σε τετράγωνες μεταλλικές λεκάνες από γαλβανισμένη λαμαρίνα διαστάσεων 80x80x8 cm (πλάτος x μήκος x ύψος) οι οποίες καλύφθηκαν με πλαστικό φύλλο μαύρου χρώματος ώστε το

θρεπτικό διάλυμα με το οποίο ποτίζονταν τα σπορόφυτα να μην έρχεται σε επαφή με το μέταλλο (εικόνα 2). Το πότισμα των σποροφύτων γινόταν με εισαγωγή του θρεπτικού διαλύματος στη λεκάνη και ταυτόχρονη διάχυσή του σε όλους τους κύβους. Η τοποθέτηση στη λεκάνη εξασφάλισε ομοιόμορφη κατανομή του διαλύματος ποτίσματος με αποτέλεσμα να υπάρχει ομοιομορφία στην ανάπτυξη των φυτών.



Εικόνα 2. Μεταλλική λεκάνη τοποθέτησης κύβων πετροβάμβακα

2.3. Μεταφύτευση – αποστάσεις φύτευσης

Η μεταφύτευση σε όλα τα πειράματα έγινε στο στάδιο της εμφάνισης του 4-5^{ου} πραγματικού φύλλου όταν τα φυτά είχαν μεγαλώσει αρκετά και οι ρίζες είχαν γεμίσει τον κύβο πετροβάμβακα. Φυτά με ανάπτυξη που διέφερε σημαντικά από το μέσο όρο απορρίφθηκαν. Η μεταφύτευση των σποροφύτων στα κανάλια NFT έγινε με μεγάλη προσοχή ώστε να μην τραυματιστούν τα νεαρά φυτά και η τροφοδοσία των καναλιών με ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα άρχισε αμέσως μετά τη μεταφύτευση καθώς τα σπορόφυτα είναι πολύ ευαίσθητα στην έλλειψη νερού.

Η φύτευση έγινε σε διπλές γραμμές που απείχαν μεταξύ τους 50 cm ενώ ο διάδρομος μεταξύ των διπλών γραμμών ήταν 110 cm. Τα φυτά επί των γραμμών απείχαν μεταξύ τους 50 cm. Από αυτές τις αποστάσεις προέκυψε πυκνότητα φύτευσης 1250 φυτά ανά στρέμμα.

2.4. Υποσύλωση και κλάδεμα

Για την υποσύλωση εφαρμόστηκε το κατακόρυφο σύστημα της «ομπρέλας» το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως και συνιστάται για τις ελληνικές συνθήκες. Σύμφωνα με το σύστημα αυτό, τα φυτά υποστυλώθηκαν όρθια και ο κεντρικός βλαστός αφέθηκε να αναπτυχθεί μέχρι το οριζόντιο σύρμα που βρίσκεται σε ύψος 1,8-1,9 μέτρα πάνω από το κανάλι NFT. Τα φυτά τυλίχθηκαν γύρω από πλαστικό σπάγκο που το ένα του άκρο στερεώθηκε κάτω στο σύρμα που βρίσκεται ακριβώς πάνω από το κανάλι, και χρησιμοποιείται για την αναδίπλωση του πλαστικού φύλλου του καναλιού, ενώ το άλλο του άκρο πάνω δέθηκε στο οριζόντιο σύρμα. Όταν η κορυφή των φυτών έφτανε και ξεπερνούσε το οριζόντιο σύρμα κατά 2 φύλλα γινόταν αφαίρεση της κορυφής, στερέωση του κεντρικού βλαστού και κάμψη του παράλληλα προς το σύρμα.

Από το κανάλι και σε ύψος 0,5 m αφαιρέθηκαν όλοι οι πλάγιοι βλαστοί και καρποί. Από το ύψος αυτό και πάνω αφαιρέθηκαν οι πλευρικοί βλαστοί και αφέθηκε ένας καρπός σε κάθε φύλλο του κεντρικού βλαστού μέχρι το οριζόντιο σύρμα. Πάνω από το οριζόντιο σύρμα αφέθηκαν δύο βλαστοί να μεγαλώσουν και να πέσουν προς τα κάτω, ένας από κάθε πλευρά του φυτού σε σχήμα «ομπρέλας». Οι καρποί στη βάση των δύο πλάγιων αφαιρέθηκαν και οι βλαστοί κορφολογήθηκαν σε ύψος 50 cm από το πάτωμα του θερμοκηπίου. Πάνω στους δύο πλάγιους αφαιρέθηκαν όλοι οι βλαστοί και αφέθηκε ένας καρπός κάθε δύο φύλλα. Το κλάδεμα γινόταν μία φορά κάθε εβδομάδα μέχρι την έναρξη της συγκομιδής. Στη συνέχεια γινόταν σε πιο αραιά διαστήματα.

2.5. Συγκομιδή

Η συγκομιδή γινόταν δύο φορές την εβδομάδα, όταν ο καρπός ήταν άγουρος αλλά είχε αποκτήσει εμπορεύσιμο μέγεθος (25-35 cm), διάμετρο 5-7 cm και είχε το χαρακτηριστικό χρώμα της ποικιλίας (σκούρο πράσινο). Αμέσως μετά την συγκομιδή γινόταν ατομική ζύγιση, μέτρηση μήκους και διαλογή των καρπών σε ποιοτικές κατηγορίες Extra, Class I και Class II σύμφωνα με τον κοινοτικό κανονισμό (EEC) No 1677/88.

2.6. Φυτοπροστασία

Η εποχή καλλιέργειας (Σεπτέμβριος – Ιανουάριο) και ο καλός αερισμός του θερμοκηπίου συνέβαλε στον καλύτερο έλεγχο των εχθρών και ασθενειών κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου. Για τον έλεγχο των εχθρών εφαρμόστηκαν με την εμφάνιση των πρώτων συμπτωμάτων το εντομοκτόνο Admiral 10 EC (Pyriproxifen, 10% β/ο) για τον αλευρώδη (*Trialeurodes vaporariorum*), το Εντομοκτόνο Privelege 75 WP (cyromazine) για την καταπολέμηση του φυλλορύκτη (*Lyriomyza* spp.) και το εντομοκτόνο Decis 2,5 EC (deltamethrine 2,5% β/ο) για την καταπολέμηση του θρίπα (*Thrips tabaci*). Για τον έλεγχο των ασθενειών εφαρμόστηκαν εναλλακτικά προληπτικοί ψεκασμοί με τα μυκητοκτόνα ORTIVA 25 SC (azoxystrobin 25% β/ο) και Antracol 65 WP (propineb 65%) για το ωίδιο (*Erysiphe cichooacearum*, *Sphaerotheca fuliginea*) και τον περονόσπορο (*Pseudoperonospora cubensis*) αντίστοιχα.

3. Προσδιορισμός των θρεπτικών στοιχείων στα υδροπονικά διαλύματα

3.1. Λήψη δειγμάτων θρεπτικού διαλύματος

Η λήψη των δειγμάτων του εναρκτήριου θρεπτικού διαλύματος (ΕΘΔ), του θρεπτικού διαλύματος αναπλήρωσης (ΘΔΑ) και του θρεπτικού διαλύματος που ήταν σε συνεχή επανακυκλοφορία μέσα στα κανάλια (ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα, ΑΘΔ) γινόταν από τα αντίστοιχα δοχεία και λαμβάνονταν δείγματα 200 ml σε πλαστικά μπουκαλάκια ίδιας χωρητικότητας. Τα δείγματα τοποθετούνταν σε ψυγείο (4 °C) μέχρι την πραγματοποίηση της ανάλυσης.

3.2. Προσδιορισμός νιτρικού αζώτου($\text{NO}_3\text{-N}$)

Ο προσδιορισμός του νιτρικού αζώτου πραγματοποιήθηκε με φασματοφωτόμετρο (HITACHI model U2001) σε μήκος κύματος 210 nm και με διόρθωση για τα οργανικά συστατικά σε μήκος κύματος 275 nm (Hoather and Rackham, 1959, Armstrong, 1963). Τα δείγματα αραιώνονταν 100 φορές.

3.3. Προσδιορισμός φωσφόρου (P)

Εφαρμόστηκε η μέθοδος του βαναδομολυβδαινικού αμμωνίου (Vanadate – molybdate yellow method) σύμφωνα με τους Chapman and Pratt, (1961) η οποία

βασίζεται στο ότι οι βαναδικές, μολυβδαινικές και ορθοφωσφορικές ενώσεις αντιδρούν μεταξύ τους σε όξινο περιβάλλον και δίνουν ένα σύμπλοκο με κίτρινο χρώμα. Η ένταση του χρώματος είναι ανάλογη με την περιεκτικότητα του P στο διάλυμα εντός ορισμένων ορίων. Η μετρήσεις γινόταν σε φασματοφωτόμετρο Hitachi, model U2001 σε μήκος κύματος 470 nm.

3.4. Προσδιορισμός καλίου (K)

Για τον προσδιορισμό του καλίου στα θρεπτικά διαλύματα χρησιμοποιήθηκε η φλογοφωτομετρία η οποία στηρίζεται στο γεγονός ότι η ένταση της χαρακτηριστικής ακτινοβολίας ενός στοιχείου είναι ανάλογη με τον αριθμό των διεγερμένων ατόμων στη φλόγα και αντίστοιχα αυτά είναι ανάλογα με τη συγκέντρωση του υπό μέτρηση στοιχείου στο διάλυμα. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε αναφέρεται από τον Τσικαλά, (1997) και χρησιμοποιήθηκε φλογοφωτόμετρο JENWAY PFP 7 (Jenway Ltd).

3.5. Προσδιορισμός μαγνησίου (Mg), ασβεστίου (Ca) και ιχνοστοιχείων (Mn, Zn, Fe, Cu)

Ο προσδιορισμός του μαγνησίου και του ασβεστίου γινόταν με φασματοφωτομετρία ατομικής απορρόφησης (Εικ. 3). Τα δείγματα αραιώνονταν 100 φορές ώστε η συγκέντρωση του Mg και του Ca να είναι στην κλίμακα μέτρησης του οργάνου. Για την παρασκευή τόσο των standards όσο και των άγνωστων διαλυμάτων (δειγμάτων) προστέθηκε ποσότητα διαλύματος La (La_2O_3) 50.000 ppm για να εμποδιστεί ο ιονισμός των ατόμων του μαγνησίου και του ασβεστίου.

Ο προσδιορισμός των ιχνοστοιχείων (Mn, Zn, Fe, Cu) γινόταν με φασματοφωτομετρία ατομικής απορρόφησης χωρίς αραιώση των δειγμάτων με εξαίρεση τα δείγματα που προέρχονταν από επεμβάσεις με προσθήκη Mn ή/και Zn.



Εικόνα 3. Φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης Perkin Elmer 3300

4. Προσδιορισμός των θρεπτικών στοιχείων στους φυτικούς ιστούς της αγγουριάς.

4.1. Λήψη δειγμάτων και προετοιμασία για ανάλυση

Για τον προσδιορισμό των θρεπτικών στοιχείων στους φυτικούς ιστούς της αγγουριάς λαμβάνονταν δείγματα φύλλων, ρίζας και καρπών. Τα φύλλα που συλλέχτηκαν ως δείγματα ήταν τα πιο πρόσφατα πλήρως ανεπτυγμένα. Δείγματα ρίζας συλλέχθηκαν από το κανάλι NFT με αφαίρεση ενός τμήματος της ρίζας βάρους 200-300 γρ.. Οι καρποί συλλέχθηκαν ως δείγματα για χημικές αναλύσεις όταν ήταν εμπορικά ώριμοι. Τα δείγματα τοποθετούνταν σε σακούλες και εν συνεχεία γινόταν μεταφορά τους στο εργαστήριο για ζύγιση του νωπού βάρους. Μετά την ζύγιση, τα δείγματα ξεπλένονταν με απιονισμένο νερό ώστε να απομακρυνθούν, τυχόν ακαθαρσίες και ακολουθούσε η ξήρανσή τους σε φούρνο ξήρανσης Heraeus D63450.

4.2. Προσδιορισμός νωπού και ξηρού βάρους

Ο προσδιορισμός του νωπού βάρους γινόταν με ζύγιση των δειγμάτων αμέσως μετά την μεταφορά τους στο εργαστήριο σε ζυγαριά ακριβείας δύο δεκαδικών

ψηφίων (SCALTEC model SBA 52). Ο προσδιορισμός του ξηρού βάρους γινόταν με ζύγιση στην ίδια ζυγαριά μετά από ξήρανση των δειγμάτων τους 80 °C και μέχρι σταθερό βάρος συνήθως για 24-48 ώρες.

4.3. Προσδιορισμός των θρεπτικών στοιχείων P, K, Ca, Mg, Zn, Fe, Mn

Για τον προσδιορισμό των ανωτέρω στοιχείων, τα αποξηραμένα δείγματα των φυτικών ιστών αλέθονταν σε μύλο άλεσης φυτικών ιστών (Wiley). Μετά την άλεση τοποθετούνταν ξανά στο φούρνο ξήρανσης στους 80 °C για 24 ώρες ώστε να απομακρυνθεί, τυχόν, υγρασία. Κατόπιν, λαμβανόταν ποσότητα 1 γρ. κονιορτοποιημένου ιστού από κάθε δείγμα, σε κάψες πορσελάνης, για αποτέφρωση σε κλίβανο στους 550 °C για 5 ώρες. Τα δείγματα αφήνονταν να κρυώσουν και μετά την προσθήκη διαλύματος πυκνού υδροχλωρικού οξέος (37%) αραιωμένου 20% τοποθετούνταν σε θερμή πλάκα και ακολουθούσε διήθηση του διαλύματος με διηθητικό χαρτί (Whatman No 1) με προσθήκη απιονισμένου νερού μέχρι όγκου 25 ml. Το διήθημα όγκου 25 ml τοποθετούνταν σε πλαστικά μπουκαλάκια των 50 ml.



Εικόνα 4. Φούρνοι αποτέφρωσης που χρησιμοποιήθηκαν για την αποτέφρωση των δειγμάτων φυτικών ιστών

Για τον προσδιορισμό των K, Mg, Ca και P απαιτήθηκε αραίωση κατά 200 φορές. Για τον Zn, το Fe, το Mn και το Cu δεν απαιτήθηκε αραίωση με εξαίρεση τα δείγματα που προέρχονταν από επεμβάσεις με υψηλές συγκεντρώσεις Mn ή Zn για τα οποία ήταν αναγκαία αραίωση κατά 10-50 φορές.

Ο προσδιορισμός του καλίου πραγματοποιήθηκε με φλογοφωτόμετρο (JENWAY PFP 7, Jenway Ltd) ενώ των Mg, Ca, Zn, Fe, Mn και Cu με φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης (Perkin Elmer, model 3300) όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.3. Ο προσδιορισμός του φωσφόρου στο διάλυμα που προέκυψε έγινε με τη μέθοδο του βαναδομολυβδαινικού αμμωνίου που περιγράφεται στην παράγραφο 3.3.3.

5. Προσδιορισμός των παραμέτρων ανταλλαγής των αερίων

Η αγγουριά ανήκει στα φυτά με φωτοσυνθετικό μηχανισμό τύπου C3. Η ένταση της φωτοσύνθεσης, καθώς και άλλοι παράμετροι όπως η αγωγιμότητα των στομάτων, η διαπνοή και η μεσοκυττάρια συγκέντρωση CO₂ (παράμετροι ανταλλαγής των αερίων) καθορίζονται από περιβαλλοντικούς και φυτικούς παράγοντες, όπως η ένταση του φωτός στην περιοχή της φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας (PAR), το έλλειμμα της πίεσης υδρατμών της ατμόσφαιρας (VPD) και η συγκέντρωση των αλάτων στο ριζικό σύστημα (Sterieff and Klbus, 2006). Ο προσδιορισμός της φωτοσυνθετικής λειτουργίας θεωρείται ως σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό της αντίδρασης της αγγουριάς σε συνθήκες υπερβολικής παροχής ή έλλειψης ιχνοστοιχείων.

Για τον προσδιορισμό του ρυθμού φωτοσύνθεσης (A, σε $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$), της στοματικής αγωγιμότητας (Gs σε $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$), του ρυθμού διαπνοής (E σε $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$) και της συγκέντρωσης CO₂ στους μεσοκυττάριους χώρους (Ci σε $\mu\text{L CO}_2$ ανά L αέρα) χρησιμοποιήθηκε το φορητό σύστημα LI-6400 Photosynthesis Meter (LI-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska, USA, Εικ. 5 α και β). Η συσκευή κάνει χρήση της αρχής της ανταλλαγής των αερίων και διακρίνεται σε τρία, κυρίως, μέρη:

1. Την κεντρική κονσόλα χειρισμού η οποία περιλαμβάνει μικροεπεξεργαστή για αποθήκευση και ανάλυση των δεδομένων, πληκτρολόγιο και οθόνη LCD. Στην κεντρική κονσόλα είναι προσαρτημένοι δύο σωλήνες εκ' των οποίων ο ένας περιέχει ποσότητα ξηραντικής ουσίας (desiccant-drierite) ικανής να συγκρατεί τους υδρατμούς

και ο άλλος φέρει ουσία ικανή να δεσμεύει το CO₂ (CO₂ scrubber-Mg(ClO₄)₂), μέσω των οποίων ρυθμίζονται οι αναλογίες των δύο αερίων στο εσωτερικό του θαλάμου φύλλου. Επίσης, στην κονσόλα τοποθετείται και η πηγή του CO₂ (αμπούλα συμπιεσμένου CO₂)

2. Τον θάλαμο φύλλου (leaf chamber) ο οποίος έχει επιφάνεια 6 cm² και είναι εφοδιασμένος με αισθητήρες καταγραφής της θερμοκρασίας φύλλου και αέρα, της έντασης του φωτός καθώς και των επιπέδων CO₂, H₂O εντός του θαλάμου. Επίσης φέρει εξωτερικό αισθητήρα της PAR και μικρό ανεμιστήρα. Ο θάλαμος φύλλου κλείνει αεροστεγώς, εξασφαλίζοντας την επιθυμητή αναλογία των αερίων στο εσωτερικό του, χωρίς να επηρεάζεται από τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του φύλλου.

3. Τους αναλυτές αερίων με την χρήση υπερύθρων (Infrared Gas Analyzers - IRGA's) οι οποίοι, μέσω αντλίας μεταφοράς του μίγματος αέρα από τον θάλαμο φύλλου, προσδιορίζουν την περιεκτικότητα του μίγματος σε CO₂ και H₂O.

α



β



Εικόνα 5. Κεντρική κονσόλα χειρισμού της συσκευής φωτοσύνθεσης LI-6400 (α) και του θαλάμου φύλλου (β)

Με την εισαγωγή του φύλλου εντός του θαλάμου και υπό ελεγχόμενες συνθήκες CO₂, υγρασίας, θερμοκρασίας και PAR, προκύπτει μείωση της συγκέντρωσης του CO₂ στον αέρα του θαλάμου, λόγω της πρόσληψης του CO₂ από το φύλλο, και αύξηση της συγκέντρωσης σε υδρατμούς, εξ αιτίας της διαπνοής. Οι μεταβολές της αναλογίας των αερίων στο εσωτερικό του θαλάμου καταγράφονται από τους IRGA's και με την χρήση του λογισμικού προγράμματος της συσκευής υπολογίζονται οι παράμετροι ανταλλαγής των αερίων. Το λογισμικό πρόγραμμα κάνει χρήση των εξισώσεων των von Caemmerer and Farquhar (1981) σε συνδυασμό με

παραμέτρους όπως το μέγεθος του φύλλου (στην παρούσα εργασία το φύλλο της αγγουριάς καταλάμβανε το σύνολο της διαθέσιμης επιφάνειας του θαλάμου), τη θερμοκρασία φύλλου και αέρα και την ατμοσφαιρική πίεση. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται με τη μορφή ηλεκτρονικού αρχείου καθώς το LI-COR 6400 έχει τη δυνατότητα σύνδεσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Πριν την έναρξη των μετρήσεων γινόταν έλεγχος και βαθμονόμηση της συσκευής για να εξακριβωθεί η κανονική λειτουργία των αισθητήρων του θαλάμου φύλλου και των IRGA's, η τυχόν ύπαρξη διαρροών αέρα, η ικανότητα της συσκευής να καταγράφει την φωτοσύνθεση σε μικρές συγκεντρώσεις CO₂, καθώς και η καταλληλότητα του ξηραντικού και του φίλτρου CO₂. Το σύνολο των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε σε συγκέντρωση CO₂ ίση με 380 ppm, ένταση φωτός ίση με 1300 μmol m⁻² sec⁻¹ (ένταση κορεσμού) και σε θερμοκρασία 30 ± 2 °C.

Οι παράμετροι ανταλλαγής των αερίων προσδιορίζονταν σε συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας από 09:00 έως 11:00 π.μ..

Επιλέγονταν τα πιο πρόσφατα πλήρως ανεπτυγμένα φύλλα. Για την επικύρωση και αποθήκευση μιας τιμής ελεγχόταν η σταθεροποίηση της παραμέτρου A στην κονσόλα της συσκευής. Σταθερές τιμές A λαμβάνονταν, συνήθως, μετά από παραμονή του φύλλου εντός του θαλάμου για 1 min.

ΜΕΡΟΣ Δ. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

ΠΕΙΡΑΜΑ ΠΡΩΤΟ: ΒΑΘΜΙΑΙΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥ ΚΑΙ ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ ΣΤΟ ΡΙΖΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΗΣ ΑΓΓΟΥΡΙΑΣ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΤΑ ΦΥΤΑ

1.1. Εισαγωγή

Το μαγγάνιο και ο ψευδάργυρος είναι αναγκαία θρεπτικά στοιχεία για την ανάπτυξη των φυτών. Ωστόσο, υπερβολικές συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών στο ριζικό περιβάλλον των καλλιεργούμενων φυτών συχνά συνδέονται με περιορισμό της ανάπτυξης και των αποδόσεων (Hannam and Ohki, 1988; Osawa and Ikeda, 1974; Osawa and Ikeda, 1979; Gupta and Gupta, 1998; Le Bot *et al.*, 1990a). Αυξημένες συγκεντρώσεις ιχνοστοιχείων στα εδάφη θερμοκηπίων δύναται να αναπτυχθούν με την πάροδο του χρόνου λόγω παρατεταμένης χρήσης οργανικών λιπασμάτων προερχόμενων από λυματολάσπη και κοπριά πουλερικών ή λόγω άρδευσης με νερό από βιολογικούς καθαρισμούς (Marschner, 1995; He *et al.*, 2005; Arora *et al.*, 2008). Επίσης, ιχνοστοιχεία που υπάρχουν ως προσμίξεις σε λιπάσματα μπορεί να έχουν σημαντική συνεισφορά στην τροφοδοσία των καλλιεργειών με ιχνοστοιχεία (Procoriou and Wallace, 1981; Rengel *et al.*, 1999). Στις καλλιέργειες εκτός εδάφους, η συγκέντρωση του μαγγανίου στο ριζικό περιβάλλον μπορεί να αυξηθεί σε ανεπιθύμητα υψηλά επίπεδα αν το pH μειωθεί σε επίπεδα χαμηλότερα του 6 (Silber *et al.*, 2008). Ακόμη, τοξικά επίπεδα Mn^{2+} και Zn^{2+} στο ριζικό περιβάλλον μπορεί να αναπτυχθούν με την πάροδο του χρόνου σε κλειστά υδροπονικά συστήματα λόγω προοδευτικής συσσώρευσής τους όταν είναι αυξημένη η συγκέντρωση των στοιχείων αυτών στο θρεπτικό διάλυμα που χρησιμοποιείται για την αναπλήρωση της απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων και νερού από τα φυτά (Adams, 2002). Η τελευταία μπορεί να προέρχεται είτε από λανθασμένα υπερβολική δόση είτε από υπερβολικές συγκεντρώσεις Mn^{2+} και Zn^{2+} στο νερό άρδευσης που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος.

Η τοξικότητα μαγγανίου είναι από του κυριότερους περιοριστικούς παράγοντες για την ανάπτυξη των φυτών σε όξινα με κακή στράγγιση εδάφη. Υπό

αυτές τις συνθήκες, υπερβολικά υψηλές ποσότητες μαγγανίου γίνονται διαθέσιμες στα φυτά μειώνοντας την ανάπτυξή τους λόγω διαταραχής μερικών μεταβολικών διεργασιών (Le Bot *et al.*, 1990b; Lidon and Teixeira, 2000; Hauck *et al.*, 2003). Υπερβολικές ποσότητες μαγγανίου παρεμποδίζουν την βιοσύνθεση της χλωροφύλλης και μειώνουν τον ρυθμό φωτοσύνθεσης (Macfie and Taylor, 1992; Hauck *et al.*, 2002). Οι επιπτώσεις στα φυτά από την υψηλή διαθεσιμότητα του μαγγανίου εξαρτώνται όχι μόνο από την συγκέντρωση του Mn στο ριζικό περιβάλλον, αλλά και από την θερμοκρασία (Rufly *et al.*, 1979), τα επίπεδα των άλλων θρεπτικών στοιχείων στο περιβάλλον της ρίζας (Wang *et al.*, 1994) και την ένταση του φωτισμού (Nable *et al.*, 1988). Ο Shi *et al.*, (2006) αναφέρει ότι φυτά αγγουριάς αναπτυγμένα υπό συνθήκες υψηλού φωτισμού είχαν χαμηλότερη καθαρή φωτοσύνθεση και εμφάνισαν πιο έντονα συμπτώματα τοξικότητας μαγγανίου σε σχέση με φυτά υπό συνθήκες χαμηλού φωτισμού. Η φυσιολογική συγκέντρωση μαγγανίου στα φύλλα της αγγουριάς κυμαίνεται από 100-300 mg kg⁻¹ (Adams, 2002).

Διαφορετικά είδη φυτών και ποικιλίες του ίδιου είδους μπορεί να εμφανίζουν αρκετά διαφορετική αντοχή σε υψηλές συγκεντρώσεις μαγγανίου. Ακόμα, περιβαλλοντικοί παράγοντες και το επίπεδο παροχής άλλων θρεπτικών στοιχείων όπως ο σίδηρος, το ασβέστιο και το μαγνήσιο μπορεί να επηρεάσουν την ευαισθησία των φυτών στις υπερβολικές συγκεντρώσεις μαγγανίου (Chinnery and Harding, 1980; Maas *et al.*, 1969). Έτσι, για παράδειγμα, βρέθηκε ότι αυξάνοντας το Mg στο θρεπτικό μέσο μειώθηκαν τα συμπτώματα τοξικότητας Mn και αυξήθηκε η απόδοση σε καρπούς σε καλλιέργειες τομάτας (Elamin and Wilcox, 1986, Le Bot *et al.*, 1990a). Επίσης, προσθήκη πυριτίου περιορίζει τα συμπτώματα τοξικότητας και βελτιώνει την ανάπτυξη των φυτών αγγουριάς (Shi *et al.*, 2005).

Η τοξικότητα ψευδαργύρου στις καλλιέργειες είναι πολύ λιγότερο διαδεδομένη σε σχέση με την έλλειψη ψευδαργύρου. Παρόλα αυτά, η εμφάνιση τοξικότητας Zn είναι συχνή σε εδάφη μολυσμένα από δραστηριότητες ορυχείων ή μεταλλείων και σε γεωργικά εδάφη στα οποία έχει προστεθεί ως βελτιωτικό λυματολάσπη, ιδιαίτερα όταν αν το pH του εδάφους είναι χαμηλό (Chaney, 1993). Συμπτώματα τοξικότητας συνήθως γίνονται ορατά σε συγκεντρώσεις ψευδαργύρου στα φύλλα υψηλότερες από 300 mg kg⁻¹ Ξ.Β., αν και μερικές καλλιέργειες εμφανίζουν συμπτώματα και σε συγκεντρώσεις χαμηλότερες από 100 mg kg⁻¹ Ξ.Β. (Chaney, 1993;

Marschner, 1995). Οι Chaney (1993) και Broadley *et al.*, (2007) αναφέρουν ότι τα όρια συγκεντρώσεων πάνω από τα οποία έχουμε τοξικότητα μπορεί έχουν μεγάλη διακύμανση ακόμα και μεταξύ ποικιλιών ενός είδους. Τα συμπτώματα τοξικότητας περιλαμβάνουν μειωμένη απόδοση και ανάπτυξη, χλώρωση των φύλλων που οφείλεται σε έλλειψη σιδήρου, παρεμπόδιση της σύνθεσης χλωροφύλλης, αποδόμηση των χλωροπλαστών και περιορισμό της απορρόφησης του P, Mg και του Mn λόγω ανταγωνισμού (Carroll and Loneragan, 1968; Boawn and Rasmussen, 1971; Foy *et al.*, 1978; Chaney, 1993). Οι καλλιέργειες διαφέρουν σημαντικά όσον αφορά την ευαισθησία τους στην τοξικότητα ψευδαργύρου. Τα φυλλώδη λαχανικά είναι ευαίσθητα στην τοξικότητα Zn, ιδιαίτερα το σπανάκι και το παντζάρι, λόγω της αυξημένης ικανότητάς τους να απορροφούν τον Zn (Boawn and Rasmussen, 1971; Chaney, 1993). Οι αρνητικές επιδράσεις των υψηλών συγκεντρώσεων ψευδαργύρου στην ποσότητα της χλωροφύλλης και στις ενζυμικές δραστηριότητες είναι γνωστές (Monnet *et al.*, 2001, Shi and Cai, 2009). Ωστόσο, πληροφορίες που αφορούν τις επιδράσεις υψηλών επιπέδων ψευδαργύρου στο ριζικό περιβάλλον σε αγρονομικές και φυσιολογικές παραμέτρους των εκτός εδάφους θερμοκηπιακών καλλιεργειών είναι προς το παρόν ανεπαρκείς στην διεθνή βιβλιογραφία (Adams, 1985).

Η αγγουριά είναι ένα από τα σχετικά ευαίσθητα φυτά σε υψηλές συγκεντρώσεις μαγγανίου και ψευδαργύρου (Osawa and Ikeda, 1974). Παρόλα αυτά, οι επιπτώσεις στη φωτοσύνθεση και στην απόδοση των φυτών αγγουριάς θερμοκηπίου μιας βαθμιαίας αύξησης της συγκέντρωσης των στοιχείων αυτών στο ριζικό περιβάλλον σε τοξικά επίπεδα δεν έχει ακόμα διερευνηθεί. Ακόμα, ανώτερα κρίσιμα όρια συγκεντρώσεων Mn και Zn σε θρεπτικά διαλύματα και φυτικούς ιστούς συνδεόμενα με φυτοτοξικότητα και μειώσεις στην απόδοση δεν έχουν καθοριστεί για την αγγουριά σε καλλιέργεια εκτός εδάφους (Kopittke *et al.*, 2010; Long *et al.*, 2003). Έχοντας υπόψη την έλλειψη επιστημονικών πληροφοριών σε αυτά τα θέματα, η παρούσα εργασία σχεδιάστηκε για να καθοριστούν κρίσιμα ανώτατα όρια συγκεντρώσεων Mn και Zn στο θρεπτικό διάλυμα και στα φύλλα αγγουριάς καλλιεργούμενης υδροπονικά και να διερευνηθεί η υπόθεση ότι οι συγκεντρώσεις των Mn και/ή Zn γίνονται κρίσιμες μόλις αρχίζουν να διαταράσσουν την φωτοσυνθετική λειτουργία. Ένας ακόμη στόχος αυτής της έρευνας ήταν να διερευνηθεί αν οι τοξικές επιδράσεις του Mn και του Zn είναι προσθετικές, όταν τα

επίπεδα και των δύο ιόντων είναι υπερβολικά υψηλά στο ριζικό περιβάλλον της αγγουριάς.

1.2. Υλικά και Μέθοδοι

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε τον Οκτώβριο του 2007 σε ένα μη θερμαινόμενο θερμοκήπιο με κάλυψη από γυαλί στις εγκαταστάσεις του Ινστιτούτου Υποτροπικών και Ελιάς Χανίων. Κατά τη διάρκεια του πειράματος τα φυτά αναπτύχθηκαν υπό συνθήκες φυσικού φωτισμού, ενώ η θερμοκρασία κυμάνθηκε από 12,5 °C έως 22 °C κατά τη διάρκεια της νύκτας και από 15°C έως 35 °C κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η σχετική υγρασία κυμάνθηκε από 65% έως 90% κατά την διάρκεια της νύκτας και από 40-80% την ημέρα.

Σπορόφυτα αγγουριάς (*Cucumis sativus* L.) του υβριδίου F1 Myrthos, (Rijk Zwaan) που αναπτύχθηκαν σε κύβους πετροβάμβακα διαστάσεων (μεταφέρθηκαν τις 20 Οκτωβρίου, στο στάδιο των 3-4 πραγματικών φύλλων, σε 18 κανάλια NFT, τα οποία αντιστοιχούσαν σε 18 ανεξάρτητες πειραματικές μονάδες όπως περιγράφονται στο κεφάλαιο Γ «Υλικά και Μέθοδοι». Στα δύο εξωτερικά κανάλια τοποθετήθηκαν φυτά περιθωρίου ώστε να αποκλείονται οι πλευρικές επιδράσεις.

Πριν την μεταφύτευση, δόθηκε το ίδιο εναρκτήριο θρεπτικό διάλυμα στις 18 πειραματικές μονάδες. Για την αναπλήρωση της απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά παρέχονταν αυτόματα μέσω ενός πλωτήρα το θρεπτικό διάλυμα αναπλήρωσης I (Κεφάλαιο Γ «Υλικά και Μέθοδοι»). Δέκα ημέρες μετά την μεταφύτευση, στα 16 από τα 18 κανάλια, καθώς εξαιρέθηκαν τα δύο εξωτερικά, εφαρμόστηκε σχέδιο τεσσάρων ίσων τυχαιοποιημένων πλήρων ομάδων, όπου τροφοδοτήθηκαν με τέσσερα διαφορετικά ΘΔΑ. Τα τέσσερα διαφορετικά διαλύματα έγιναν συνδυάζοντας δύο επίπεδα συγκεντρώσεων Mn (10 και 160 μM) με δύο επίπεδα Zn (4 και 64 μM), διατηρώντας όλα τα άλλα θρεπτικά στοιχεία στα ίδια επίπεδα όπως στο αρχικό ΘΔΑ. Σαράντα ημέρες μετά την μεταφύτευση, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) στο ανακυκλούμενο ΘΔ ανέβηκε σε επίπεδα υψηλότερα από 2,7 dS m⁻¹ σε όλες τις επεμβάσεις. Για να αποφευχθεί μια περαιτέρω αύξηση της EC στο ανακυκλούμενο ΘΔ, εφαρμόστηκε το ΘΔΑ II (Κεφάλαιο Γ «Υλικά και Μέθοδοι»).

Η συγκομιδή των εμπορικά ώριμων καρπών άρχισε στις 15 Οκτωβρίου και επαναλαμβανόταν δύο φορές την εβδομάδα μέχρι το τέλος του πειράματος στις 4

Δεκεμβρίου. Σε κάθε συγκομιδή, ο ολικός αριθμός, το βάρος, το μήκος και η ποιότητα των καρπών καταγράφονταν χωριστά για κάθε πειραματική μονάδα. Η κατάταξη των καρπών σε ποιοτικές κατηγορίες EXTRA, Class I και Class II έγινε σύμφωνα με τον κανονισμό 1677/88 της Ε.Ε όπως τροποποιήθηκε με τον κανονισμό 888/97.

Δύο φορές την εβδομάδα, λαμβάνονταν δείγματα του ανακυκλούμενου ΘΔ από όλες τις πειραματικές μονάδες και χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων των NO_3^- , P, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn και Cu. Κάθε εβδομάδα, αρχίζοντας από την ημέρα έναρξης των επεμβάσεων, δείγματα ριζών και νεαρών πλήρως αναπτυγμένων φύλλων συλλέγονταν από όλες τις πειραματικές μονάδες για προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, και Cu. Οι μέθοδοι προσδιορισμού των παραπάνω στοιχείων περιγράφονται στο κεφάλαιο Γ «Υλικά και Μέθοδοι».

Κάθε δύο εβδομάδες, αρχίζοντας επτά ημέρες μετά την έναρξη των επεμβάσεων, ο ρυθμός καθαρής αφομοίωσης CO_2 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), ο ρυθμός διαπνοής ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), η στοματική αγωγιμότητα ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), και η μεσοκυττάρια συγκέντρωση CO_2 ($\mu\text{l l}^{-1}$) προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας μια φορητή συσκευή μέτρησης φωτοσύνθεσης (LI 6400, Li-COR Inc., Lincoln, NE, USA). Οι μετρήσεις έγιναν στα νεαρά πλήρως ανεπτυγμένα φύλλα χρησιμοποιώντας έξι φύλλα - επαναλήψεις για κάθε επέμβαση από διαφορετικά φυτά σε κάθε ημέρα δειγματοληψίας. Όλες οι μετρήσεις ανταλλαγής αερίων γινόταν 3 ώρες μετά την έλευση της ημέρας, με την συγκέντρωση CO_2 του περιβάλλοντος και σε φως κορεσμού με φωτοσυνθετική ροή φωτονίων (photosynthetic photon flux density -PPFD) $1300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Το Li 6400 ήταν εφοδιασμένο με θάλαμο φύλλου με σταθερή επιφάνεια εισαγωγής ($6,0 \text{ cm}^2$) και η θερμοκρασία του φύλλου στο θάλαμο ήταν $28 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Το πείραμα σχεδιάστηκε σαν παραγοντικός συνδυασμός δύο συγκεντρώσεων Mn και δύο συγκεντρώσεων Zn και τα δεδομένα υποβλήθηκαν σε στατιστική ανάλυση παραλλακτικότητας δύο παραγόντων χρησιμοποιώντας το στατιστικό πακέτο SPSS 16 for Windows, 2007. Όταν η αλληλεπίδραση ενός συγκεκριμένου μετρούμενου χαρακτηριστικού ήταν σημαντική, οι μέσοι όροι των τεσσάρων επεμβάσεων διαχωρίζονταν με βάση το Duncan's Multiple Range Test ($P \leq 0.05$).

1.3. Αποτελέσματα

1.3.1. Συμπτώματα τοξικότητας

Τα φυτά στις επεμβάσεις με υψηλά επίπεδα Mn εμφάνισαν ορατά συμπτώματα τοξικότητας μαγγανίου στα φύλλα 23 ημέρες μετά την έναρξη των επεμβάσεων όταν η συγκέντρωση του Mn ήταν 900 mg kg^{-1} στα νεαρά φύλλα και 300 μmol l^{-1} στο ανακυκλούμενο ΘΔ. Συγκεκριμένα, καστανές κηλίδες εμφανίστηκαν στα ώριμα φύλλα, ειδικά κατά μήκος των νεύρων, ως αποτέλεσμα την τοξικότητας Mn (Εικ. 1). Χλώρωση εμφανίστηκε κυρίως στα νεαρά φύλλα (Εικ. 2). Επίσης, η βάση των τριχιδίων στους βλαστούς, τους μίσχους και τα νεύρα των φύλλων είχε καστανό μεταχρωματισμό (Εικ. 5). Τα φυτά στις επεμβάσεις με υψηλά επίπεδα Zn εμφάνισαν συμπτώματα τοξικότητας 20 ημέρες μετά την έναρξη των επεμβάσεων όταν η συγκέντρωση του Zn ήταν 450 mg kg^{-1} στα νεαρά φύλλα και 110 μmol l^{-1} στο ανακυκλούμενο ΘΔ. Η τοξικότητα ψευδαργύρου εμφανίστηκε ως ελαφρά χλώρωση των νεαρών φύλλων που θύμιζε έλλειψη σιδήρου αλλά με σκοτεινό πράσινο χρώμα στο δίκτυο των νεύρων (Εικ. 3). Τα φυτά που τροφοδοτήθηκαν με υψηλά επίπεδα συγκεντρώσεων και από τα δύο ιχνοστοιχεία εμφάνισαν ένα συνδυασμό συμπτωμάτων και από τους δύο τύπους. Δηλαδή, με καστανές κηλίδες στα κατώτερα φύλλα και χλώρωση στα νεότερα (Εικ. 4).



Εικόνα 1. Τοξικότητα μαγγανίου σε ώριμο φύλλο.



Εικόνα 2. Τοξικότητα μαγγανίου σε νεαρό φύλλο.



Εικόνα 3. Νεαρό φύλλο με τοξικότητα ψευδαργύρου



Εικόνα 4. Νεαρό φύλλο με τοξικότητα Mn + Zn.

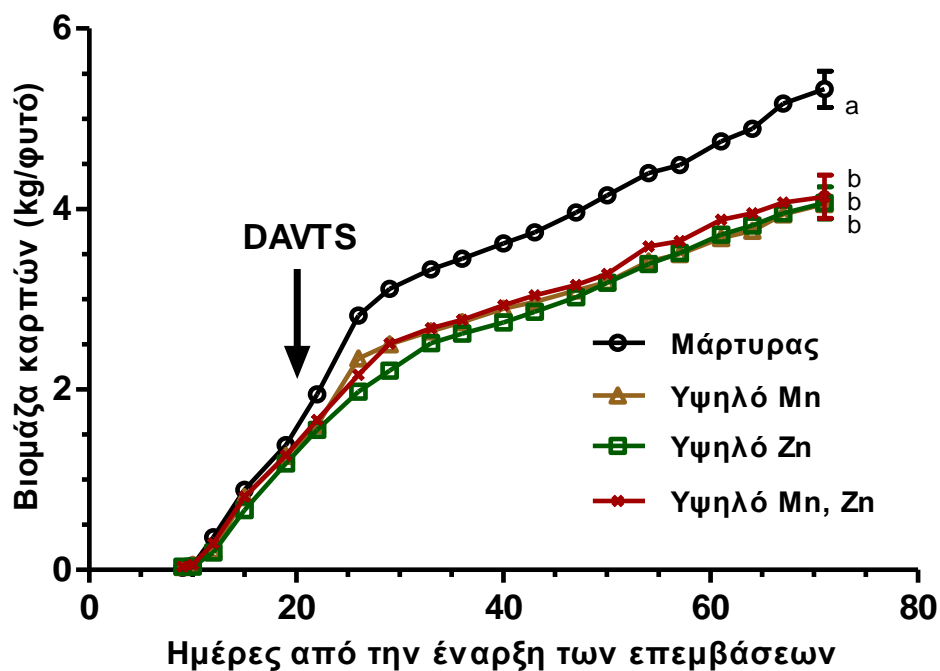


Εικόνα 5. Αριστερά, βλαστός χωρίς συμπτώματα (τριχίδια ανοικτού πράσινου χρώματος), δεξιά, συμπτώματα τοξικότητας μαγγανίου σε βλαστό αγγουριάς (βάση τριχιδίων καφέ χρώματος)

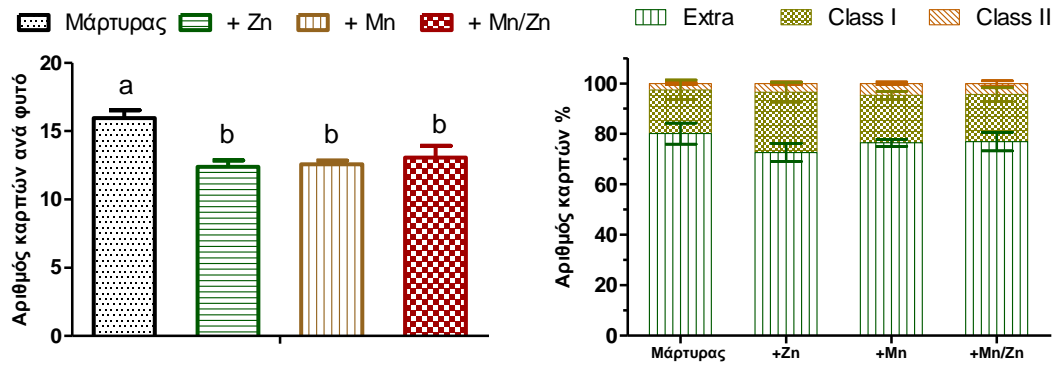
1.3.2. Παραγωγή καρπών

Η παραγωγή βιομάζας εμπορεύσιμων καρπών περιορίστηκε σημαντικά από τα υψηλότερα σε σχέση με τα συνιστώμενα επίπεδα παροχής μαγγανίου και ψευδαργύρου (Σχ. 1.1). Η μείωση της βιομάζας καρπών στις επεμβάσεις με υψηλό Mn, Zn και Mn/Zn συγκρινόμενη με την επέμβαση μάρτυρα άρχισε από την στιγμή της εμφάνισης των συμπτωμάτων τοξικότητας. Η μείωση της βιομάζας καρπών στις

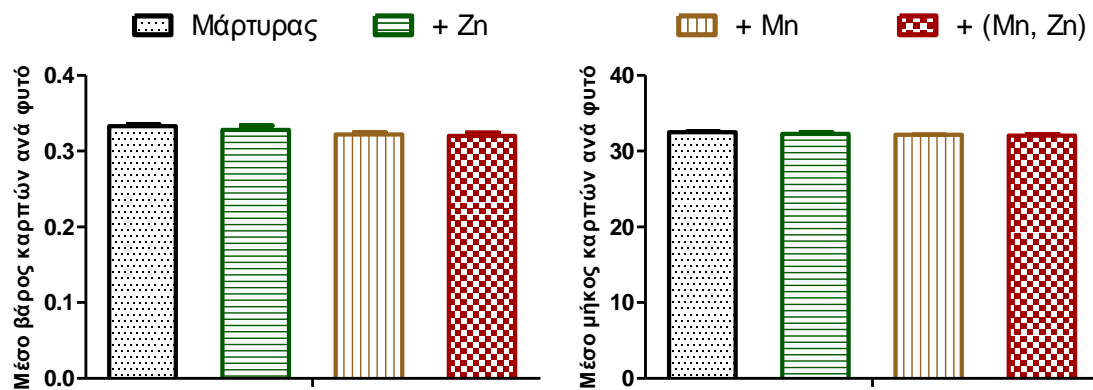
επεμβάσεις με υψηλά επίπεδα Mn ή /και Zn συγκρινόμενη με την επέμβαση μάρτυρα οφειλόταν σε αντίστοιχες μειώσεις του αριθμού των καρπών ανά φυτό (Σχ. 1.2), ενώ το μέσο βάρος καρπών δεν επηρεάστηκε από τα εξωτερικά επίπεδα του Mn και του Zn (Σχ. 1.3). Οι διαφορές στην ολική βιομάζα καρπών και στον αριθμό των καρπών ανά φυτό μεταξύ των τριών επεμβάσεων με υψηλά επίπεδα τροφοδοσίας Mn, Zn ή Mn/Zn ήταν μικρές και στατιστικά μη σημαντικές. Παρόμοια με το μέσο βάρος, το μέσο μήκος των καρπών δεν επηρεάστηκε από το επίπεδο παροχής Mn ή Zn (Σχ.1.3).



Σχήμα. 1.1. Αθροιστική απόδοση φυτών αγγουριάς που καλλιεργούνται σε NFT όπως επηρεάζονται από τις συγκεντρώσεις των Mn και Zn στα θρεπτικά διαλύματα που εισάγονται σε κλειστά υδροπονικά συστήματα για την αντιστάθμιση των απωλειών διαπνοής. Οι κατακόρυφες ράβδοι, στο τέλος των γραμμών απεικονίζουν \pm τυπικά σφάλματα των μέσων τεσσάρων μετρήσεων. Το βέλος δείχνει την ημερομηνία εμφάνισης ορατών συμπτωμάτων τοξικότητας (DAVTS).



Σχήμα. 1.2. Αριθμός καρπών ανά φυτό και κατάταξη τους σε εμπορικές κατηγορίες όπως επηρεάζεται από τις συγκεντρώσεις Mn και Zn στα θρεπτικά διαλύματα που εισάγονται σε κλειστά υδροπονικά συστήματα για την αντιστάθμιση των απωλειών διαπνοής.

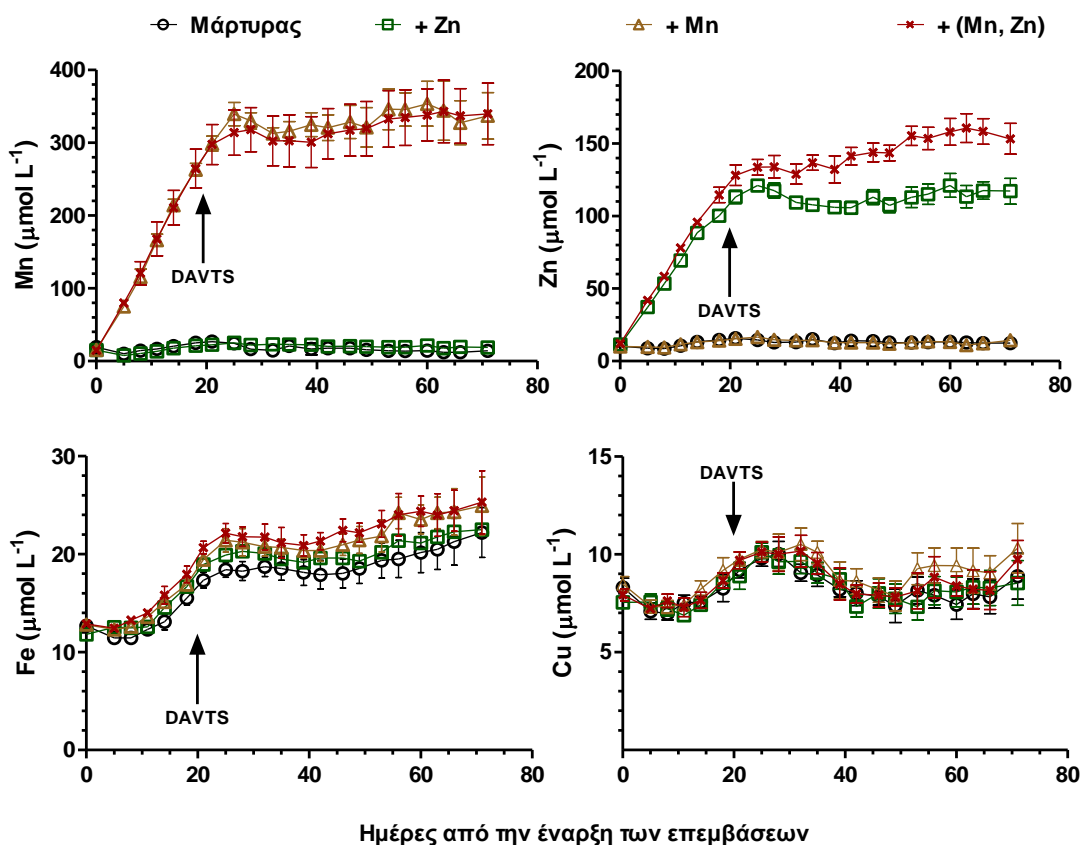


Σχήμα. 1.3. Μέσο βάρος και μήκος καρπών όπως επηρεάζεται από τις συγκεντρώσεις Mn και Zn στα θρεπτικά διαλύματα που εισάγονται σε κλειστά υδροπονικά συστήματα για την αντιστάθμιση των απωλειών διαπνοής

1.3.3. Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στο ριζικό περιβάλλον

Η επίδραση των υψηλών επιπέδων τροφοδοσίας Mn και Zn στις συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων (Mn, Zn, Fe και Cu) στο ανακυκλούμενο ΘΔ φαίνονται στο Σχήμα 1.4. Κατά τη διάρκεια των πρώτων 25 ημερών μετά την έναρξη των επεμβάσεων παρατηρήθηκε μια γρήγορη αύξηση των συγκεντρώσεων του μαγγανίου και του ψευδαργύρου στο ανακυκλούμενο ΘΔ στις επεμβάσεις με υψηλό Mn, Zn και Mn/Zn, αντίστοιχα, ακολουθούμενη από σταδιακή μείωση του ρυθμού αύξησης και σταθεροποίηση σε ένα ανώτατο επίπεδο συγκέντρωσης. Η συγκέντρωση του ψευδαργύρου στο ανακυκλούμενο ΘΔ σταθεροποιήθηκε σε χαμηλότερα επίπεδα στην επέμβαση με υψηλή παροχή μόνο του Zn σε σχέση με την επέμβαση που και τα

δύο ιχνοστοιχεία ήταν σε υψηλά επίπεδα στο παρεχόμενο Θ.Δ. Στις επεμβάσεις που περιελάμβαναν κανονικά επίπεδα παροχής Mn ή Zn, οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις στο ανακυκλούμενο ΘΔ ήταν πολύ χαμηλότερες σε σχέση με τις επεμβάσεις με υψηλά επίπεδα Mn ή Zn, αντίστοιχα, και παρέμειναν σταθερές μέχρι το τέλος του πειράματος. Η συγκέντρωση του Fe στο ανακυκλούμενο ΘΔ ήταν σταθερή κατά τη διάρκεια των 10 πρώτων ημερών από την έναρξη των επεμβάσεων ακολουθούμενη από μια αύξηση τις επόμενες 15 ημέρες σε όλες τις επεμβάσεις. Κατόπιν, τα επίπεδα του Fe παρέμειναν σχετικά σταθερά, με μια τάση στον μάρτυρα να είναι χαμηλότερα σε σχέση με τις επεμβάσεις με υψηλό Mn, ή/και Zn, παρόλο που σε πολλές ημερομηνίες οι διαφορές δεν ήταν σημαντικές. Η συγκέντρωση του χαλκού στο ανακυκλούμενο ΘΔ παρέμεινε σταθερή κατά τη διάρκεια του πειράματος με μια τάση να είναι υψηλότερη στην επέμβαση με υψηλή τροφοδοσία μαγγανίου.



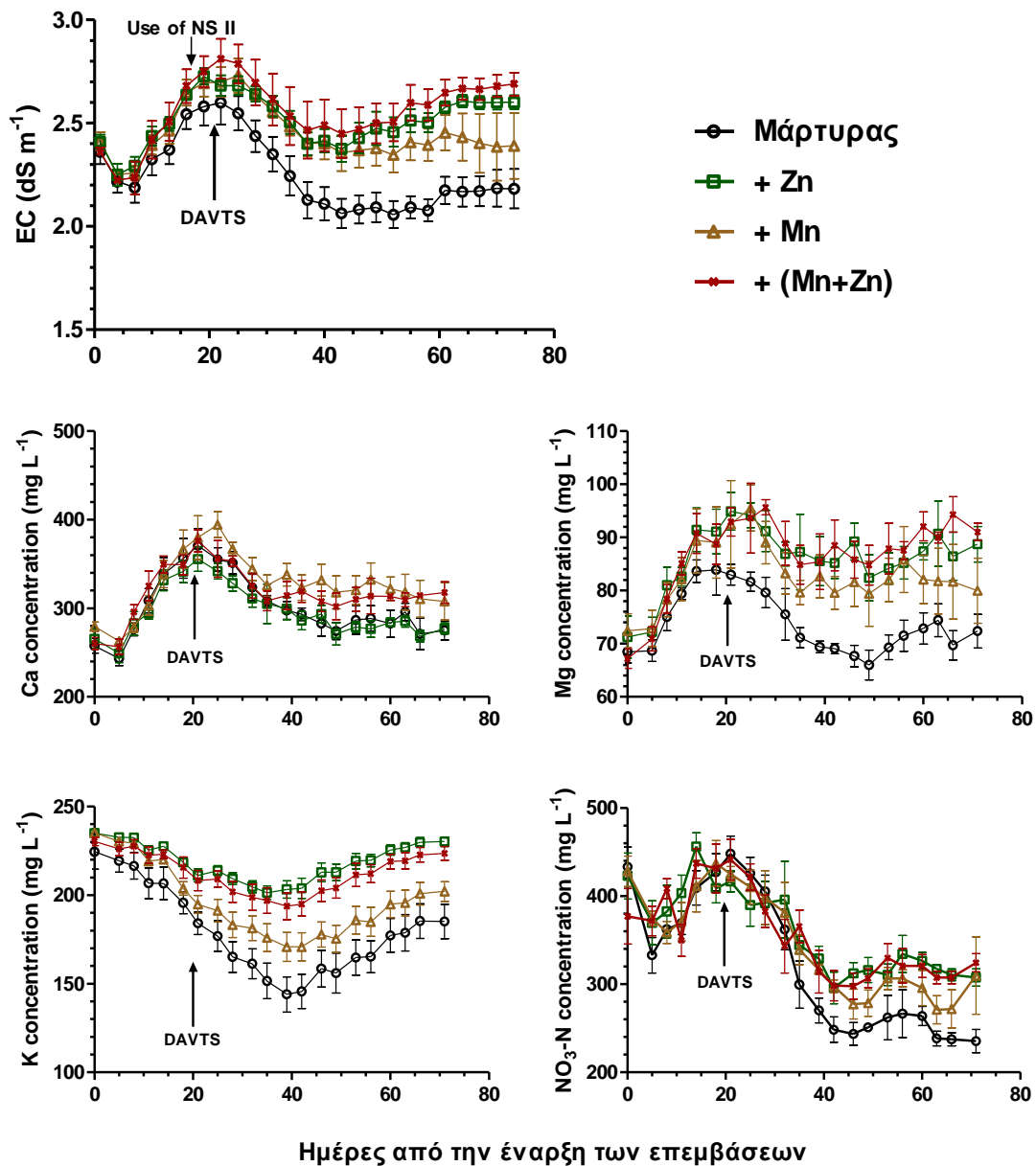
Σχήμα 1.4. Μεταβολές στις συγκεντρώσεις των Mn, Zn, Fe και Cu με την πάροδο του χρόνου στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα σε καλλιέργειες αγγουριάς σε εντελώς κλειστά υδροπονικά συστήματα (NFT) όπως επηρεάζονται από τις συγκεντρώσεις του Mn και Zn στα θρεπτικά διαλύματα που εισάγονται στα συστήματα για την αντιστάθμιση των απωλειών διαπνοής. Οι κατακόρυφες ράβδοι απεικονίζουν \pm τυπικά σφάλματα των μέσων τεσσάρων μετρήσεων. Τα βέλη δείχνουν την ημερομηνία εμφάνισης ορατών συμπτωμάτων τοξικότητας (DAVTS).

Η επίδραση των επεμβάσεων στην ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και στις συγκεντρώσεις των μακροστοιχείων (Ca, K, Mg, N-NO₃) στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα φαίνονται στο Σχήμα 1.5. Τα αποτελέσματα για το φώσφορο δεν παρουσιάζονται καθώς δεν υπήρχαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων του πειράματος. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα παρουσίασε μια διακύμανση κατά τη διάρκεια του πειράματος με αρχική μείωση κατά τις πρώτες 10 ημέρες, λόγω αυξημένων απαιτήσεων των φυτών σε θρεπτικά στοιχεία, ακολουθούμενη από γρήγορη αύξηση με μέγιστο κατά την 20^η ημέρα. Μεταξύ των επεμβάσεων, την χαμηλότερη αγωγιμότητα την είχε ο μάρτυρας ακολουθούμενος από τις επεμβάσεις με υψηλό Mn, υψηλό Zn και υψηλό Mn, Zn. Οι παραπάνω τιμές της αγωγιμότητας προέρχονται κυρίως από τις μεταβολές στις συγκεντρώσεις των μακροστοιχείων κατά τη διάρκεια του πειράματος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5 από τα κατιόντα το ασβέστιο δεν διαφοροποιήθηκε σημαντικά ενώ το Mg και το K ήταν σημαντικά χαμηλότερα στο μάρτυρα. Στο NO₃-N υπήρξε ανάλογη διαφοροποίηση αλλά σε μικρότερο βαθμό.

1.3.4. Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στις ρίζες και στα φύλλα της αγγουριάς.

Η συγκεντρώσεις του K, P, Ca και Mg στις ρίζες της αγγουριάς δεν επηρεάστηκαν από τις υψηλές συγκεντρώσεις Mn και Zn στο ριζικό περιβάλλον κατά τη διάρκεια του πειράματος (τα δεδομένα δεν παρουσιάζονται). Η συγκεντρώσεις του K και του P στα φύλλα επίσης δεν επηρεάστηκαν από τη σταδιακή αύξηση του Mn και/ή του Zn στο ριζικό περιβάλλον. Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις του Mg και του Ca στα φύλλα μειώθηκαν σημαντικά από τις υψηλές συγκεντρώσεις του Mn, Zn, ή Mn και Zn στο ριζικό περιβάλλον (Σχ. 1.6).

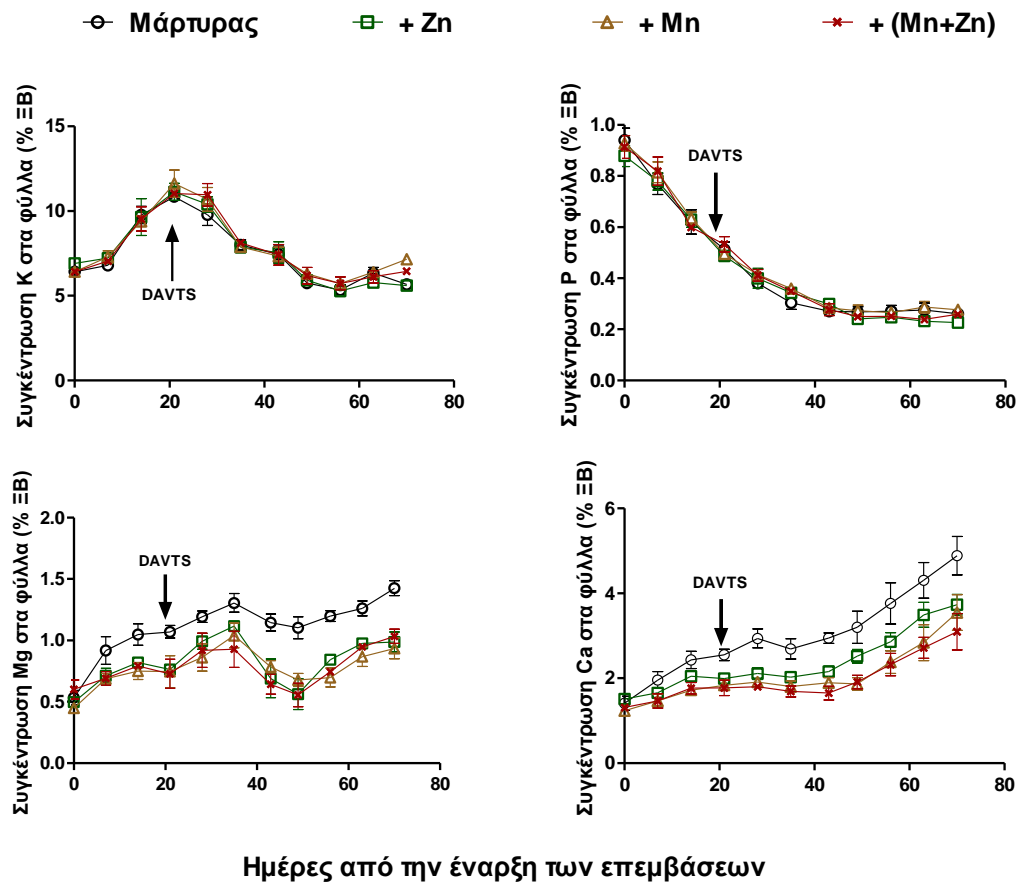
Η αυξημένη παροχή Mn και Zn στην αγγουριά διαμέσου του θρεπτικού διαλύματος είχε ως αποτέλεσμα αντίστοιχες αυξήσεις στις συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών στα φύλλα (Σχ. 1.7). Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις του Mn και του Zn στα φύλλα αυξάνονταν σταθερά σε όλη την διάρκεια του πειράματος, ενώ οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα σταθεροποιήθηκαν μετά από περίπου τέσσερις εβδομάδες ανακύκλωσης, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.4. Οι συγκεντρώσεις του σιδήρου και του χαλκού στα φύλλα ήταν σημαντικά χαμηλότερες όταν τα επίπεδα Mn και/ή Zn στο εξωτερικό περιβάλλον αυξήθηκαν σταδιακά σε σχέση με αυτές που μετρήθηκαν με κανονικά επίπεδα Mn και Zn.



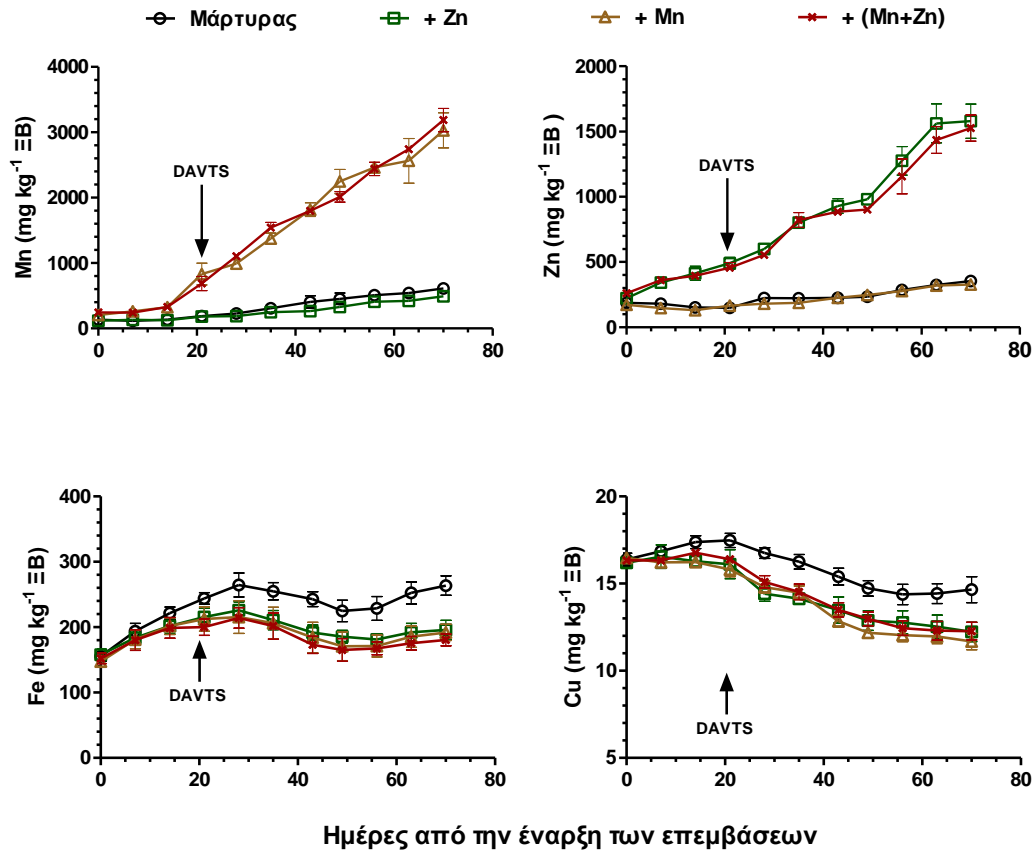
Σχήμα 1.5. Ηλεκτρική αγωγιμότητα και συγκεντρώσεις των Ca, Mg, K και NO₃-N στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα από την ημέρα της έναρξης των επεμβάσεων, όπως επηρεάζεται από τη συγκέντρωση του Mn και Zn στο νερό άρδευσης. Ημερομηνία εμφάνισης ορατών συμπτωμάτων τοξικότητας (DAVTS).

Οι συγκεντρώσεις του Mn και του Zn στις ρίζες αυξήθηκαν με την πάροδο του χρόνου σε όλες τις επεμβάσεις με υψηλά επίπεδα Mn και Zn, αντίστοιχα, σε σχέση με τις επεμβάσεις με κανονικές συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών (Σχ. 1.8). Σε όλα τα επίπεδα παροχής μαγγανίου, τη συγκέντρωση του μαγγανίου στις ρίζες είχε την τάση να είναι χαμηλότερη όταν η παροχή του ψευδαργύρου ήταν αυξημένη. Ωστόσο, η

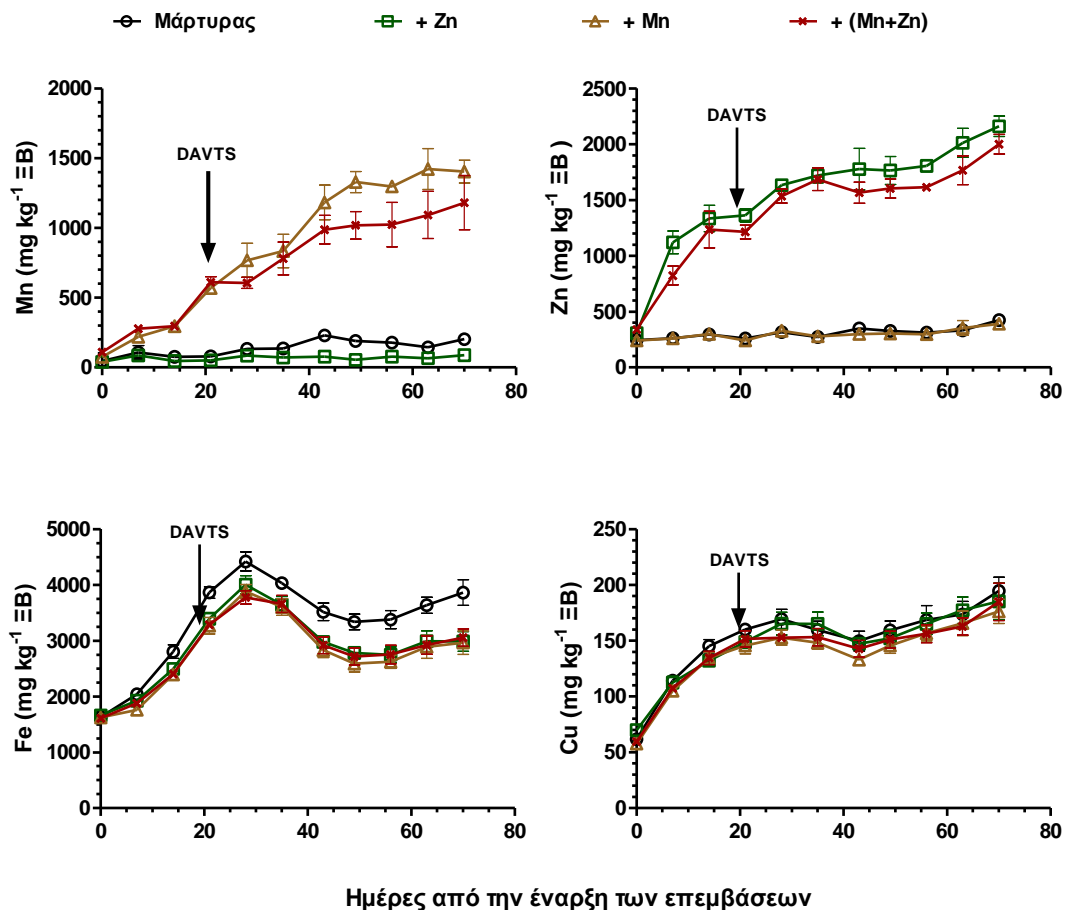
συγκέντρωση του Zn στις ρίζες δεν επηρεάστηκε σημαντικά από το επίπεδο παροχής του Mn. Η συγκέντρωση του σιδήρου στις ρίζες ήταν σημαντικά χαμηλότερη στις επεμβάσεις με υψηλό Mn και/ή Zn σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Η συγκέντρωση του χαλκού ήταν παρόμοια σε όλες τις επεμβάσεις ανεξάρτητα από το επίπεδο παροχής Mn και Zn.



Σχήμα 1.6. Μεταβολές στις συγκεντρώσεις του K, P, Mg και Ca με την πάροδο του χρόνου σε φύλλα αγγουριάς σε κλειστά υδροπονικά συστήματα (NFT) όπως επηρεάζονται από τις συγκεντρώσεις Mn και Zn στα θρεπτικά διαλύματα που εισάγονται στα συστήματα για την αντιστάθμιση των απωλειών διαπνοής. Κατακόρυφες ράβδους απεικονίζουν \pm τυπικά σφάλματα των μέσων τεσσάρων μετρήσεων. Τα βέλη δείχνουν την ημερομηνία εμφάνισης ορατών συμπτωμάτων τοξικότητας (DAVTS).



Σχήμα 1.7. Μεταβολές στις συγκεντρώσεις των Mn, Zn, Fe και Cu με την πάροδο του χρόνου σε νεαρά, πλήρως ανεπτυγμένα φύλλα αγγουριάς που αναπτύσσονται σε κλειστά υδροπονικά συστήματα (NFT) όπως επηρεάζονται από τις συγκεντρώσεις Mn και Zn στα θρεπτικά διαλύματα που εισάγονται στα συστήματα για την αντιστάθμιση των απωλειών διαπνοής. Οι κατακόρυφες ράβδοι απεικονίζουν \pm τυπικά σφάλματα των μέσων τεσσάρων μετρήσεων. Τα βέλη δείχνουν την ημερομηνία εμφάνισης ορατών συμπτωμάτων τοξικότητας (DAVTS).

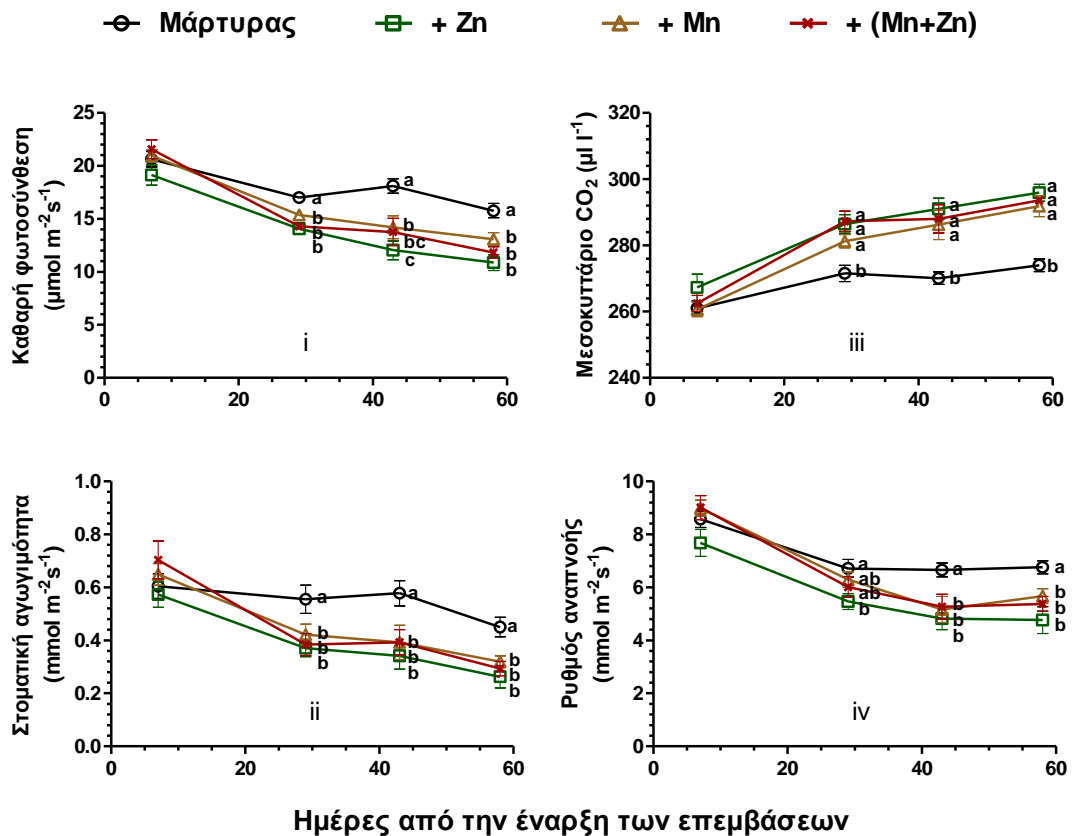


Σχήμα 1.8. Μεταβολές στις συγκεντρώσεις των Mn, Zn, Fe και Cu με την πάροδο του χρόνου στις ρίζες αγγουριάς σε κλειστά υδροπονικά συστήματα (NFT) όπως επηρεάζονται από τις συγκεντρώσεις Mn και Zn στα θρεπτικά διαλύματα που εισάγονται στα συστήματα για την αντιστάθμιση των απωλειών διαπνοής. Οι κατακόρυφες ράβδοι απεικονίζουν \pm τυπικά σφάλματα των μέσων τεσσάρων μετρήσεων. Τα βέλη δείχνουν την ημερομηνία εμφάνισης ορατών συμπτωμάτων τοξικότητας (DAVTS).

1.3.5. Παράμετροι ανταλλαγής αερίων στα φύλλα.

Η αύξηση του pH στο ανακυκλούμενο ΘΔ σε επίπεδα που να προκαλούν ορατά συμπτώματα τοξικότητας μείωσε σημαντικά τον καθαρό ρυθμό αφομοίωσης όπως φαίνεται από τις τιμές των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν 30 ημέρες μετά την έναρξη των επεμβάσεων καθώς και σε τρεις μεταγενέστερες ημερομηνίες (Σχ. 1.9). Η στοματική αγωγιμότητα στα νεαρά, πλήρως ανεπτυγμένα φύλλα ήταν επίσης μειωμένη από τα υψηλά επίπεδα Mn και Zn, ενώ η συγκέντρωση του μεσοκυττάριου CO₂ (C_i) αυξήθηκε σημαντικά όταν τα φυτά εκτέθηκαν σε υψηλές συγκεντρώσεις Mn και Zn. Η μείωση στην καθαρή φωτοσύνθεση ήταν πιο εμφανής στις δύο επεμβάσεις

με αυξημένη συγκέντρωση ψευδαργύρου σε σύγκριση με την επέμβαση με αυξημένο το μαγγάνιο αλλά κανονικό ψευδάργυρο, χωρίς σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο επεμβάσεων με υψηλό Zn.



Σχήμα 1.9. Καθαρή φωτοσύνθεση, στοματική αγωγιμότητα, συγκέντρωση μεσοκυττάριου CO₂ και ρυθμός διαπνοής σε νεαρά, πλήρως ανεπτυγμένα φύλλα αγγουριάς σε τέσσερις διαφορετικές ημερομηνίες όπως επηρεάζονται από τις συγκεντρώσεις του Mn και του Zn στο θρεπτικό διάλυμα που εισάγεται στο κλειστό υδροπονικό σύστημα για την αναπλήρωση των απωλειών από την διαπνοή των φυτών. Οι κάθετες γραμμές απεικονίζουν ± τυπικό σφάλμα του μέσου όρου 16 μετρήσεων. Σε κάθε ημερομηνία, διαφορετικά γράμματα κοντά στα σύμβολα δείχνουν σημαντικές διαφορές σε $p = 0.05$.

1.4. Συζήτηση

1.4.1. Αποδόσεις

Τα συμπτώματα τοξικότητας μαγγανίου στα φυτά συνήθως εμφανίζονται πρώτα στους βλαστούς οι οποίοι είναι πιο ευαίσθητοι δείκτες τοξικότητας σε σχέση με την παραγωγή βιομάζας (Foy *et al.*, 1978). Οι καφέ κηλίδες που προκαλούνται από την τοξικότητα μαγγανίου φανερώνουν την παρουσία οξειδωμένου Mn, μια μεταβολικά αδρανή μορφή που εκκρίνεται και εναποθέεται γύρω από τα τριχίδια των φύλλων (Horiguchi, 1987). Στην παρούσα εργασία, τα φυτά με φύλλα που περιείχαν περισσότερο από 900 mg kg⁻¹ Mn εμφάνισαν συμπτώματα τοξικότητας μαγγανίου. Τα αρχικά συμπτώματα τοξικότητας ψευδαργύρου συνήθως περιλαμβάνουν παρεμπόδιση της επιμήκυνσης των ριζών και χλώρωση των νεαρών φύλλων η οποία μπορεί να είναι αποτέλεσμα έμμεσης τροφοπενίας ιόντων με παρόμοια διάμετρο με αυτή του Zn, συγκεκριμένα σιδήρου ή μαγνησίου (Marschner, 1995). Σε αυτή την εργασία, τα συμπτώματα της τοξικότητας ψευδαργύρου εμφανίστηκαν όταν η περιεκτικότητα Zn στα φύλλα έφθασε το επίπεδο των 450 mg kg⁻¹. Παρόμοια όρια συγκέντρωσης που αφορούν την εμφάνιση συμπτωμάτων τοξικότητας για Mn και Zn στην αγγουριά αναφέρονται από τον Adams (1985).

Η παρεμπόδιση της ανάπτυξης και η μείωση των αποδόσεων είναι συνηθισμένες αντιδράσεις των καλλιεργειών στην τοξικότητα που προκαλείται από υψηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων και βαρέων μετάλλων. Κρίσιμες συγκεντρώσεις σε ιστούς που σχετίζονται με μειωμένη ανάπτυξη και απόδοση, χρησιμοποιούνται συχνά σαν δείκτες για τη διάγνωση τοξικότητας από θρεπτικά στοιχεία ή βαρέα μέταλλα (Reichman, 2002). Σε αυτό το πείραμα, η απόδοση της αγγουριάς μειώθηκε κατά περίπου 1,1% και 2,2% για κάθε αύξηση κατά 100 mg kg⁻¹ της συγκέντρωσης του Mn και του Zn στα φύλλα πάνω από τα προαναφερόμενα όρια των 900 και 450 mg kg⁻¹, αντίστοιχα. Η μείωση στην απόδοση στα υπερβολικά υψηλά επίπεδα Mn και/ή Zn ήταν συνέπεια της μειωμένης καθαρής φωτοσύνθεσης η οποία κυρίως επηρέασε τον αριθμό των καρπών ανά φυτό, πιθανώς λόγω μειωμένου ρυθμού ανάπτυξης. Σε αντίθεση με τον αριθμό των καρπών ανά φυτό, το μέσο βάρος και το μήκος των καρπών ελάχιστα επηρεάστηκαν από τις υψηλές συγκεντρώσεις Mn και Zn. Αυτή η αντίδραση είναι σύμφωνη με τα αποτελέσματα του Marcelis (1993), ο οποίος αναφέρει ότι η θετική επίδραση της αυξημένης καθαρής φωτοσύνθεσης στην

κατανομή της βιομάζας στους καρπούς αγγουριάς προήλθε κυρίως από την αύξηση του αριθμού των καρπών ανά φυτό.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι αλληλεπίδρασης όσον αφορά τις αντιδράσεις των φυτών που εκτίθενται σε υπερβολικές συγκεντρώσεις περισσότερων του ενός ιχνοστοιχείων στο ριζικό περιβάλλον. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις που αφορούν αντιδράσεις των φυτών σε υψηλές συγκεντρώσεις περισσότερων του ενός ιχνοστοιχείων μπορούν να χαρακτηρισθούν ως προσθετικές, ανεξάρτητες, ανταγωνιστικές (προστατευτικές) ή συνεργικές (Berry and Wallace, 1981). Οι An *et al.*, (2004), οι οποίοι μελέτησαν την ανάπτυξη φυτών αγγουριάς εκτεθειμένων σε υπερβολικά υψηλή συγκέντρωση είτε μόνο ενός μεταλλικού ιόντος (ιχνοστοιχείο ή βαρύ μέταλλο), είτε ενός συνδυασμού δύο ή τριών μεταλλικών ιόντων για 5 ημέρες, βρήκαν ότι οι διπλοί συνδυασμοί Cu+Cd, Cu+Pd, και Cd+Pd έδωσαν όλους τους τύπους αλληλεπίδρασης ανάλογα με τον συνδυασμό. Στην φασολιά, ο Wallace (1982), βρήκε παρόμοιες μειώσεις στην απόδοση οφειλόμενες σε υψηλό Zn όταν εφαρμόστηκε μόνος ή μαζί με Cd και Cu. Ωστόσο, οι ίδιοι ερευνητές αναφέρουν μεγαλύτερη μείωση της απόδοσης όταν μόνο το Mn ήταν σε υψηλή συγκέντρωση σε σύγκριση με παρόμοια αύξηση του Mn σε συνδυασμό με υψηλά επίπεδα Co και Ni, το οποίο υποδεικνύει προστατευτικές επιδράσεις των Co και Ni. Σε αυτή την εργασία, ο συνδυασμός υπερβολικά υψηλού Mn και Zn είχε μάλλον ανεξάρτητη και σε κάθε περίπτωση μη προσθετική επιδράση στην απόδοση καρπών.

1.4.2. Συγκεντρώσεις στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα

Κατά τη διάρκεια του πειράματος δεν έγινε απόρριψη θρεπτικού διαλύματος. Συνεπώς, το θρεπτικό διάλυμα που εισήχθη στο σύστημα ήταν ίσο με αυτό που απορροφήθηκε από τα φυτά. Επομένως, η βαθμιαία μείωση και τελικά ο μηδενισμός του ρυθμού αύξησης των συγκεντρώσεων του Mn και του Zn στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα 4-5 εβδομάδες μετά την έναρξη των επεμβάσεων (Σχ. 1.3) είναι φανερό ότι έγινε όταν οι αναλογίες απορρόφησης Mn/νερό και Zn/νερό προσέγγιζαν και τελικά έφθασαν στο ίδιο επίπεδο με την συγκέντρωση του Mn και του Zn στο θρεπτικό διάλυμα που εισαγόταν στο σύστημα. Παρόμοια μοντέλα, όσον αφορά τη συσσώρευση ιόντων στο ριζικό περιβάλλον της αγγουριάς και της τοματιάς, έχουν αναφερθεί για το Na και το Cl σε κλειστά υδροπονικά συστήματα (Savvas *et al.*, 2005;

Varlagas *et al.*, 2010). Αυτό το μοντέλο συσσώρευσης στο ανακυκλούμενο ΘΔ δείχνει ότι ο αποκλεισμός του Mn και Zn από τους φυτικούς ιστούς είναι ένας φυσιολογικός μηχανισμός ανθεκτικότητας της αγγουριάς έναντι τοξικών συγκεντρώσεων αυτών των μετάλλων, κάτι που είναι συνηθισμένο στα ανώτερα φυτά, όπως τα αγγειόσπερμα (Fodor, 2002).

1.4.3. Ανταλλαγή αερίων

Τα υψηλά επίπεδα μαγγανίου στους φυτικούς ιστούς προκαλούν ζημιά σε αρκετά μέρη του φωτοσυνθετικού μηχανισμού παρεμποδίζοντας τη βιοσύνθεση της χλωροφύλλης με αποτέλεσμα μειωμένη χλωροφύλλη α και β στα φύλλα, μειωμένο ρυθμό καθαρής φωτοσύνθεσης και παρεμπόδιση της δραστηριότητας της ριβουλόζης – 1,5- διφωσφορικής καρβοξυλάσης – οξυγενάσης (RuBisCO) (Mishra and Dubey, 2005). Επίσης, η τοξικότητα ψευδαργύρου παρεμποδίζει τη φωτοσύνθεση σε διάφορα στάδια που συνδέονται με διαφορετικούς φυσιολογικούς και βιοχημικούς μηχανισμούς. Τοξικές επιδράσεις του ψευδαργύρου στο βιοχημικό μηχανισμό της δέσμευσης του CO₂ περιλαμβάνουν μείωση της περιεκτικότητας σε ολική χλωροφύλλη και της αναλογίας χλωροφύλλης A/B, παρεμπόδιση της αφομοίωσης του CO₂ και παρεμπόδιση της δραστηριότητας του ενζύμου που είναι υπεύθυνο για τη φωτόλυση του νερού (oxygen evolving complex) λόγω ανταγωνισμού μεταξύ Zn²⁺ και Mn²⁺ στο φωτοσύστημα II που έχει ως αποτέλεσμα την μερική αντικατάσταση του μαγγανίου από τον ψευδάργυρο (Mishra and Dubey, 2005). Σύμφωνα με τους Farquhar and Sharkey (1982), μια μείωση στην καθαρή φωτοσύνθεση συνοδευόμενη από αύξηση στη συγκέντρωση του μεσοκυττάρου CO₂ δείχνει ότι η βλάβη του φωτοσυνθετικού μηχανισμού εντός των κυττάρων του μεσοφύλλου περισσότερο παρά το κλείσιμο των στοματίων είναι ο περιοριστικός παράγοντας για τους μειωμένους ρυθμούς καθαρής φωτοσύνθεσης. Στην παρούσα εργασία, τα υψηλά επίπεδα Mn και /ή Zn στο εξωτερικό διάλυμα μείωσαν την καθαρή φωτοσύνθεση και την στοματική αγωγιμότητα ενώ αύξησαν το μεσοκυττάριο CO₂. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν σαφέστατα ότι η φωτοσυνθετική αποτελεσματικότητα των φωτοσυστημάτων I και/η II και όχι το κλείσιμο των στοματίων είναι ο περιοριστικός παράγοντας για τη μείωση της καθαρής φωτοσύνθεσης της αγγουριάς μετά από έκθεση σε τοξικές εξωτερικές συγκεντρώσεις μαγγανίου και ψευδαργύρου. Όπως αναφέρεται από τους Vernay *et al.*, (2007), φυτά που εκτέθηκαν σε υψηλές

συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων είχαν εξασθεμισμένη φωτοσυνθετική δραστηριότητα η οποία οδήγησε σε σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις μεσοκυττάριου CO₂ με μειωμένη στοματική αγωγιμότητα. Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας όσον αφορά την επίδραση του μαγγανίου στη φωτοσύνθεση είναι παρόμοια με αυτά που αναφέρονται από τους Feng *et al.*, (2009) οι οποίοι βρήκαν ότι το αυξημένο μαγγάνιο παρεμπόδιζε σημαντικά την καθαρή φωτοσύνθεση και την στοματική αγωγιμότητα σε φυτά αγγουριάς ενώ παράλληλα αύξησε σημαντικά το μεσοκυττάριο CO₂. Παρόμοια αποτελέσματα όσον αφορά την επίδραση του Zn στην φωτοσύνθεση αναφέρονται από τους Shi and Cai (2009) για την αραχίδα, οι οποίοι βρήκαν ότι η έκθεση σε υπερβολικά υψηλή συγκέντρωση ψευδαργύρου παρεμποδίζει τη φωτοσύνθεση και την διαπνοή όχι μόνο λόγω περιορισμών στα στομάτια αλλά και λόγω μείωσης της περιεκτικότητας των φύλλων σε χλωροφύλλη και καροτενοειδή.

Σε αυτή την εργασία, η επέμβαση στην οποία και τα δύο ιχνοστοιχεία ήταν αυξημένα εμφάνισε παρόμοια επίδραση όσον αφορά την ανταλλαγή αερίων με τις επεμβάσεις όπου μόνο ένα μέταλλο ήταν σε υψηλή συγκέντρωση. Οι Van Assche and Clijsters (1986) βρήκαν ότι σε αμπελοφάσουλα (*dwarf beans*) που είχαν εκτεθεί σε υψηλές συγκεντρώσεις ψευδαργύρου η μεταφορά ηλεκτρονίων ήταν σημαντικά μειωμένη ενώ οι θυλακοειδείς μεμβράνες είχαν μεγάλη έλλειψη μαγγανίου στη θέση οξείδωσης του νερού πιθανώς διότι το χαλαρά συνδεδεμένο μαγγάνιο στο ένζυμο που είναι υπεύθυνο για την φωτόλυση του νερού είχε αντικατασταθεί από ψευδάργυρο. Αν υποθέσουμε ότι αντίστοιχος μηχανισμός υπάρχει και στην αγγουριά, πιθανά οφέλη από την αυξημένη παροχή μαγγανίου στην επιπτώσεις της τοξικότητας ψευδαργύρου εκμηδενίζονται λόγω τοξικότητας από το αυξημένο μαγγάνιο.

1.4.4. Συγκεντρώσεις στους φυτικούς ιστούς

Αλλαγές στις συγκεντρώσεις μακροστοιχείων στους φυτικούς ιστούς λόγω υψηλής συγκέντρωσης μαγγανίου ή ψευδαργύρου έχουν αναφερθεί από πολλούς ερευνητές (Ruano *et al.*, 1987; Le Bot *et al.*, 1990b; Venkatesan *et al.*, 2006; Savvas *et al.*, 2009). Στην παρούσα εργασία, οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις Ca²⁺ και Mg²⁺ στις επεμβάσεις με υψηλές συγκεντρώσεις δισθενών κατιόντων ήταν πιθανότατα αποτέλεσμα ιοντικού ανταγωνισμού. Παρόλα αυτά, εντός της ίδιας επέμβασης, οι συγκεντρώσεις Ca και Mg στα φύλλα αυξάνονταν με την πάροδο του χρόνου, ανεξάρτητα από τις εξωτερικές συγκεντρώσεις Mn και Zn. Αυτά τα αποτελέσματα

υποδεικνύουν ότι τα υψηλά επίπεδα Mn ή Zn μπορεί να περιορίζουν τη συγκέντρωση του Ca και του Mg αλλά όχι σε επίπεδα που να προκαλέσουν τροφопενία αυτών των στοιχείων. Παρόμοια αποτελέσματα όσον αφορά την επίδραση του Mn στις συγκεντρώσεις Ca και Mg στα φύλλα αγγουριάς αναφέρονται από τους Shi and Zhu, (2008) οι οποίοι χρησιμοποίησαν υψηλότερα (600 μM) αλλά σταθερά επίπεδα Mn στο ριζικό περιβάλλον.

Η υψηλές εξωτερικές συγκεντρώσεις Mn και/ή Zn μείωσαν σημαντικά την συγκέντρωση του Fe στις ρίζες και τα φύλλα της αγγουριάς. Επιπλέον, η συγκέντρωση του σιδήρου στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα αυξήθηκε σε σχέση με το μάρτυρα, γεγονός που υποδηλώνει ανταγωνιστικό περιορισμό στην απορρόφηση του σιδήρου από τα φυτά λόγω των αυξημένων συγκεντρώσεων Mn και Zn. Ο Crawford *et al.*, (1990) αναφέρει ότι φυτά αγγουριάς που τροφοδοτήθηκαν με 182 μM Mn εμφάνισαν καθαρή απώλεια σιδήρου από το βλαστό και μειωμένη αναλογία βλαστού/ρίζας σε σύγκριση με φυτά που είχαν κανονικά επίπεδα μαγγανίου (1.8 μM Mn). Παρόμοια επίδραση του μαγγανίου στην απορρόφηση του Fe από την αγγουριά αναφέρεται από τους Shi and Zhu, (2008). Επιπλέον, πολλές μελέτες έχουν αποδείξει ότι η τοξικότητα ψευδαργύρου όταν η συγκέντρωση του Zn στο ριζικό περιβάλλον αυξάνεται, σχετίζεται με μείωση της απορρόφησης σιδήρου (Rosen *et al.*, 1977, Wallace and Abou-Zamzam, 1989). Η εμφάνιση ανταγωνισμού στην απορρόφηση μεταξύ Zn και Fe είναι ένα ευρέως γνωστό φαινόμενο και ο μηχανισμός που τον προκαλεί φαίνεται να είναι παρόμοιος με αυτόν που λειτουργεί όταν άλλα βαρέα μέταλλα περιορίζουν την απορρόφηση του σιδήρου. Δύο πιθανοί μηχανισμοί οι οποίοι εμπλέκονται σε αυτή την αλληλεπίδραση αναφέρονται από τους Kabata and Pendas, (2001). Συγκεκριμένα, ο πρώτος μηχανισμός προκαλεί ανταγωνισμό μεταξύ Zn^{2+} και Fe^{2+} στην διαδικασία απορρόφησης ενώ ο δεύτερος μηχανισμός σχετίζεται με παρεμπόδιση που προκαλεί ο Zn στη διαδικασία μετατροπής του χηλικού Fe κατά τη φάση της απορρόφησης και της μεταφοράς του από τη ρίζα στο βλαστό. Παρόλα αυτά, σε αυτό το πείραμα η συγκέντρωση του σιδήρου στα φύλλα της αγγουριάς ήταν πάντα πάνω από το κατώτερα κρίσιμα επίπεδα που αναφέρονται από τον Erstein, (1965) για τροφопενία σιδήρου.

Η συγκέντρωση του χαλκού στα φύλλα ήταν σημαντικά χαμηλότερη μόνο στα φυτά αγγουριάς που υποβλήθηκαν σε υψηλά επίπεδα εξωτερικών συγκεντρώσεων

Mn ή/και Zn. Αντίθετα, τα επίπεδα του Cu στις ρίζες όπως και στο ανακυκλούμενο ΘΔ δεν επηρεάστηκαν σημαντικά από τις εξωτερικές συγκεντρώσεις Mn και Zn. Σε αυτό το πείραμα, η αναλογία μεταξύ της μέσης συγκέντρωσης του χαλκού στα φύλλα και τις ρίζες ήταν περίπου 0,1 που σημαίνει ότι ο χαλκός συσσωρεύεται κυρίως στις ρίζες. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπερβολικά υψηλά επίπεδα Mn ή/και Zn στην αγγουριά παρεμποδίζουν περισσότερο την μεταφορά του Cu από τις ρίζες στους βλαστούς παρά την απορρόφηση του χαλκού από τις ρίζες.

1.5. Συμπεράσματα

Συμπτώματα τοξικότητας μαγγανίου ή ψευδαργύρου στην αγγουριά εμφανίστηκαν όταν οι συγκεντρώσεις αυτών των στοιχείων στα νεαρά πλήρως ανεπτυγμένα φύλλα έφθασαν τα 900 και 450 mg kg⁻¹ ξηρού βάρους αντίστοιχα. Οι συγκεντρώσεις του μαγγανίου και του ψευδαργύρου στο ανακυκλούμενο ΘΔ ήταν περίπου 280 και 110 μmol l⁻¹ όταν έγιναν ορατά συμπτώματα τοξικότητας. Τα τοξικά επίπεδα του Mn ή/και του Zn επηρέασαν την καθαρή φωτοσύνθεση και είχαν ως αποτέλεσμα μικρότερη παραγωγή βιομάζας λόγω μειωμένου αριθμού καρπών ανά φυτό. Οι συγκεντρώσεις και των δύο στοιχείων στο ανακυκλούμενο ΘΔ αρχικά αυξήθηκαν με γρήγορο ρυθμό με σταδιακή σταθεροποίηση αργότερα σε συγκεκριμένα μέγιστα επίπεδα, ενώ οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις στα φύλλα είχαν μια τάση να αυξάνονται συνεχώς μέχρι το τέλος του πειράματος. Επίσης, οι υψηλές συγκεντρώσεις Mn ή/ και Zn στο ριζικό περιβάλλον περιόρισαν την απορρόφηση του Ca και του Mg από την αγγουριά. Ο συνδυασμός υψηλού Mn και Zn δεν είχε προσθετική επίδραση στις παραμέτρους που ερευνήθηκαν.

ΠΕΙΡΑΜΑ ΔΕΥΤΕΡΟ: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΤΟΥ Mn ΚΑΙ Zn ΣΤΟ ΠΑΡΕΧΟΜΕΝΟ ΘΡΕΠΤΙΚΟ ΔΙΑΛΥΜΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΤΟΥΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΓΓΟΥΡΙΑ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

2.1. Εισαγωγή

Η χρήση της ανακύκλωσης του θρεπτικού διαλύματος στα υδροπονικά συστήματα αυξάνεται συνεχώς καθώς αποφεύγεται η μόλυνση των υδροφορέων από τα υπολείμματα των λιπασμάτων ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το κόστος παραγωγής (Gutiérrez *et al.*, 2007; van Os *et al.*, 2008). Ωστόσο, η αυξημένη παροχή οποιουδήποτε θρεπτικού στοιχείου σε μια καλλιέργεια μέσω του θρεπτικού διαλύματος, αναπόφευκτα οδηγεί σε συσσώρευση αυτού του στοιχείου στο ριζικό περιβάλλον σε επιζήμια επίπεδα για την ανάπτυξη των φυτών και τις αποδόσεις τους (Carmassi *et al.*, 2005; Massa *et al.*, 2011). Όταν κάποιο από τα μακροστοιχεία συσσωρεύεται στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του διαλύματος αυξάνεται σταδιακά δίνοντας τη δυνατότητα στους καλλιεργητές να αντιληφθούν ότι κάτι συμβαίνει και να μειώσουν το ρυθμό προσθήκης λιπασμάτων. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο με τα ιχνοστοιχεία, καθώς η συνεισφορά τους στην ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι εξαιρετικά μικρή ακόμη και όταν η συγκέντρωσή τους φτάσει σε τοξικά επίπεδα για τα φυτά (Sonneveld, 2002). Γι αυτό το λόγο, η συσσώρευση των ιχνοστοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα δεν γίνεται αντιληπτή από τους καλλιεργητές πριν την εμφάνιση ορατών συμπτωμάτων τοξικότητας. Έτσι, για να αποφευχθούν τοξικές συγκεντρώσεις ιχνοστοιχείων στα κλειστά υδροπονικά συστήματα, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε πώς η απορρόφησή τους επηρεάζεται από την συγκέντρωσή τους στο θρεπτικό διάλυμα που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των φυτών.

Οι περισσότερες μελέτες που αναφέροντα στις επιπτώσεις της τοξικότητας ιχνοστοιχείων στα φυτά ή στους φυσιολογικούς μηχανισμούς στην υδροπονία, αφορούν σταθερά επίπεδα θρεπτικών στοιχείων, καθώς επιτρέπουν καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Shi *et al.*, 2006; Shi and Zhu, 2008; Rouphael *et al.*, 2008). Ωστόσο, στη γεωργική πράξη στα κλειστά υδροπονικά συστήματα, τα φυτά βρίσκονται αντιμέτωπα με βαθμιαία συσσώρευση των ιχνοστοιχείων. Γι αυτό το λόγο, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το πρότυπο συσσώρευσης των ιχνοστοιχείων στα

κλειστά υδροπονικά συστήματα και την επίδρασή του στην απορρόφηση των ιχνοστοιχείων.

Στα κλειστά υδροπονικά συστήματα, ο όγκος του νερού που εισάγεται στο σύστημα είναι ουσιαστικά ίσος με τον όγκο που αφαιρείται με την εξατμισοδιαπνοή εφόσον όλες οι απορροές ανακυκλώνονται. Σε αυτά τα συστήματα, η αναλογία μεταξύ της μάζας του θρεπτικού στοιχείου και του όγκου του νερού που εισάγονται θα πρέπει να είναι για όλα τα στοιχεία ίση με την αντίστοιχη αναλογία απορρόφησης από τα φυτά, η οποία αναφέρεται και ως «συγκέντρωση απορρόφησης» (uptake concentration), ούτως ώστε να αποφεύγεται η συσσώρευση θρεπτικών στοιχείων στο ΘΔ (Sonneveld and Voogt, 2009). Ωστόσο, η αναλογία εισόδου μεταξύ της μάζας του θρεπτικού στοιχείου και του όγκου του νερού είναι ίση με τη συγκέντρωση του στοιχείου στο διάλυμα που τροφοδοτεί το υδροπονικό σύστημα για την αναπλήρωση της απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων και του νερού. Με βάση έρευνες που έχουν γίνει στην Ολλανδία, οι de Kreij *et al.*, (1999) και Sonneveld και Voogt (2009) έχουν δημοσιεύσει συστάσεις για θρεπτικά διαλύματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε καλλιέργεια αγγουριάς σε κλειστό υδροπονικό σύστημα, βασιζόμενες στις συγκεντρώσεις απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά. Ωστόσο, δεδομένα που να αφορούν τις συγκεντρώσεις απορρόφησης μαγγανίου ή ψευδαργύρου σε υδροπονική καλλιέργεια αγγουριάς υπό μεσογειακές συνθήκες δεν είναι διαθέσιμα στη διεθνή βιβλιογραφία.

Η αγγουριά είναι σχετικά ευαίσθητη σε τοξικότητες μαγγανίου και ψευδαργύρου (Wang, 1987). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, συσσώρευση Mn και Zn που να οδηγεί σε αντίστοιχες τοξικότητες συμβαίνει κυρίως σε κλειστά υδροπονικά συστήματα, εάν η τροφοδοσία τους δεν είναι με επαρκή ακρίβεια προσαρμοσμένη στις ανάγκες απορρόφησής τους από τα φυτά. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να εκτιμηθούν οι μέσες συγκεντρώσεις απορρόφησης για το μαγγάνιο και τον ψευδάργυρο σε καλλιέργεια αγγουριάς σε μεσογειακές κλιματικές συνθήκες. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της σύνθεσης των θρεπτικών διαλυμάτων που τροφοδοτούν καλλιέργειες αγγουριάς σε κλειστά υδροπονικά συστήματα για την αναπλήρωση της απορρόφησης νερού και θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά υπό μεσογειακές κλιματικές συνθήκες. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την βαθμονόμηση

κατάλληλων προσομοιωμάτων για κλειστές υδροπονικές καλλιέργειες αγγουριάς με στόχο την πρόβλεψη των μεταβολών των επιπέδων Mn και Zn στο ριζικό περιβάλλον με τον χρόνο, σε συνάρτηση με την κατανάλωση νερού. Στην παρούσα εργασία, για την επαλήθευση, δηλαδή τον έλεγχο της αξιοπιστίας των δεδομένων που λήφθηκαν με τις μετρήσεις της απορρόφησης του Mn και του Zn από το ανακυκλούμενο ΘΔ, έγινε μια ποσοτική εκτίμηση των ποσοτήτων του Mn και του Zn που συσσωρεύτηκαν στους φυτικούς ιστούς της αγγουριάς (ρίζες, βλαστοί, φύλλα, καρποί).

2.2. Υλικά και Μέθοδοι

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε το φθινόπωρο του 2009 στο θερμοκήπιο του Ινστιτούτου Υποτροπικών και Ελιάς Χανίων. Σπορόφυτα αγγουριάς (*Cucumis sativus* L. cv. Myrthos, Rijk Zwaan) ανεπτυγμένα σε κύβους πετροβάμβακα μεταφέρθηκαν στις 29 Σεπτεμβρίου, στο στάδιο του τρίτου πραγματικού φύλλου σε 24 κανάλια, τα οποία αντιστοιχούσαν σε 24 ανεξάρτητα υδροπονικά συστήματα NFT όπως περιγράφονται στο Κεφάλαιο Γ «Υλικά και Μέθοδοι». Κατά τη διάρκεια του πειράματος τα φυτά αναπτύχθηκαν υπό συνθήκες φυσικού φωτισμού, ενώ η θερμοκρασία κυμάνθηκε από 10,5 °C έως 22 °C κατά τη διάρκεια της νύκτας και από 12 °C έως 32 °C κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η σχετική υγρασία κυμάνθηκε από 65% έως 90% κατά τη διάρκεια της νύκτας και από 40-80% την ημέρα. Πριν την μεταφύτευση, στα σπορόφυτα, εφαρμόστηκε το εναρκτήριο διάλυμα με κανονικές συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων σε όλες τις μεταχειρίσεις. Μία ημέρα μετά τη μεταφύτευση, έγινε τυχαίος καταμερισμός των 24 καναλιών σε οκτώ ίσες ομάδες, οι οποίες τροφοδοτήθηκαν με 8 θρεπτικά διαλύματα αναπλήρωσης που αντιστοιχούσαν σε 4 επίπεδα Mn (10, 40, 80, 120 μM) με σταθερή συγκέντρωση ψευδαργύρου (6 μM) και τέσσερα επίπεδα Zn (6, 20, 40, 60 μM) με σταθερή συγκέντρωση μαγγανίου (10 μM). Κάθε ομάδα είχε τρεις επαναλήψεις (8 επεμβάσεις x 3 επαναλήψεις = 24 πειραματικές μονάδες). Οι συγκεντρώσεις όλων των άλλων θρεπτικών στοιχείων εκτός του Mn και του Zn στο ΘΔΑ I αναφέρονται στο Κεφάλαιο Γ «Υλικά και Μέθοδοι».

Τα οκτώ διαφορετικά ΘΔΑ παρασκευάζονταν με την προσθήκη διαφορετικών ποσοτήτων Mn ή Zn στο παραπάνω ΘΔΑ. Σαράντα ημέρες μετά την μεταφύτευση, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) στο ανακυκλούμενο ΘΔ ανέβηκε σε επίπεδα υψηλότερα

από $2,7 \text{ dS m}^{-1}$ στις περισσότερες πειραματικές μονάδες. Για την αποφυγή περαιτέρω αύξησης της EC στο ανακυκλούμενο ΘΔ, εφαρμόστηκε το ΘΔΑ II (Κεφάλαιο Γ «Υλικά και Μέθοδοι»). Οι συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων στο ΘΔΑ II παρέμειναν σταθερές.

Η συγκομιδή των εμπορικά ώριμων καρπών άρχισε 33 ημέρες μετά την μεταφύτευση και επαναλαμβάνονταν δύο φορές την εβδομάδα μέχρι το τέλος του πειράματος στις 18/1/2010 (110 ημέρες μετά την μεταφύτευση). Σε κάθε συγκομιδή, ο αριθμός και των βάρους των συγκομισμένων καρπών καταγραφόταν χωριστά για κάθε πειραματική μονάδα.

Δείγματα του ανακυκλούμενου ΘΔ λαμβάνονταν σε εβδομαδιαία βάση από όλες τις πειραματικές μονάδες για προσδιορισμό των συγκεντρώσεων του μαγγανίου και του ψευδαργύρου. Επιπλέον, τα παλαιότερα φύλλα και οι καρποί που αφαιρούνταν από δύο επιλεγμένα φυτά από κάθε πειραματική μονάδα κατά τη διάρκεια του πειράματος αποξηραίνονταν στους $72 \text{ }^{\circ}\text{C}$ μέχρι σταθερό βάρος για προσδιορισμό νωπού και ξηρού βάρους. Ακολούθως, δείγματα παλαιών φύλλων και καρπών που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος χρησιμοποιούνταν για χημική ανάλυση ώστε να προσδιορισθούν οι συγκεντρώσεις Mn και Zn. Στο τέλος του πειράματος (18 Ιανουαρίου 2010), ολόκληρο το ριζικό σύστημα σε κάθε κανάλι απομακρύνθηκε για προσδιορισμό ξηρού βάρους και μέρος της ρίζας χρησιμοποιήθηκε για προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε ιχνοστοιχεία. Το νωπό και ξηρό βάρος των βλαστών και των υπόλοιπων φύλλων και καρπών (ώριμων, ανώριμων και ανθέων) από τα δύο επιλεγμένα φυτά κάθε πειραματικής μονάδας προσδιορίστηκε και το αποξηραμένο υλικό χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των συγκεντρώσεων Mn και Zn. Για τις αναλύσεις των δειγμάτων εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι που περιγράφονται στο αντίστοιχο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής.

Οι αναλογίες απορρόφησης νερού και θρεπτικών στοιχείων (συγκεντρώσεις απορρόφησης) για το μαγγάνιο και τον ψευδάργυρο εκτιμήθηκαν με δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη βασιζόταν στην απομάκρυνση από το θρεπτικό διάλυμα. Συγκεκριμένα, η **μέση συγκέντρωση απορρόφησης** του x ιχνοστοιχείου (C_{xu} σε $\mu\text{mol L}^{-1}$, όπου $x=\text{Mn, Zn}$) προσδιοριζόταν για διαδοχικά χρονικά διαστήματα (κάθε τρεις εβδομάδες μέχρι την 42^η ημέρα από την έναρξη των επεμβάσεων και κάθε δύο εβδομάδες μετέπειτα) χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση ισορροπίας μαζών:

$$C_{xu} = \frac{V_r(C_{xbi} - C_{xei}) + V_{ui}C_{xa}}{V_{ui}} \quad (1)$$

όπου V_r (L) είναι ο συνολικός όγκος του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος σε κάθε πειραματική μονάδα (60 λίτρα στην παρούσα εργασία), V_{ui} (L) ο συνολικός όγκος του ΘΔ που απορροφήθηκε από τα φυτά σε κάθε πειραματική μονάδα κατά τη διάρκεια του i χρονικού διαστήματος ($i=1...7$), C_{xbi} και C_{xei} ($\mu\text{mol L}^{-1}$) οι συγκεντρώσεις του x ιχνοστοιχείου στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα την πρώτη και την τελευταία ημέρα του i χρονικού διαστήματος ($i=1...7$), και C_{xa} ($\mu\text{mol L}^{-1}$) η συγκέντρωση του x ιχνοστοιχείου στο θρεπτικό διάλυμα αναπλήρωσης που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε επέμβαση.

Η δεύτερη προσέγγιση βασιζόταν στις ποσότητες του x ιχνοστοιχείου που ανακτήθηκαν από τους φυτικούς ιστούς και το μέσο όγκο του θρεπτικού διαλύματος ανά φυτό που απορροφήθηκε από την καλλιέργεια σε κάθε πειραματική μονάδα κατά τη διάρκεια ολόκληρης της καλλιεργητικής περιόδου. Σύμφωνα με αυτή την εκτίμηση, η μέση συγκεντρώσεις απορρόφησης του Mn και του Zn (C_{xu} σε $\mu\text{mol L}^{-1}$, όπου $x=\text{Mn, Zn}$) προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$C_{xu} = \frac{C_{xr}B_r + C_{xs}B_s + \sum C_{xli}B_{li} + \sum C_{xfj}B_{fj}}{V_{up}} \quad (2)$$

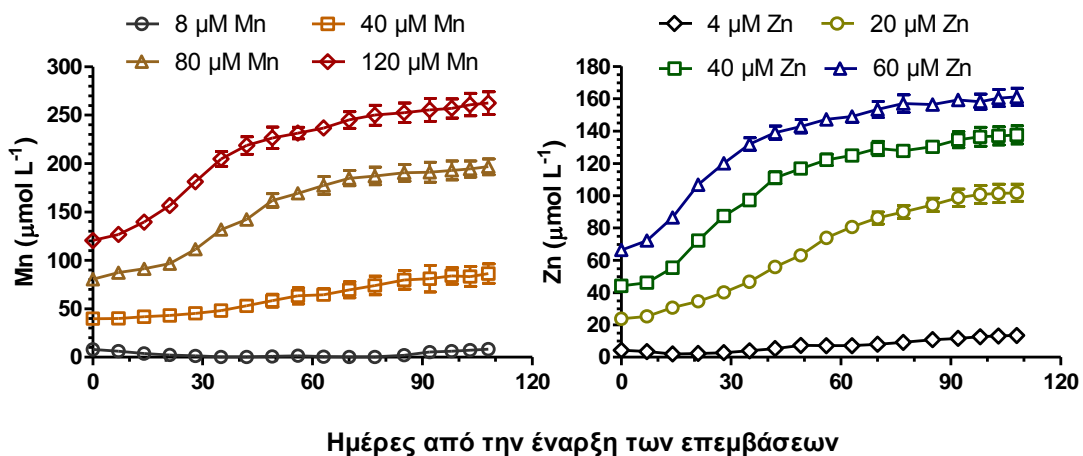
όπου C_{xr} , C_{xs} , C_{xli} και C_{xfi} υποδηλώνουν συγκεντρώσεις ($\mu\text{mol g}^{-1}$) του x ιόντος ($x=\text{Mn, Zn}$) στην ρίζα, το βλαστό, τα φύλλα και τους καρπούς αντίστοιχα, B_r , B_s , B_{li} και B_{fj} είναι η βιομάζα (g/φυτό) της ρίζας, του βλαστού, των φύλλων και των καρπών αντίστοιχα, ενώ το V_{up} υποδηλώνει το συνολικό όγκο του ΘΔ (σε L ανά φυτό) που απορροφήθηκε από την καλλιέργεια σε κάθε πειραματική μονάδα κατά τη διάρκεια ολόκληρης της καλλιεργητικής περιόδου. Οι δείκτες i στα C_{xli} και C_{xfi} ($i=1...9$) καθώς επίσης και ο j στα B_{lj} , και B_{fj} ($j=1...12$) απεικονίζουν την σειρά των ημερομηνιών δειγματοληψίας των παλαιότερων φύλλων και καρπών κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

Τα δεδομένα υποβλήθηκαν σε στατιστική ανάλυση παραλλακτικότητας ενός παράγοντα χρησιμοποιώντας το στατιστικό πακέτο SPSS 16 for Windows, 2007. Όταν η αλληλεπίδραση ενός συγκεκριμένου μετρούμενου χαρακτηριστικού ήταν σημαντική, οι μέσοι όροι των επεμβάσεων διαχωρίζονταν με βάση το Duncan's Multiple Range Test ($P \leq 0.05$).

2.3. Αποτελέσματα και συζήτηση

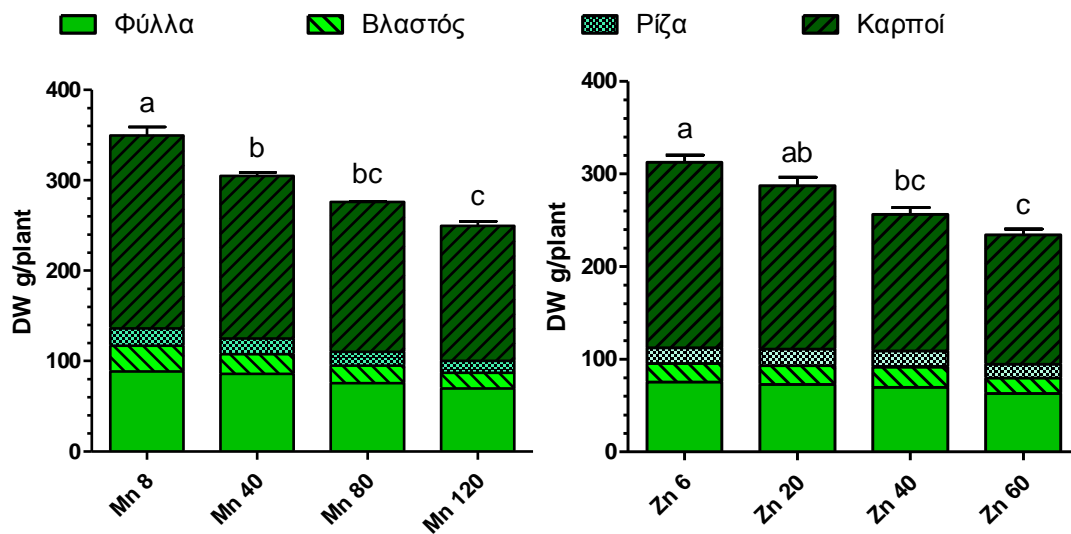
Οι αλλαγές στις συγκεντρώσεις του μαγγανίου και του ψευδαργύρου σε συνάρτηση με το χρόνο φαίνονται στο Σχήμα 2.1. Στην επέμβαση με την χαμηλότερη συγκέντρωση Mn στο ανακυκλούμενο ΘΔ (10 μM), το επίπεδο του Mn μειώθηκε γρήγορα στα 1,3 μM κατά τη διάρκεια των πρώτων 21 ημερών μετά την έναρξη των επεμβάσεων, κυμαινόμενο σε επίπεδα χαμηλότερα από 7 μM μέχρι την 70^η ημέρα, το οποίο είναι και επίπεδο στόχος για την αγγουριά σύμφωνα με τον de Kreij *et al.*, (1999), ενώ αυξήθηκε σταδιακά έως τα 19 μM την 110^η ημέρα μετά την έναρξη των επεμβάσεων. Στην επέμβαση με το χαμηλότερο επίπεδο ψευδαργύρου (6 μM), η συγκέντρωση του Zn στο ανακυκλούμενο ΘΔ μειώθηκε ελαφρά από 6 σε 5,2 μM μέχρι την 21^η ημέρα από την έναρξη των επεμβάσεων, αλλά έκτοτε αυξανόταν σταθερά μέχρι τα 18,6 μM στο τέλος της καλλιέργειας (110 ημέρες). Στις επεμβάσεις με τις τρεις υψηλότερες συγκεντρώσεις μαγγανίου και ψευδαργύρου, οι συγκεντρώσεις και των δύο στοιχείων αυξάνονταν γρήγορα μέχρι την 70^η ημέρα από την έναρξη των επεμβάσεων, αλλά αργότερα σταθεροποιήθηκαν σταδιακά στα μέγιστα επίπεδα, ακολουθώντας ένα κυρτό πρότυπο καμπύλης. Παρόμοια πρότυπα σταδιακής συσσώρευσης ιόντων μέχρι ένα μέγιστο όριο σε κλειστά υδροπονικά συστήματα που να οφείλονται σε σταθερή είσοδο αλάτων, έχουν παρατηρηθεί επίσης για το νάτριο και το χλώριο (Baas *et al.*, 1995, Savvas *et al.*, 2005). Όταν παρατηρείται αυτό το πρότυπο συσσώρευσης για κάποιο ιόν, το μέγιστο όριο συγκέντρωσης του συγκεκριμένου ιόντος στο ανακυκλούμενο ΘΔ επιβάλλει ως ύψος συγκέντρωσης απορρόφησης το επίπεδο συγκέντρωσης αυτού του ιόντος στο ΘΔ αναπλήρωσης (Varlagas *et al.*, 2010). Συνεπώς, οι μέγιστες συγκεντρώσεις μαγγανίου και ψευδαργύρου που παρατηρήθηκαν στο παρόν πείραμα αντιστοιχούν σε συγκεντρώσεις απορρόφησης ίσες με τα αντίστοιχα επίπεδα Mn και Zn του ΘΔ αναπλήρωσης της συγκεκριμένης επέμβασης. Η σταθερή αύξηση των συγκεντρώσεων απορρόφησης του Mn και Zn καθώς αυξανόταν τα επίπεδα του Mn και Zn στο περιβάλλον των ριζών δείχνει ότι η ικανότητα της αγγουριάς να ελέγξει την απορρόφηση του Mn και του Zn σταδιακά ελαττώνεται. Η μειούμενη ικανότητα των φυτών να προλάβουν την τοξικότητα μαγγανίου διατηρώντας σταθερούς τους ρυθμούς απορρόφησης του Mn καθώς αυξάνεται η εξωτερική συγκέντρωση του μαγγανίου αναφέρεται από τους El-Jaoual and Cox (1998). Εντούτοις, η ικανότητα των

φυτών να ελέγχουν την απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων ώστε να αποφεύγουν τοξικότητες εξαρτάται επίσης από τον γονότυπο. Για παράδειγμα, οι Denny and Wilkins (1987) βρήκαν ότι κάποιοι γονότυποι δένδρων σημύδας (*Betula spp.*) που ήταν ανθεκτικοί σε υψηλά επίπεδα ψευδαργύρου μπορούσαν να διατηρούν έλεγχο της απορρόφησης Zn σε μεγαλύτερη κλίμακα εξωτερικών συγκεντρώσεων Zn από τους λιγότερο ανθεκτικούς γονότυπους. Για το αγγούρι δεν υπάρχουν δημοσιευμένα αντίστοιχα δεδομένα για διαφορετικές ποικιλίες του ίδιου φυτού.



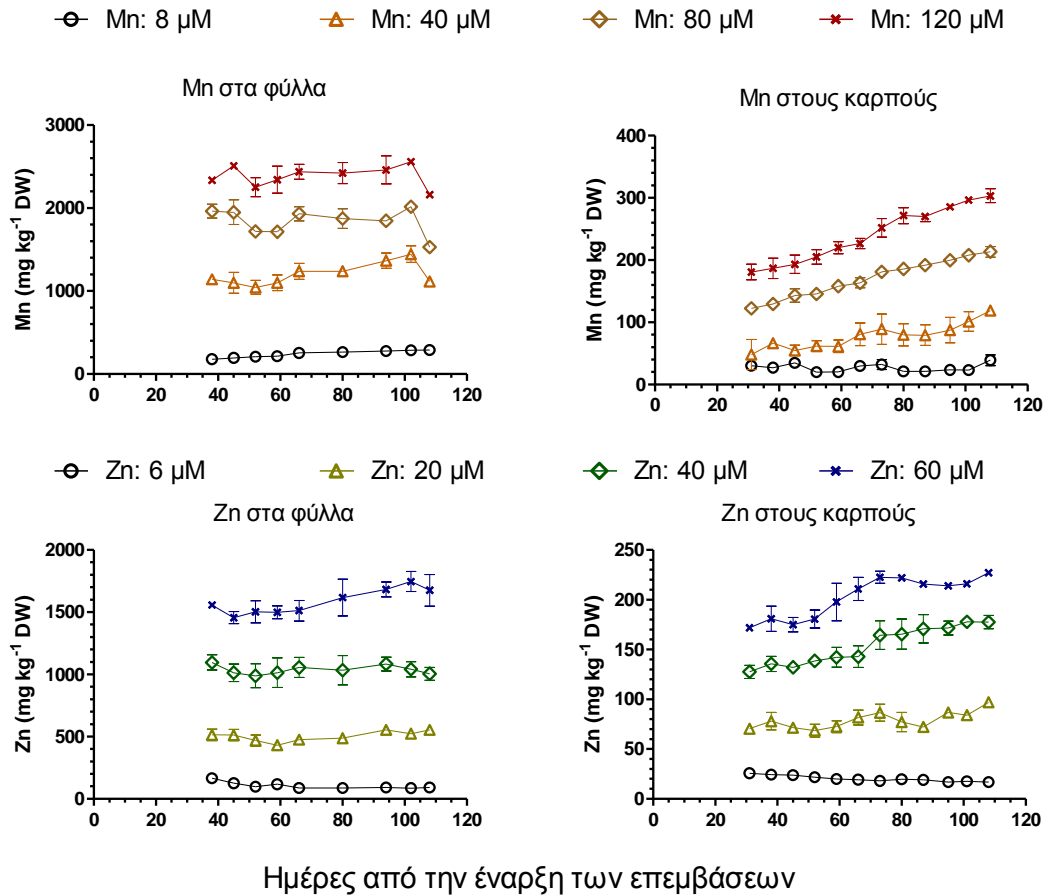
Σχήμα 2.1. Μεταβολές των συγκεντρώσεων Mn και Zn με τον χρόνο στο ΑΘΔ, όπως επηρεάζεται από τις συγκεντρώσεις Mn και Zn στα θρεπτικά διαλύματα αναπλήρωσης που εισάγονται σε κλειστά υδροπονικά συστήματα αγγουριάς για αντιστάθμιση της απορρόφησης από τα φυτά. Οι κατακόρυφες ράβδοι απεικονίζουν \pm τυπικά σφάλματα των μέσων όρων τριών μετρήσεων.

Η επίδραση των μεταχειρίσεων στην παραγωγή βιομάζας, κατανεμημένη σε ρίζα, βλαστό, φύλλα και καρπούς (B_r , B_s , B_{li} , και B_{fr} , αντίστοιχα, στην εξίσωση 2) φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Η ολική φυτική βιομάζα μειώθηκε όταν η συγκέντρωση του Mn ή του Zn στο ΘΔ αναπλήρωσης το οποίο τροφοδοτούσε το υδροπονικό σύστημα ήταν 40 μM ή υψηλότερη. Αυτά τα αποτελέσματα είναι σύμφωνα με προηγούμενες αναφορές των Shi and Zhu (2008), καθώς και με τα αποτελέσματα του πρώτου πειράματος που περιλαμβάνει η παρούσα διατριβή. Εντούτοις, η μείωση της φυτικής βιομάζας ήταν λιγότερη από 25% ακόμα και στα υψηλότερα επίπεδα Mn και Zn στο ΘΔ αναπλήρωσης, το οποίο ανέβασε τις συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων αυτών στο ανακυκλούμενο ΘΔ περίπου στα 270 μM και 170 μM , αντίστοιχα.

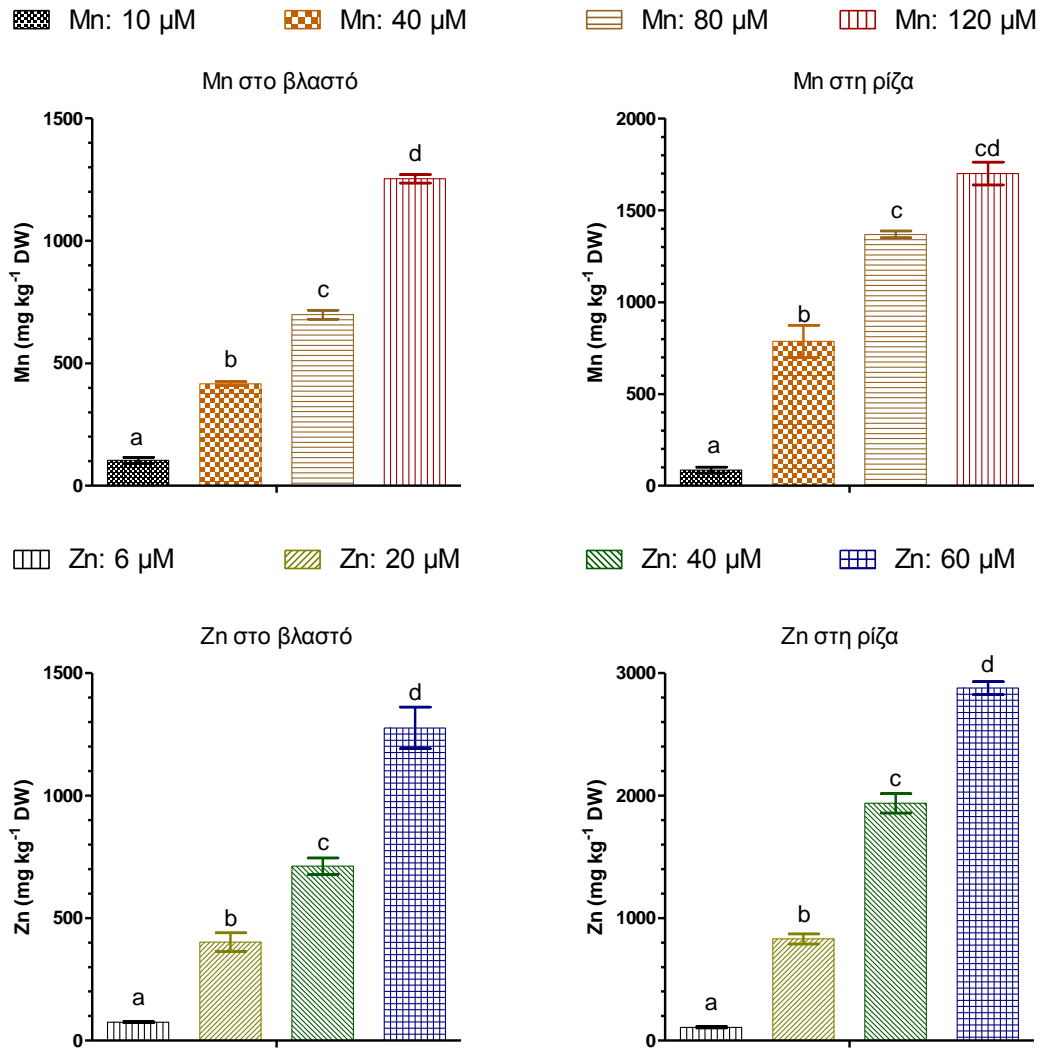


Σχήμα 2.2. Ολική ξηρή φυτική βιομάζα (dry biomass - DW) και συμμετοχή των διαφόρων τμημάτων των φυτών αγγουριάς καλλιεργούμενης σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια, όπως επηρεάζεται από τις συγκεντρώσεις Mn και Zn στα θρεπτικά διαλύματα αναπλήρωσης που εισάγονται για αντιστάθμιση της απορρόφησης από τα φυτά. Σε κάθε γράφημα, στήλες με το ίδιο γράμμα δεν διαφέρουν σημαντικά ($P \leq 0,05$).

Οι συγκεντρώσεις του Mn και του Zn στη ρίζα, το βλαστό, τα φύλλα και τους καρπούς (C_{xr} , C_{xs} , C_{xli} , και C_{xfj} αντίστοιχα, στην εξίσωση 2) εμφανίζονται στα σχήματα 2.3 και 2.4. Η συσσώρευση του Mn και του Zn στο ριζικό περιβάλλον οδήγησε σε σταθερά αυξανόμενες συγκεντρώσεις των ιόντων αυτών στα φύλλα και τους καρπούς κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (σχήμα 2.3) καθώς επίσης και στα δείγματα από ρίζες και τους βλαστούς που λήφθηκαν στο τέλος της καλλιέργειας (σχήμα 2.4). Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε συμφωνία με παλαιότερη αναφορά των Sonneveld and de Bes (1984).



Σχήμα 2.3. Οι συγκεντρώσεις του Mn και Zn στην ξηρή βιομάζα (dry biomass - DW) των φύλλων και καρπών που αφαιρέθηκαν από φυτά αγγουριάς σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια, όπως επηρεάζεται από τις συγκεντρώσεις Mn και Zn στα θρεπτικά διαλύματα αναπλήρωσης που εισάγονται για αντιστάθμιση της απορρόφησης από τα φυτά. Οι κατακόρυφες ράβδοι υποδεικνύουν ± τυπικά σφάλματα των μέσων όρων τριών μετρήσεων.

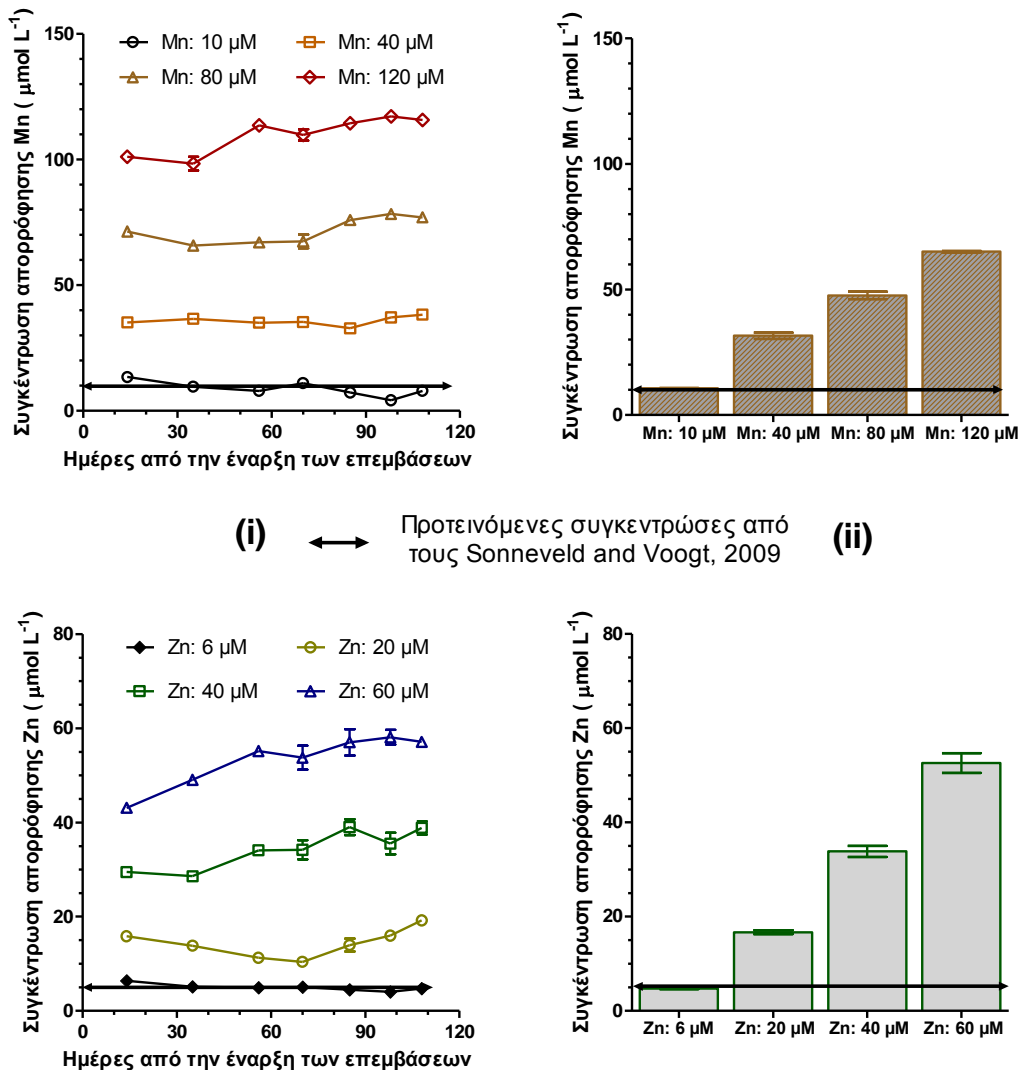


Σχήμα 2.4. Οι συγκεντρώσεις Mn και Zn στην ξηρή βιομάζα (dry biomass - DW) του στελέχους και της ρίζας της αγγουριάς σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια, όπως επηρεάζεται από τις συγκεντρώσεις Mn και Zn στα θρεπτικά διαλύματα αναπλήρωσης που εισάγονται για αντιστάθμιση της απορρόφησης από τα φυτά. Σε κάθε γράφημα, οι στήλες χωρίς κοινό γράμμα υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μέσων όρων τριών μετρήσεων ($P \leq 0,05$).

Οι συγκεντρώσεις απορρόφησης του Mn και του Zn που εκτιμήθηκαν με υπολογισμό της απορρόφησης τους από το ανακυκλούμενο ΘΔ (Gorbe and Calatayud, 2010), καθώς επίσης και της απορρόφησης νερού, φαίνονται στο Σχήμα 2.5-(i). Οι υπολογισμοί έγιναν υποκαθιστώντας με κατάλληλες τιμές τις εμφανιζόμενες στο Σχήμα 2.1 παραμέτρους $C_{x_{bi}}$ και $C_{x_{ei}}$, τους καταγραφόμενους όγκους του απορροφούμενου θρεπτικού διαλύματος σε κάθε χρονικό διάστημα (τα δεδομένα δεν παρουσιάζονται) το V_{ui} , τον ολικό όγκο του ανακυκλούμενου ΘΔ (72 L) το V_r , και με τις

συγκεντρώσεις των επεμβάσεων του Mn και Zn το C_{xa} στην εξίσωση (1). Κατά τη μέτρηση της απορρόφησης των ιόντων και του νερού από τα θρεπτικά διαλύματα που παρέχονται στα φυτά σε κλειστά υδροπονικά συστήματα, όπως συμβαίνει στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η εξίσωση (1), οι αναλογίες που λαμβάνονται αποτελούν συγκεντρώσεις απορρόφησης (Pardossi *et al.*, 2006). Για να ελεγχθεί αν οι συγκεντρώσεις απορρόφησης Mn και Zn που ελήφθησαν χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1) αντιπροσωπεύουν καθαρές αναλογίες απορρόφησης θρεπτικού στοιχείου - νερού στο αγγούρι, οι τελευταίες υπολογίστηκαν και με μία εναλλακτική μεθοδολογία και συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2), η οποία βασίζεται στον προσδιορισμό των συνολικών ποσοτήτων αυτών των ιχνοστοιχείων στους φυτικούς ιστούς (Gorbe and Calatayud, 2010). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν εμφανίζονται στο Σχήμα 2.5-(ii). Και οι δύο μέθοδοι προσδιορισμού δείχνουν ότι οι συγκεντρώσεις απορρόφησης του Mn και του Zn από την αγγουριά επηρεάστηκαν σε μεγάλο βαθμό από τα επίπεδα αυτών των ιχνοστοιχείων στο παρεχόμενο ΘΔ, σε συμφωνία με προηγούμενα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν από τους Sonneveld and de Bes (1984). Επιπλέον, και οι δύο μέθοδοι εκτίμησης οδήγησαν σε παρόμοιες συγκεντρώσεις απορρόφησης Zn σε όλα τα επίπεδα Zn στο ανακυκλούμενο ΘΔ. Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις απορρόφησης Mn που υπολογίστηκαν με την ανάλυση των φυτικών ιστών, ήταν σημαντικά χαμηλότερες στις τρεις επεμβάσεις με τα υψηλότερα επίπεδα Mn στο ΘΔ αναπλήρωσης από αυτές που ελήφθησαν με μέτρηση της απομάκρυνσης του Mn από το ανακυκλούμενο ΘΔ. Οι σαφώς υψηλότερες συγκεντρώσεις απορρόφησης Mn σε σχέση με αυτές που εκτιμήθηκαν με βάση την ανάκτηση του Mn από την ολική φυτική βιομάζα αποδίδονται στη μερική ακινητοποίηση του διαλυτού Mn από οξειδωτικά βακτήρια στο θρεπτικό διάλυμα, η οποία είναι σύνηθες φαινόμενο σε αεριζόμενα θρεπτικά διαλύματα (Bromfield, 1978). Τα βακτήρια αναπτύσσονται ταχέως σε υψηλά επίπεδα pH και οξειδώνουν ένα σημαντικό μέρος του εφαρμοζόμενου δισθενούς Mn, το οποίο καθιζάνει ως υδροξείδιο του μαγγανίου (Sonneveld και Voogt, 1980). Στην παρούσα μελέτη, το pH στο ανακυκλούμενο διάλυμα κυμάνθηκε μεταξύ 5,6 και 6,8 κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (τα δεδομένα δεν παρουσιάζονται). Όταν οι συγκεντρώσεις απορρόφησης του Mn εκτιμήθηκαν με καταγραφή της απομάκρυνσης του Mn από το ανακυκλούμενο ΘΔ, το ακινητοποιημένο Mn δεν μπορούσε να διακριθεί από εκείνο

που προσλήφθηκε από τα φυτά, και έτσι ελήφθησαν υψηλότερες τιμές σε σχέση με εκείνες που βασίζονται στο Mn που ανακτήθηκε από τους φυτικούς ιστούς. Μια μείωση του διαλυτού Mn λόγω μικροβιακής οξείδωσής του στο ανακυκλούμενο ΘΔ είναι ευεργετική όταν το Mn παρέχεται σε υπερβολικά υψηλή δοσολογία αλλά δυνητικά επιβλαβής εάν η παροχή Mn αντιστοιχεί στις συνήθεις απαιτήσεις της αγγουριάς.

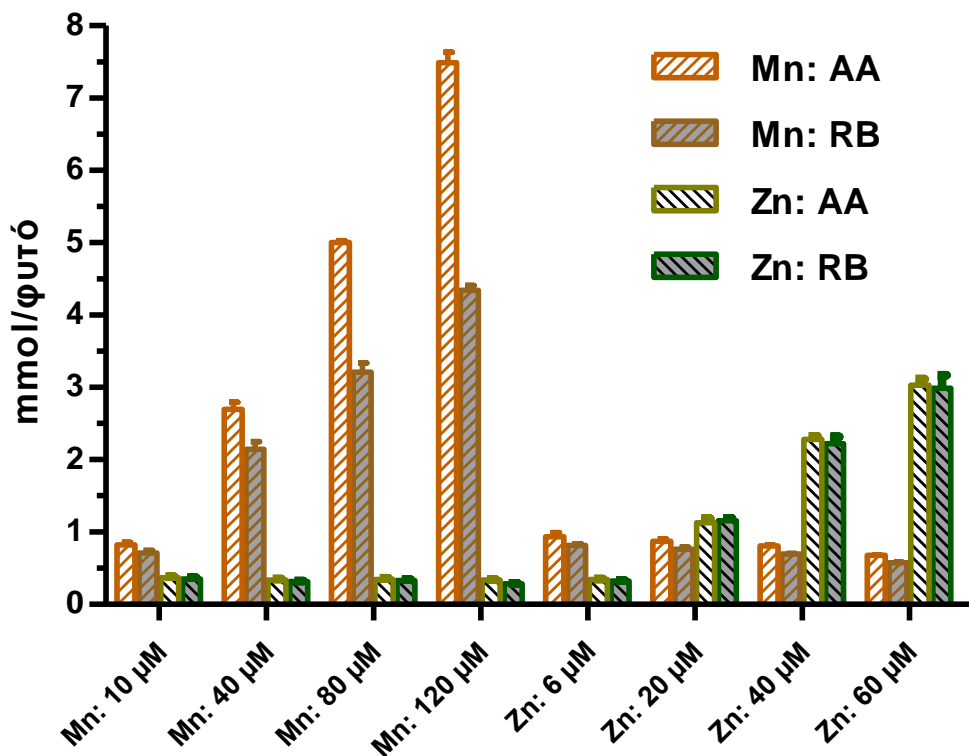


Σχήμα 2.5. Συγκεντρώσεις απορρόφησης Mn και Zn σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια αγγουριάς υπολογισμένες με δύο διαφορετικές μεθόδους, συγκεκριμένα: i) με βάση την απομάκρυνση από το ανακυκλούμενο ΘΔ και ii) με βάση τη συνολική ποσότητα που ανακτήθηκε από τη φυτική βιομάζα. Οι κατακόρυφες ράβδοι υποδεικνύουν ± τυπικά σφάλματα των μέσων όρων τριών μετρήσεων. Οι οριζόντιες γραμμές δείχνουν τις συγκεντρώσεις Mn και Zn σε θρεπτικά διαλύματα για κλειστές υδροπονικές καλλιέργειες αγγουριάς που συνιστούν οι Ολλανδοί (Sonneveld και Voogt, 2009).

Στο Σχήμα 2.6, οι συνολικές ποσότητες Mn και Zn που παρασχέθηκαν και απομακρύνθηκαν από το ΘΔ μετά από 110 ημέρες καλλιέργειας αγγουριάς συγκρίνονται με αυτές που ανακτήθηκαν από τους ιστούς των φυτών. Σε όλες τις επεμβάσεις, οι ποσότητες του Zn που παρασχέθηκαν και απομακρύνθηκαν από το ανακυκλούμενο ΘΔ ήταν παρόμοιες με εκείνες που ανακτήθηκαν από τους φυτικούς ιστούς. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι και οι δύο μέθοδοι είναι αξιόπιστες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων στα κλειστά υδροπονικά συστήματα, σε συμφωνία με προηγούμενες αναφορές (Kläring, 2001, Barak *et al.*, 1996). Ωστόσο, στις τρεις επεμβάσεις με την υψηλότερη συγκέντρωση Mn στο ΘΔΑ, τα ποσά του Mn που αφαιρέθηκαν από το ΑΘΔ ήταν υψηλότερα από αυτά που ανακτήθηκαν από τους φυτικούς ιστούς. Αυτές οι διαφορές, φαίνεται να οφείλονται στην αναφερόμενη και παραπάνω μερική ακινητοποίηση του Mn λόγω της δράσης συγκεκριμένων βακτηρίων που οξειδώνουν το Mn (Sonneveld and Voogt, 1980). Η ύπαρξη αυτών των διαφορών δείχνει ότι ο αξιόπιστος προσδιορισμός της απορρόφησης Mn σε πειράματα καλλιέργειας σε υδατικά διαλύματα θα πρέπει να βασίζεται στην συνολική εναπόθεση Mn στους ιστούς των φυτών και όχι στην απομάκρυνση του Mn από το εξωτερικό θρεπτικό μέσο.

Οι συγκεντρώσεις απορρόφησης Mn στην επέμβαση με χαμηλό Mn (10 μM) έφθασαν περιστασιακά σε επίπεδα μεταξύ 11 έως 13,5 μM στο ΑΘΔ κατά τη διάρκεια των πρώτων 70 ημερών μετά την έναρξη των επεμβάσεων. Αυτές οι τιμές ήταν υψηλότερες από τα επίπεδα Mn στο ΘΔ αναπλήρωσης και η διαφορά μεταξύ Mn εισόδου και Mn εξόδου οδήγησε σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις Mn στο ανακυκλούμενο ΘΔ κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Ωστόσο, στη συνέχεια η συγκέντρωση απορρόφησης Mn μειώθηκε σε επίπεδα μέχρι 4 μM . Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει το συμπέρασμα ότι πρέπει να εφαρμόζονται συγκεντρώσεις Mn από περίπου 12 έως 14 μM στα ΘΔΑ για κλειστές υδροπονικές καλλιέργειες αγγουριάς στις μεσογειακές κλιματολογικές συνθήκες κατά τους πρώτους 2 μήνες της καλλιέργειας. Μετά τους πρώτους δύο μήνες, η συγκέντρωση μπορεί να μειωθεί στα 10 μM ή και σε ελαφρώς χαμηλότερα επίπεδα. Οι συστάσεις αυτές δεν είναι πολύ διαφορετικές από το επίπεδο των 10 μM , που προτείνεται από τους de Kreij *et al.*, (1999) με βάση τα δεδομένα που έχουν προκύψει από πειράματα

στις ολλανδικές κλιματολογικές συνθήκες. Η συγκέντρωση απορρόφησης του Zn στην επέμβαση με χαμηλό Zn (6 μM) ανήλθε σε 6,4 μM κατά τη διάρκεια των πρώτων 21 ημερών από την έναρξη των επεμβάσεων αλλά έπεσε σε επίπεδα μεταξύ 4 έως 5 μM στη συνέχεια, οδηγώντας έτσι σε μια συσσώρευση Zn στο ριζικό περιβάλλον, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Έτσι, μια συγκέντρωση Zn από 6 έως 7 μM στο ΘΔ αναπλήρωσης κατά τη διάρκεια των τριών πρώτων εβδομάδων της καλλιέργειας, ακολουθούμενη στη συνέχεια από μία μείωση σε 5 μM και πιθανώς σε 4 μM φαίνεται να είναι η πλέον κατάλληλη πολιτική για κλειστού κύκλου υδροπονική καλλιέργεια αγγουριάς, στις κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου. Σημειώνεται ότι οι De Kreij *et al.*, (1999) προτείνουν μια συγκέντρωση Zn 5 μM το ΘΔ αναπλήρωσης που παρέχεται στις αγγουριές, όταν καλλιεργούνται σε κλειστά υδροπονικά συστήματα κάτω από ολλανδικές κλιματολογικές συνθήκες.



Σχήμα 6. Φαινομενική απορρόφηση (apparent uptake - AA) Mn και Zn από το θρεπτικό διάλυμα έναντι των ποσοτήτων που ανακτήθηκαν από την ολική βιομάζα (recovered biomass- RB) των φυτών αγγουριάς σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια, όπως επηρεάζεται από τις συγκεντρώσεις Mn και Zn στα θρεπτικά διαλύματα αναπλήρωσης που εισάγονται για αντιστάθμιση της απορρόφησης από τα φυτά. Οι κατακόρυφες ράβδοι υποδεικνύουν \pm τυπικά σφάλματα των μέσων όρων τριών μετρήσεων.

2.4. Συμπεράσματα

Οι συγκεντρώσεις απορρόφησης Mn και Zn από την αγγουριά καλλιεργούμενη σε ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα υπολογίστηκαν με τη βοήθεια δύο ανεξάρτητων μεθόδων. Η πρώτη μέθοδος βασίστηκε στην απομάκρυνση του Mn, του Zn, και του νερού από το ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα, ενώ η δεύτερη μέθοδος βασίστηκε στις συνολικές ποσότητες Mn και Zn που ανακτήθηκαν από τη βιομάζα των φυτών και την συνολική απορρόφηση νερού. Και οι δύο μέθοδοι έδωσαν παρόμοιες συγκεντρώσεις απορρόφησης για το Mn στο χαμηλό επίπεδο εφοδιασμού Mn και για τον Zn σε όλα τα επίπεδα τροφοδοσίας Zn. Ωστόσο, στα τρία υψηλότερα επίπεδα παροχής Mn, οι τιμές που υπολογίστηκαν με βάση την απομάκρυνση των θρεπτικών στοιχείων από το ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα ήταν σημαντικά υψηλότερες από αυτές που βρέθηκαν με τη μέτρηση της συνολικής περιεκτικότητας Mn στη φυτική βιομάζα. Αυτές οι διαφορές στις τρεις επεμβάσεις με υψηλή παροχή-Mn αποδόθηκαν σε μερική ακινητοποίηση του Mn λόγω βακτηριακής οξείδωσης στο θρεπτικό διάλυμα. Με βάση τις εκτιμώμενες συγκεντρώσεις απορρόφησης Mn, ένα επίπεδο Mn από 12 έως 14 μM κατά τη διάρκεια των πρώτων 2 μηνών της καλλιέργειας, που ακολουθείται στη συνέχεια από μια μείωση στα ή ελαφρώς κάτω από τα 10 μM , προτείνεται για το ΘΔ αναπλήρωσης σε κλειστού κύκλου υδροπονική καλλιέργεια αγγουριού υπό κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου. Οι αντίστοιχες συστάσεις για τον Zn είναι από 6 έως 7 μM κατά τη διάρκεια των τριών πρώτων εβδομάδων της καλλιέργειας, ακολουθούμενες μετέπειτα από μια μείωση σε 5 μM και πιθανώς σε 4 μM .

ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΡΙΤΟ: ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥ ΚΑΙ ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ ΣΤΗΝ ΑΓΓΟΥΡΙΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.

3.1. Εισαγωγή

Τα θερμοκήπια που χρησιμοποιούν υδροπονικά συστήματα θεωρούνται καλύτερα σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα παραγωγής, με καλλιέργεια στο έδαφος, όσον αφορά την αποδοτικότητα χρήσης του νερού και των θρεπτικών στοιχείων (Sheikh, 2006). Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα του υδροπονικού συστήματος εξαρτάται από το σχεδιασμό του, τη διαχείριση του νερού άρδευσης και την προσθήκη θρεπτικών στοιχείων. Η ανακύκλωση του νερού αποστράγγισης αυξάνει την αποδοτικότητα χρήσης του νερού και των θρεπτικών στοιχείων στα υδροπονικά θερμοκήπια και μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την απόρριψη της απορροής. Η ανακύκλωση της απορροής οδήγησε σε μείωση 33% του νερού που χρησιμοποιείται για άρδευση και αντίστοιχη μείωση των χρησιμοποιούμενων θρεπτικών στοιχείων για την παραγωγή αγγουριού (Grewal *et al.*, 2011). Με δεδομένο ότι αυτή καθαυτή η ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος δεν φαίνεται να μειώνει την απόδοση των καλλιεργειών ή την ποιότητα των προϊόντων (Zekki *et al.*, 1996, Raviv *et al.*, 1998, Savvas και Gizas, 2002), αρκετοί καλλιεργητές στρέφονται από τα ανοικτά συστήματα (είτε αυτά αφορούν καλλιέργεια στο έδαφος ή σε υπόστρωμα) προς τα κλειστά υδροπονικά συστήματα. Από την άλλη πλευρά, στα κλειστά υδροπονικά συστήματα, οι ανισορροπίες στην αναπλήρωση του θρεπτικού διαλύματος είναι συχνές λόγω διαφορετικών αναλογιών πρόσληψης και παροχής κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (Sonneveld, 2000, Savvas, 2002a, Bugbee, 2004).

Μοντέλα βασιζόμενα στην αναπλήρωση των θρεπτικών ουσιών που απορροφούνται από τα φυτά σε κλειστά υδροπονικά συστήματα θα μπορούσαν να αυξήσουν σημαντικά την ακρίβεια των υπολογισμών, ώστε να αποτραπεί αποτελεσματικά η εξάντληση των θρεπτικών στοιχείων, ενώ την ίδια στιγμή να ελαχιστοποιηθεί η αύξηση της ολικής συγκέντρωσης αλάτων. Τέτοια μηχανιστικά μοντέλα βασιζόμενα σε θεωρητικές προσεγγίσεις, όπως η εξίσωση Michaelis-Menten είναι ήδη διαθέσιμα (Ben-Asher *et al.*, 1982, Silberbush and Ben-Asher, 2001,

Silberbush *et al.*, 2005, Mathieu *et al.*, 2006). Τα μοντέλα αυτά όμως πολύ δύσκολα θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στα παραγωγικά θερμοκήπια, δεδομένου ότι βασίζονται σε μια πληθώρα μεταβλητών που περιπλέκουν την εφαρμογή τους στην πράξη. Αυτό το πρόβλημα θα μπορούσε να ξεπεραστεί με την συσχέτιση της συγκέντρωσης των συσσωρευόμενων ιόντων στο ανακυκλούμενο ΘΔ με μια απλή μεταβλητή η οποία μπορεί εύκολα να μετρηθεί, όπως είναι η αθροιστική κατανάλωση νερού (Savvas *et al.*, 2005, Varlagas *et al.*, 2010).

Ο ρυθμός απορρόφησης νερού ακολουθεί τις μεταβολές του μεγέθους των φυτών και των περιβαλλοντικών συνθηκών με παρόμοιο πρότυπο με το ρυθμό απορρόφησης ιόντων, με αποτέλεσμα, οι διακυμάνσεις της αναλογίας ιόν/νερό να είναι μικρές όταν οι συγκεντρώσεις του ιόντος είναι σταθερές στο ριζικό περιβάλλον (Savvas and Lenz, 1995, Pardossi *et al.*, 2004). Ως εκ τούτου, όταν οι συγκεντρώσεις των ιόντων που συσσωρεύονται στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα συσχετίζονται με την απορρόφηση του νερού, η οποία μπορεί να καταγραφεί σε πραγματικό χρόνο, μπορούν έμμεσα να συσχετιστούν με αμφότερες τις διακυμάνσεις στο μέγεθος των φυτών και τις συνθήκες του περιβάλλοντος ανάπτυξης. Μοντέλα που βασίζονται στη σχέση των ιοντικών συγκεντρώσεων στο ανακυκλούμενο ΘΔ σε κλειστά υδροπονικά συστήματα με την απορρόφηση νερού έχουν ήδη δοκιμαστεί για την τομάτα (Carmassi *et al.*, 2005) και το αγγούρι (Savvas *et al.*, 2005a).

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκε η σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης του μαγγανίου και του ψευδαργύρου στο ριζικό περιβάλλον με την αθροιστική κατανάλωση νερού χρησιμοποιώντας προηγούμενα καθορισμένες εξισώσεις (Savvas *et al.*, 2005, 2008) μεταξύ των συγκεντρώσεων απορρόφησης και των συγκεντρώσεων στο ριζικό περιβάλλον. Για το σκοπό αυτό εφαρμόστηκαν διαφορετικές συγκεντρώσεις Mn και Zn στο διάλυμα αναπλήρωσης που εισάγεται στο σύστημα για να αντισταθμίσει την πρόσληψη νερού και θρεπτικών στοιχείων. Τα δεδομένα που ελήφθησαν χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση ενός μοντέλου το οποίο μπορεί να ενσωματωθεί σε ευφυή συστήματα αυτοματισμού για τη βελτίωση της διαχείρισης της διατροφής της αγγουριάς όταν καλλιεργείται σε κλειστά υδροπονικά συστήματα.

3.2. Υλικά και μέθοδοι

Τα δεδομένα του παρόντος πειράματος προέρχονται από το 2^ο πείραμα (σελίδα 83) το οποίο περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2.2. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη και βαθμονόμηση του μοντέλου απορρόφησης Mn και Zn με βάση την αθροιστική κατανάλωση νερού περιλαμβάνει αρχικά την συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων στο ανακυκλούμενο ΘΔ και των συγκεντρώσεων απορρόφησης και κατόπιν την έκφραση της συγκέντρωσης στο ΘΔ ως συνάρτηση της αθροιστικής κατανάλωσης νερού χρησιμοποιώντας μοντέλο ισοζυγίου μάζας.

Αλληλεπιδράσεις μεταξύ συγκεντρώσεων θρεπτικών στοιχείων στο ανακυκλούμενο ΘΔ και συγκεντρώσεων απορρόφησης αναφέρονται για το νάτριο και το χλώριο από τους Sonneveld *et al.*, (1999) σε καλωπιστικά φυτά, από τους Carmassi *et al.*, (2005) και Varlagas *et al.*, (2010) για την τομάτα και από τους Savvas *et al.*, (2005a, 2007 and 2008) για την αγγουριά, τη φασολιά και την πιπεριά, αντίστοιχα. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε από αυτούς τους ερευνητές για την δημιουργία αλληλεπίδρασης μεταξύ των συγκεντρώσεων του Na και του Cl στο ριζικό περιβάλλον (C_{xr} , $x = \text{Na}$ ή Cl) και των συγκεντρώσεων απορρόφησης αυτών των ιόντων (C_{xu} , $x = \text{Na}$ ή Cl) ήταν το παρακάτω:

$$C_{xu} = a(C_{xr})^b \quad (1)$$

όπου a και b είναι σταθερές εξαρτώμενες από τον γονότυπο του φυτού. Αν η σταθερά b είναι ίση με την μονάδα, η C_{xu} σχετίζεται γραμμικά με την C_{xr} , που είναι ειδική περίπτωση. Οι Carmassi *et al.*, (2005) χρησιμοποίησαν μια γραμμική σχέση μεταξύ των C_{xu} και C_{xr} στην τομάτα για να προσομοιώσουν την απορρόφηση του Na σε κλειστά υδροπονικά συστήματα. Σύμφωνα με τους Sonneveld *et al.*, (1999), οι γραμμικές συναρτήσεις είναι μερικές φορές κατάλληλες για να περιγράψουν συσχετίσεις μεταξύ των συγκεντρώσεων του Na και του Cl στο ριζικό περιβάλλον και των συγκεντρώσεων απορρόφησης αυτών των ιόντων, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις καμπυλόγραμμες συναρτήσεις παρέχουν πιο ακριβή περιγραφή των δεδομένων. Οι Savvas *et al.*, (2007) βρήκαν γραμμική σχέση στο φασόλι για το Cl⁻ αλλά καμπυλόγραμμη για το Na⁺ μεταξύ C_r και C_u . Από την άλλη πλευρά, οι Savvas *et al.* (2008) και Varlagas *et al.* (2010), που εργάστηκαν σε κλειστή υδροπονική

καλλιέργεια πιπεριάς και τομάτας, αντίστοιχα, βρήκαν καμπυλόγραμμες σχέσεις μεταξύ C_r και C_u για αμφότερα τα Cl^- και Na^+ .

Δεδομένου ότι στην παρούσα εργασία η συσσώρευση του Mn και του Zn στις ανεξάρτητες πειραματικές μονάδες καλλιέργειας αγγουριάς που αναπτύχθηκαν σε κλειστό υδροπονικό σύστημα ακολούθησε ένα παρόμοιο πρότυπο με αυτό που βρέθηκε για το Na και το Cl από τους Savvas *et al.* (2008) και Varlagas *et al.* (2010), η εξίσωση (1) χρησιμοποιήθηκε επίσης για το Mn και το Zn.

Για την προσομοίωση των συγκεντρώσεων Mn και Zn στο ριζικό περιβάλλον των φυτών αγγουριάς που καλλιεργούνται σε κλειστά υδροπονικά συστήματα (C_{xr}), αυτές μπορούν να εκφραστούν ως συναρτήσεις της αθροιστικής κατανάλωσης νερού η οποία μπορεί να παρακολουθείται σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η προσέγγιση έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε κλειστά υδροπονικά συστήματα για την προσομοίωση των συγκεντρώσεων Na και Cl σε ανακυκλούμενο ΘΔ χρησιμοποιώντας το ακόλουθο μοντέλο ισοζυγίου μάζας (Savvas *et al.*, 2005, 2008):

$$\frac{dC_{xr}}{dV_w} = \frac{[C_{xs} - a(C_{xr})^b]}{V_r} \quad (2)$$

όπου ο δείκτης x υποδεικνύει το είδος του ιόντος, το C_{xs} απεικονίζει την συγκέντρωση του x ιόντος στο ΘΔ αναπλήρωσης, το V_w απεικονίζει την αθροιστική κατανάλωση νερού ανά φυτό η οποία είναι μια αυξανόμενη μεταβλητή κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, και το V_r απεικονίζει τον συνολικό όγκο του ανακυκλούμενου ΘΔ ανά φυτό.

Η αξιοπιστία της παραπάνω εξίσωσης ελέγχθηκε με χρήση δεδομένων που ελήφθησαν από το 1^ο πείραμα.

3.3. Αποτελέσματα και συζήτηση

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1 η συσσώρευση τόσο του μαγγανίου όσο και του ψευδαργύρου στο ανακυκλούμενο ΘΔ ακολούθησαν κυρτή καμπύλη με το χρόνο, στις τρεις υψηλότερες επεμβάσεις Mn και Zn, με μια απότομη αύξηση κατά τη διάρκεια των αρχικών 35-50 ημερών από την έναρξη των επεμβάσεων (DATI), ακολουθούμενες από σταδιακή σταθεροποίηση σε ανώτατα επίπεδα. Στις επεμβάσεις με χαμηλή συγκέντρωση Mn και Zn, ο ρυθμός συσσώρευσης ήταν πιο αργός και τα ανώτατα όρια

επιτεύχθηκαν αργότερα. Στις επεμβάσεις με τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις Mn (8 μM) και Zn (4 μM) στο ΘΔΑ, η συσσώρευση του Mn και του Zn κατά τη διάρκεια των αρχικών 20 ημερών μειώθηκε. Στη συνέχεια, η συγκέντρωση του Mn παρέμεινε σχεδόν σε σταθερά επίπεδα, ενώ εκείνη του Zn αυξήθηκε αργά μέχρι την 100^η ημέρα από την έναρξη των επεμβάσεων και σταθεροποιήθηκε πάλι σε ένα μέγιστο όριο μέχρι το τέλος του πειράματος (Σχήμα 2.1). Παρόμοια πρότυπα σταδιακής συσσώρευσης των ιόντων σε κλειστά υδροπονικά συστήματα, που οφείλεται σε συνεχή εισροή αλάτων έχουν παρατηρηθεί για το Na^+ και το Cl^- (Savvas *et al*, 2005a).

Όταν οι συγκεντρώσεις κάποιων ιόντων στο ριζικό περιβάλλον των φυτών αυξάνονται με το χρόνο (όπως συνέβη με το Mn^{2+} ή/και το Zn^{2+} στην παρούσα πειραματική εργασία), οι συγκεντρώσεις απορρόφησής τους επίσης αυξάνονται, όπως αναφέρεται και από τους Sonneveld και Voogt (2009). Ωστόσο, καθώς οι συγκεντρώσεις απορρόφησης Mn^{2+} και Zn^{2+} αυξάνονταν με το χρόνο, σε ένα ορισμένο χρονικό σημείο έφτασαν σε επίπεδα ίσα με τις συγκεντρώσεις τους στο ΘΔΑ. Στο σημείο αυτό, οι μάζες των Mn και Zn που εισάγονταν στο σύστημα μέσω του ΘΔΑ έγιναν ίσες με εκείνες που απομακρύνονται μέσω της απορρόφησης των φυτών. Κατά συνέπεια, μετά από αυτό το χρονικό σημείο, οι συγκεντρώσεις Mn και Zn στο ανακυκλούμενο ΘΔ δεν αυξάνονται άλλο, όπως φαίνεται στο και στο Σχήμα 2.1. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, οι μέγιστες συγκεντρώσεις του Mn και του Zn στο ανακυκλούμενο ΘΔ επέβαλαν τόσο υψηλές συγκεντρώσεις απορρόφησης Mn και Zn, αντίστοιχα, όσο ήταν και τα επίπεδα αυτών των θρεπτικών στοιχείων στο ΘΔΑ. Έτσι, κάθε μέγιστη συγκέντρωση Mn και Zn στο Σχήμα 2.1 αντιστοιχεί σε τόσο υψηλή συγκέντρωση απορρόφησης όσο η συγκέντρωση του αντίστοιχου ιχνοστοιχείου στο ΘΔΑ της συγκεκριμένης επέμβασης. Τα ληφθέντα ζεύγη των συγκεντρώσεων θρεπτικών στοιχείων στο ανακυκλούμενο ΘΔ και οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις απορρόφησης μπορούν να υποβληθούν σε ανάλυση παλινδρόμησης για τη δημιουργία εμπειρικών σχέσεων μεταξύ τους.

Η εφαρμογή ανάλυσης παλινδρόμησης για τη δημιουργία εμπειρικών σχέσεων μεταξύ C_{xu} and C_{xr} απεκάλυψε μια γραμμική σχέση όταν το x στην εξίσωση (1) ήταν Mn αλλά μια κυρτή συνάρτηση όταν το x ήταν Zn (Σχήμα 3.1). Όπως έχει αναφερθεί για το Na, κυρτές σχέσεις μεταξύ C_r και C_u δείχνουν μια σταδιακή εξασθένηση των

μηχανισμών που εμπλέκονται στον ενεργό αποκλεισμό των ιόντων που είναι παρόντα σε υπερβολικά υψηλές συγκεντρώσεις στη ζώνη της ρίζας (Varlagas *et al.*, 2010).

Στην παρούσα εργασία, η εξίσωση (2) χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των συγκεντρώσεων του Mn και του Zn στη ζώνη ρίζας της αγγουριάς και το x αντιπροσωπεύει είτε Mn είτε Zn. Οι σταθερές a και b στην εξίσωση (2) ήταν εκείνες που ελήφθησαν από την ανάλυση παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας δεδομένα από το παρόν πείραμα και την εξίσωση (1), ως πρότυπο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, τα a και b ήταν 0,438 και 1 για το Mn, και 0,0013 και 2,013 για τον Zn, αντίστοιχα. Έτσι, για την προσομοίωση της συγκέντρωσης Mn σε ανακυκλούμενο ΘΔ, η ακόλουθη εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

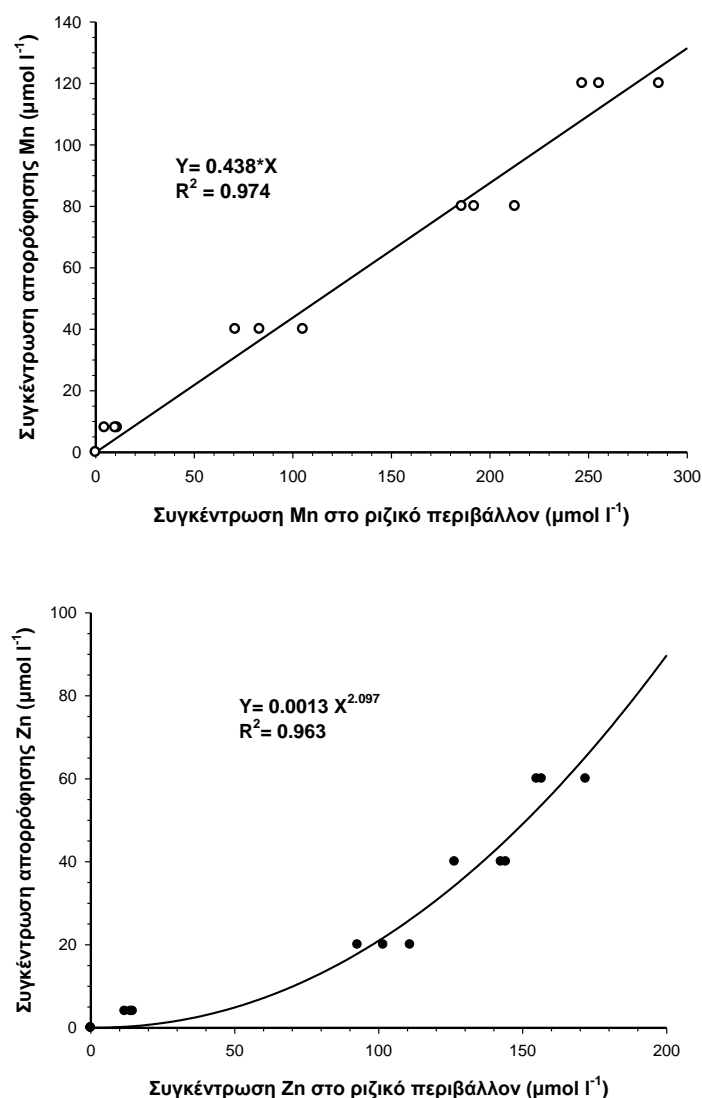
$$\frac{dC_{Mnr}}{dV_w} = \frac{C_{Mns} - 0.438C_{Mnr}}{V_r} \quad (3)$$

Ομοίως, για την προσομοίωση της συγκέντρωσης Zn σε ανακυκλούμενο ΘΔ, η ακόλουθη εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

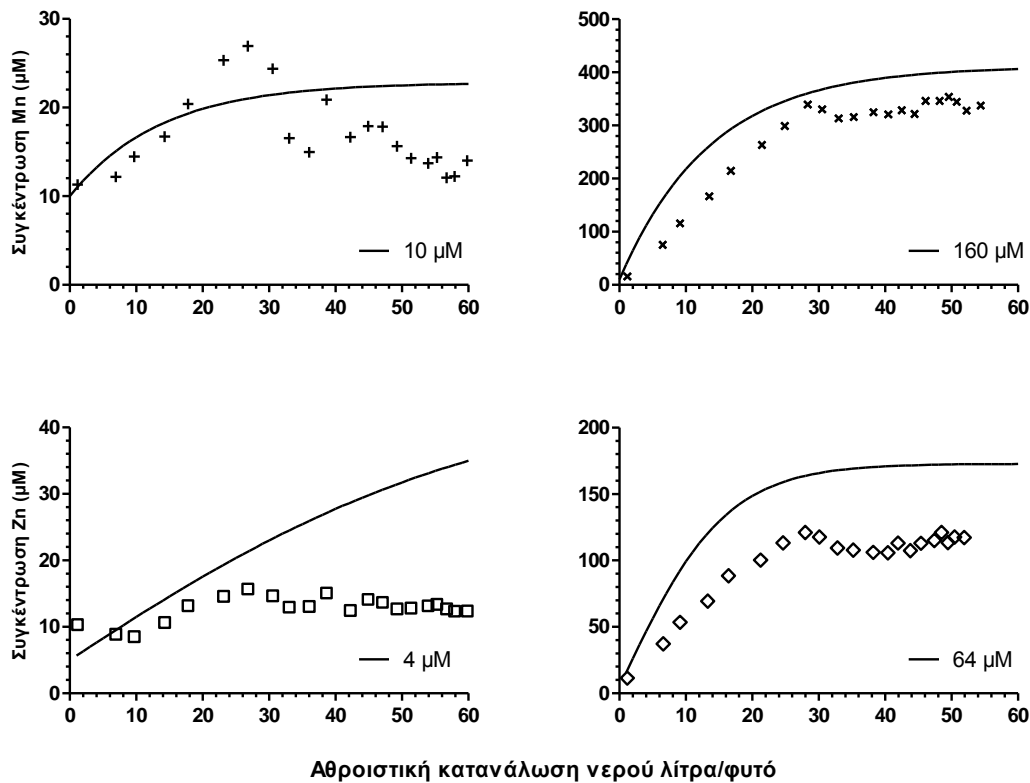
$$\frac{dC_{Znr}}{dV_w} = \frac{[C_{Zns} - 0.0013(C_{Znr})^{2.013}]}{V_r} \quad (4)$$

Δεδομένου ότι οι εξισώσεις (3) και (4) ελήφθησαν με βαθμονόμηση του γενικού μοντέλου που περιγράφεται από την εξίσωση (2) χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από την παρούσα μελέτη, η επικύρωσή τους θα πρέπει να βασίζεται σε δεδομένα από ανεξάρτητες μελέτες, όπως προτείνεται από van Oijen (2002). Σε μια προηγούμενη μελέτη (Tzerakis *et al.*, 2012) η οποία συνιστά το 1^ο πείραμα της παρούσας διδακτορικής διατριβής (σελ. 72), φυτά αγγουριάς αναπτύχθηκαν σε ανακυκλούμενο ΘΔ χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά επίπεδα συγκεντρώσεων Mn και Zn στο ΘΔΑ (C_{Mns} και C_{Zns} , αντίστοιχα), ειδικότερα 10 και 160 μM για το Mn και 4 και 64 μM για τον Zn. Ο όγκος του ανακυκλούμενου ΘΔ ανά φυτό (V_r) ανήλθε σε 6 L στο προαναφερόμενο πείραμα. Η καμπύλες προσομοίωσης των C_{Mnr} και C_{Znr} που ελήφθησαν μετά την αντικατάσταση των παραπάνω αναφερόμενων τιμών για τα C_{Mns} , C_{Zns} , και V_r στην (3) και (4) και η επίλυση τους σύμφωνα με την αριθμητική μέθοδο των Runge - Kutta (Butcher, 1987) παρατίθενται στο Σχήμα 3. Στο ίδιο σχήμα, οι μετρηθείσες τιμές C_{Mnr} και C_{Znr} παρατίθενται επίσης κατά αντιπαράσταση με τις προσομοιωμένες τιμές για τις τιμές V_w στις οποίες αντιστοιχούν, ώστε να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα των (3) και (4) για την προσομοίωση της συγκέντρωσης του Mn

και Zn, αντίστοιχα, στο ανακυκλούμενο ΘΔ. Όπως μπορεί να συναχθεί από το Σχήμα 3.2, το μοντέλο θα μπορούσε να προσομοιώσει επιτυχώς την πορεία της συσσώρευσης Mn στο ανακυκλούμενο ΘΔ στην υψηλότερη συγκέντρωση Mn στο ΘΔ αναπλήρωσης (160 μM). Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου για να προβλέψει την πορεία της συσσώρευσης Zn στο ανακυκλούμενο ΘΔ ήταν μέτρια όταν το επίπεδο Zn στο ΘΔ αναπλήρωσης ήταν 64 μM , με μια τάση να υπερεκτιμά τις πραγματικές τιμές κατά 20% περίπου. Ωστόσο, στις χαμηλές συγκεντρώσεις Mn και Zn στο NS αναπλήρωσης, το μοντέλο απέτυχε πλήρως να προσομοιώσει τις μετρούμενες τιμές.



Σχήμα 3.1. Σχέσεις μεταξύ των συγκεντρώσεων των Mn και Zn στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα και των αντίστοιχων συγκεντρώσεων απορρόφησης (μάζα των θρεπτικών στοιχείων ανά μονάδα όγκου του νερού που απορροφάται από τα φυτά) στις καλλιέργειες αγγουριάς. Τα σύμβολα δείχνουν μετρούμενες τιμές, ενώ οι γραμμές αντιπροσωπεύουν τις βέλτιστες σχέσεις που λαμβάνονται από την ανάλυση παλινδρόμησης.



Σχήμα 3.2. Συγκεντρώσεις μαγγανίου και ψευδαργύρου σε ανακυκλούμενα θρεπτικά διαλύματα σε σχέση με την αθροιστική κατανάλωση νερού από φυτά αγγουριάς που αναπτύσσονται επί 110 ημέρες. Οι γραμμές υποδεικνύουν τιμές που προβλέπεται από το μοντέλο σε δύο διαφορετικές συγκεντρώσεις Mn και Zn στο θρεπτικό διάλυμα που εισάγεται στα αυτόνομα συστήματα για την αντιστάθμιση της απορρόφησης των φυτών. Τα σύμβολα απεικονίζουν τιμές μέτρησης από δεδομένα της πρώτης εργασίας.

Αποτυχία του μοντέλου να προσομοιώσει την C_{xr} σε πολύ χαμηλά επίπεδα C_{xs} παρατηρήθηκε επίσης για το Na και Cl σε προηγούμενα πειράματα (Savvas *et al.*, 2005a; Savvas *et al.*, 2008) και αποδόθηκε σε διαφορές στους διαφορετικούς μηχανισμούς αποκλεισμού του άλατος που λειτουργούν σε χαμηλές και υψηλές εξωτερικές συγκεντρώσεις NaCl. Αντίστοιχα, διαφορετικοί μηχανισμοί πρόσληψης, με ενεργή απορρόφηση σε χαμηλές συγκεντρώσεις, και αποκλεισμό σε υψηλές συγκεντρώσεις έχουν παρατηρηθεί τόσο για το Mn (Marschner, 1991, Horst *et al.*, 1999), όσο και για τον Zn (Hall, 2002, Baker, 1981).

Συμπερασματικά, οι σταθερές a και b που προέκυψαν από την βαθμονόμηση του προσομοιώματος για το Mn και το Zn σε καλλιέργεια αγγουριάς σε κλειστό υδροπονικό σύστημα είναι κατάλληλες μόνο για υψηλές συγκεντρώσεις Mn και το Zn στο ΘΔΑ. Για να μπορεί να εφαρμοστεί σε σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις Mn και Zn

στο ΘΔΑ (κοντά στις συγκεντρώσεις απορρόφησης ή και λίγο μεγαλύτερες), το προσομοίωμα θα πρέπει να βαθμονομηθεί και να επαληθευτεί σε πειράματα με χαμηλές συγκεντρώσεις Mn και Zn (C_{XS}) στο ΘΔ αναπλήρωσης.

3.4. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία βαθμονομήθηκε για το Mn και τον Zn ένα μαθηματικό μοντέλο (προσομοίωμα) βασισμένο σε ισοζύγιο μαζών, το οποίο αρχικά αναπτύχθηκε με στόχο να προβλέπει τις συγκεντρώσεις του Na^+ και του Cl^- στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα με αποδεκτή ακρίβεια για πρακτικές εφαρμογές. Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια αγγουριάς. Για την εφαρμογή του μοντέλου απαιτείται η μέτρηση μόνο μίας μεταβλητής, της αθροιστικής κατανάλωσης νερού. Ωστόσο, για την εφαρμογή του παραπάνω μοντέλου, η σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης απορρόφησης των Mn ή Zn και της αντίστοιχης συγκέντρωσης των Mn ή Zn στο ριζικό περιβάλλον πρέπει να καθοριστεί πειραματικά. Στην παρούσα εργασία η σχέση αυτή, στην περίπτωση του μαγγανίου ήταν γραμμική για την συγκεκριμένη κλίμακα εξωτερικών συγκεντρώσεων και η εξίσωση της ισορροπίας μαζών είχε αναλυτική λύση. Στην περίπτωση του ψευδαργύρου που η σχέση ήταν εκθετική, η εξίσωση είχε αριθμητική λύση σύμφωνα με την μέθοδο Runge–Kutta. Στη συνέχεια, η βαθμονόμηση του προσομοιώματος ελέγχθηκε, χρησιμοποιώντας δεδομένα από ένα άλλο, ανεξάρτητο πείραμα. Διαπιστώθηκε ότι η βαθμονόμηση του προσομοιώματος για το Mn και το Zn που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι κατάλληλη για υψηλές συγκεντρώσεις Mn και το Zn στο θρεπτικό διάλυμα αναπλήρωσης. Ωστόσο, η βαθμονόμηση του προσομοιώματος που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία αποδείχθηκε ακατάλληλη για χαμηλές συγκεντρώσεις τόσο του Mn όσο και του Zn στο θρεπτικό διάλυμα αναπλήρωσης. Αυτή η αστοχία αποδόθηκε στο γεγονός ότι οι μηχανισμοί που ελέγχουν την απορρόφηση τόσο του Mn όσο και του Zn είναι τελείως διαφορετικοί σε χαμηλές και υψηλές εξωτερικές συγκεντρώσεις των δύο αυτών ιχνοστοιχείων. Συνεπώς, για να μπορούν σε χαμηλές συγκεντρώσεις παροχής Mn ή Zn να προβλέπονται οι συγκεντρώσεις των δύο αυτών ιχνοστοιχείων στο ριζικό περιβάλλον μέσω του προσομοιώματος που τις συνδέει με την αθροιστική κατανάλωση νερού, απαιτείται περαιτέρω έρευνα. Σκοπός αυτής της έρευνας πρέπει να είναι η εκ νέου

βαθμονόμηση του προαναφερόμενου προσομοιώματος, εφαρμόζοντας χαμηλές συγκεντρώσεις παροχής Mn ή Zn.

ΜΕΡΟΣ Ε: ΓΕΝΙΚΗ ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συγκέντρωση του μαγγανίου και του ψευδαργύρου στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριάς εξαρτάται από την συγκέντρωση των στοιχείων αυτών στο εισερχόμενο στο σύστημα νερό άρδευσης που χρησιμοποιείται για την αναπλήρωση των απωλειών διαπνοής των φυτών. Χαμηλή συγκέντρωση σε συνδυασμό με υψηλό pH μπορεί να οδηγήσει σε έλλειψη των στοιχείων αυτών και μείωση την παραγόμενης βιομάζας. Η εμφάνιση τοξικότητας από υπερβολικής συγκέντρωσης των ανωτέρω στοιχείων είναι όμως συχνότερη. Στην παρούσα διατριβή, τα αρχικά συμπτώματα τοξικότητας μαγγανίου εμφανίστηκαν πρώτα στους βλαστούς και κατόπιν στα φύλλα, όταν η συγκέντρωση στα φύλλα ήταν υψηλότερη από $900 \text{ mg kg}^{-1} \text{ Mn}$. Τα αρχικά συμπτώματα τοξικότητας Zn ήταν χλώρωση των νεαρών φύλλων η οποία επεκτεινόταν προς τα ώριμα φύλλα όταν η περιεκτικότητα Zn στα φύλλα έφθασε το επίπεδο των 450 mg kg^{-1} . Ωστόσο, με βάση την απόδοση σε βιομάζα καρπών, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η αγγουριά επέδειξε αρκετά καλή αντοχή στις αυξημένες συγκεντρώσεις Mn ή /και Zn στο εισερχόμενο θρεπτικό διάλυμα για την αναπλήρωση των απωλειών διαπνοής. Οι συγκεντρώσεις των 160 και $64 \mu\text{mol l}^{-1}$ που εφαρμόστηκαν είναι δεκαεξαπλάσιες των κανονικών και παρόλα αυτά η μείωση στην παραγωγή βιομάζας ήταν μόλις 20% σε σχέση με το μάρτυρα. Στην καλλιεργητική πράξη, τόσο υψηλές συγκεντρώσεις σε υδροπονική καλλιέργεια ενδέχεται να συναντήσουμε είτε από εσφαλμένη ζύγιση των ιχνοστοιχείων κατά την παρασκευή των πυκνών θρεπτικών διαλυμάτων και λανθασμένη αναλογία ανάμιξης του πυκνού διαλύματος των ιχνοστοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα που παρέχεται στα φυτά είτε από υψηλή συγκέντρωση στο νερό άρδευσης όταν αυτό προέρχεται από περιοχές με βιομηχανική ρύπανση.

Ο ρυθμός συσσώρευσης του Mn και του Zn στο ανακυκλούμενο θρεπτικό ακολούθησε πορεία ανάλογη με μη θρεπτικά ιόντα όπως το Na^+ και το Cl^- τα οποία χαρακτηρίζονται ως επιβλαβή για την υδροπονία. Τα μελετούμενα ιχνοστοιχεία συμπεριφέρθηκαν με ανάλογο τρόπο όταν βρέθηκαν σε συγκέντρωση υψηλότερη της κανονικής. Οι υψηλές συγκεντρώσεις του Mn και του Zn επηρέασαν τις

συγκεντρώσεις των Ca, Mg, Fe, Cu στα φύλλα της αγγουριάς με μείωση της απορρόφησής τους, πιθανότατα λόγω ανταγωνισμού, χωρίς ωστόσο η μείωση να είναι τόσο σημαντική ώστε να προκαλέσει συμπτώματα τροφопενίας. Η ταυτόχρονη παροχή υψηλών συγκεντρώσεων μαγγανίου και ψευδαργύρου δεν είχε προσθετική δράση στην καθαρή φωτοσύνθεση και στην βιομάζα των καρπών της αγγουριάς

Για την εκτίμηση της επίδρασης που ασκεί η συγκέντρωση του Mn και του Zn στο ΘΔΑ στην απορρόφηση των στοιχείων αυτών από την αγγουριά εφαρμόστηκαν τέσσερα επίπεδα τροφοδοσίας Mn και Zn και δύο ανεξάρτητες μεταξύ τους μέθοδοι που έδωσαν παρόμοιες συγκεντρώσεις απορρόφησης για το Mn στο χαμηλό επίπεδο εφοδιασμού Mn και για τον Zn σε όλα τα επίπεδα τροφοδοσίας Zn. Διαφοροποίηση στις εκτιμώμενες τιμές υπήρχε στα τρία υψηλότερα επίπεδα παροχής Mn, όπου, όταν οι τιμές υπολογίστηκαν με βάση την απομάκρυνση των θρεπτικών στοιχείων από το ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα, η απορρόφηση ήταν σημαντικά υψηλότερη από αυτή που υπολογίστηκε με βάση τα δεδομένα για την συνολική περιεκτικότητα Mn στη φυτική βιομάζα. Η απόκλιση μεταξύ των δύο μεθόδων αποδόθηκε στην δράση οξειδωτικών βακτηρίων που ακινητοποιούν το διαλυμένο μαγγάνιο με αποτέλεσμα να μην είναι διαθέσιμο για τα φυτά. Η σχετικά χαμηλή επίδραση των υψηλών συγκεντρώσεων Mn στη παραγόμενη βιομάζα της αγγουριάς θα μπορούσε μερικώς να αποδοθεί στην παραπάνω δράση των βακτηρίων στο θρεπτικό διάλυμα.

Με βάση τις εκτιμώμενες συγκεντρώσεις απορρόφησης Mn, κατά τη διάρκεια των δύο πρώτων μηνών, όπου η απορρόφηση είναι αυξημένη, προτείνεται ένα επίπεδο Mn από 12 έως 14 μM , ακολουθούμενο στη συνέχεια από μια μείωση στα ή ελαφρώς κάτω από τα 10 μM , για το ΘΔ αναπλήρωσης σε κλειστού κύκλου υδροπονική καλλιέργεια αγγουριού υπό κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου. Οι αντίστοιχες συστάσεις για τον Zn είναι από 6 έως 7 μM κατά τη διάρκεια των τριών πρώτων εβδομάδων της καλλιέργειας, ακολουθούμενες μετέπειτα από μια μείωση σε 5 μM και ενδεχομένως σε 4 μM . Οι αυξημένες συγκεντρώσεις απορρόφησης σε Mn και Zn κατά τους πρώτους μήνες της καλλιέργειας σε σχέση με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στις συνθήκες της Ολλανδίας θα μπορούσαν να αποδοθούν στις διαφορετικές κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου (υψηλή ηλιοφάνεια και θερμοκρασία) οι οποίες επιβάλλουν γρήγορους ρυθμούς ανάπτυξης και επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις απορρόφησης.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του ΑΘΔ δεν παρέχει καμία πληροφορία σχετικά με τη συγκέντρωση των ιχνοστοιχείων στο περιβάλλον των ριζών, όπως συμβαίνει με τα μακροστοιχεία. Έτσι, για να προσδιοριστεί η συγκέντρωση των ιχνοστοιχείων, θα πρέπει, είτε να γίνει χημική ανάλυση του διαλύματος, είτε να γίνει εκτίμηση της συγκέντρωσης με τη χρήση μοντέλων συσσώρευσης ιχνοστοιχείων στο ΑΘΔ. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να μας δώσουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τη διαχείριση του ΑΘΔ σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα καθώς μπορούν να προβλέψουν την συγκέντρωση των ιχνοστοιχείων κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας. Στην παρούσα διατριβή έγινε προσπάθεια προσομοίωσης των συγκεντρώσεων του Mn και του Zn σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού η οποία είναι μια εύκολα μετρούμενη μεταβλητή. Από την επαλήθευση του προσομιώματος, με ανεξάρτητα δεδομένα, προέκυψε το συμπέρασμα ότι είναι κατάλληλο για την εκτίμηση της συγκέντρωσης του Mn και του Zn με αποδεκτή ακρίβεια μόνο στην περίπτωση υψηλών συγκεντρώσεων των στοιχείων αυτών στο εισερχόμενο διάλυμα που χρησιμοποιείται για την αναπλήρωση των απωλειών διαπνοής σε κλειστά υδροπονικά συστήματα. Για την χρησιμοποίησή του σε χαμηλές συγκεντρώσεις θα πρέπει να γίνει νέα βαθμονόμηση του μοντέλου η οποία θα πρέπει να βασίζεται σε πειραματικά δεδομένα που θα προκύψουν από τη χρήση μεγαλύτερου αριθμού εισερχόμενων συγκεντρώσεων στη χαμηλή κλίμακα.

Με βάση και τα παραπάνω, από την παρούσα διατριβή προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Τα συμπτώματα τοξικότητας μαγγανίου ή ψευδαργύρου στην αγγουριά εμφανίστηκαν όταν οι συγκεντρώσεις αυτών των στοιχείων στα νεαρά πλήρως ανεπτυγμένα φύλλα έφθασαν τα 900 ή 450 mg kg⁻¹ ξηρού βάρους, αντίστοιχα.
- Όταν τα συμπτώματα τοξικότητας έγιναν ορατά, η συγκέντρωση του μαγγανίου και του ψευδαργύρου στο ανακυκλούμενο ΘΔ ήταν περίπου 280 και 110 μmol l⁻¹, αντίστοιχα.
- Τα τοξικά επίπεδα του Mn ή/και του Zn μείωσαν την καθαρή φωτοσύνθεση και είχαν ως αποτέλεσμα μικρότερη παραγωγή βιομάζας, λόγω μειωμένου αριθμού καρπών ανά φυτό. Ωστόσο η μείωση δεν ήταν πάνω από 20% όταν οι συγκεντρώσεις Mn και Zn ανερχόταν σε 160 και 64 μmol l⁻¹ στο εισερχόμενο

διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε για την αναπλήρωση των απωλειών διαπνοής των φυτών, αντίστοιχα.

- Όταν τα παραπάνω στοιχεία εισέρχονταν στο υδροπονικό σύστημα σε συγκεντρώσεις υψηλότερες από τις κανονικές, οι συγκεντρώσεις τους στο ανακυκλούμενο ΘΔ αρχικά αυξάνονταν με γρήγορο ρυθμό με σταδιακή σταθεροποίηση αργότερα σε μέγιστα επίπεδα, ενώ οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις στα φύλλα είχαν μια τάση να αυξάνονται συνεχώς.
- Οι υψηλές συγκεντρώσεις Mn ή/ και Zn στο ριζικό περιβάλλον επηρέασαν την απορρόφηση του Ca και του Mg από την αγγουριά.
- Ο συνδυασμός υψηλού Mn και Zn, με τις συγκεντρώσεις που χρησιμοποιήθηκαν, δεν είχε προσθετική επίδραση στις παραμέτρους που ερευνήθηκαν.
- Οι συγκεντρώσεις απορρόφησης Mn και Zn από φυτά αγγουριάς καλλιεργούμενα σε ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα, υπολογιζόμενες με δύο διαφορετικές μεθόδους, έδωσαν παρόμοιες συγκεντρώσεις απορρόφησης για το Mn στο χαμηλό επίπεδο εφοδιασμού Mn και για τον Zn σε όλα τα επίπεδα τροφοδοσίας Zn.
- Στα υψηλά επίπεδα παροχής Mn, οι τιμές που υπολογίστηκαν με βάση την απομάκρυνση των θρεπτικών στοιχείων από το ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα ήταν σημαντικά υψηλότερες από αυτές που βρέθηκαν με τη μέτρηση της συνολικής περιεκτικότητας Mn στη φυτική βιομάζα. Αυτές οι διαφορές αποδόθηκαν σε μερική ακινητοποίηση του Mn λόγω βακτηριακής οξείδωσης στο θρεπτικό διάλυμα.
- Με βάση τις εκτιμώμενες συγκεντρώσεις απορρόφησης Mn, ένα επίπεδο Mn από 12 έως 14 μM κατά τη διάρκεια των πρώτων 2 μηνών της καλλιέργειας, που ακολουθείται στη συνέχεια από μια μείωση στα 10 μM ή ελαφρώς χαμηλότερα, προτείνεται για το ΘΔ αναπλήρωσης σε κλειστού κύκλου υδροπονική καλλιέργεια αγγουριού στις κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου.
- Οι αντίστοιχες συστάσεις για τον Zn είναι από 6 έως 7 μM κατά τη διάρκεια των τριών πρώτων εβδομάδων της καλλιέργειας, ακολουθούμενες μετέπειτα από μια μείωση σε 5 μM και πιθανώς σε 4 μM .

- Οι συγκεντρώσεις του μαγγανίου και του ψευδαργύρου στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα μπορούν να προβλεφτούν με αποδεκτή ακρίβεια για εμπορικές καλλιέργειες σε κλειστά υδροπονικά συστήματα, χρησιμοποιώντας μοντέλα που βασίζονται στην αθροιστική κατανάλωση νερού, μόνο στην περίπτωση υψηλών συγκεντρώσεων των στοιχείων αυτών στο θρεπτικό διάλυμα που χρησιμοποιείται για την αναπλήρωση της απορρόφησης των φυτών.
- Για το μαγγάνιο η σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης απορρόφησης από τα φυτά και της συγκέντρωσης του στο ανακυκλούμενο ΘΔ ήταν γραμμική ενώ για τον ψευδάργυρο η αντίστοιχη σχέση ήταν εκθετική.

ΜΕΡΟΣ ΣΤ. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Adams, P. 1985. Nutritional disorders of cucumbers. *Acta Hort.* 156, 251-256.
2. Adams, P. 2002. Nutritional control in hydroponics. In: Savvas, D., and H.C. Passam, (eds.). *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*. Embryo Publications, Athens, Greece, pp. 211-261.
3. Allan, D. L. and Jarrell, W. M. 1989. Proton and copper adsorption to maize and soybean root cell walls. *Plant Physiol* 89, 823-832.
4. An, Y. J., Kim, Y. M., Kwon, T. I., Jeong, S.-W. 2004. Combined effect of copper, cadmium, and lead upon *Cucumis sativus* growth and bioaccumulation. *Sci. Total Environ.* 326, 85-93.
5. Anastasiou, A., K.P. Ferentinos, K.G. Arvanitis, N. Sigrimis, D. Savvas, 2005. DSS Hortimed for on-line management of hydroponic systems. *Acta Horticulturae*, 691: 267-274.
6. Armstrong, F. A. J. 1963. Determination of Nitrate in Water Ultraviolet Spectrophotometry. *Analytical Chemistry* 35(9): 1292-1294.
7. Arnon, D.I. and P.R. Stout. 1939. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiol.* 14:371–375
8. Arora, M., Kiran, B., Rani, S., Rani, A., Kaur, B., Mittal, N. 2008. Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources. *Food Chem.* 111, 811–815.
9. Baas, R., H.M.C. Nijssen, T.J.M. van der Berg, and M.G. Warmenhoven. 1995. Yield and quality of carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) and gerbera (*Gerbera jamesonii* L.) in a closed nutrient system as affected by sodium chloride. *Sci. Hort.* 61:273-284.
10. Bailey, S, Thompson E, Nixon P.J, Horton P, Mullineaux C.W, Robinson C, Mann N.H. 2002. A critical role for the Var2 FtsH homologue of *Arabidopsis thaliana* in the photosystem II repair cycle in vivo. *J. Biol. Chem.*, 277:2006-2011.
11. Baker, A. J. M. 1981. Accumulators and excluders -strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*, Vol. 3, Issue 1-4, pp. 643-654
12. Barak, P., J.D. Smith, A.R. Krueger, and L.A. Peterson. 1996. Measurement of short term nutrient uptake rates in cranberry by aeroponics. *Plant Cell Environ.* 19:237– 242.
13. Barber, J. 2003. Photosystem II: the engine of life. *Q. Rev. Biophys.* 36:71-89.
14. Ben-Asher, J., Gordon, J.M., Liner, A., Zarmi, Y., 1982. Nutrient uptake and supply to tomato plants in a water culture system. *Agron. J.* 74, 640-644.
15. Berg, J.M, Shi Y. 1996. The galvanization of biology: a growing appreciation for the role of zinc. *Science* 271: 1081-1085.

16. Berry, W. L., Wallace, A. 1981. Toxicity: The concept and relationship to the dose response curve. *J. Plant Nutr.* 3, 13 - 19.
17. Boawn, L. C., Rasmussen, P. E. 1971. Crop response to excessive zinc fertilization of alkaline soil. *Agron. J.* 63, 874-876.
18. Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., Lux, A. 2007. Zinc in plants. *New Phytol.* 173, 677-702.
19. Bromfield, S.M. 1978. The effect of manganese oxidizing bacteria and pH on the availability of manganous ions and manganese oxides to oats in nutrient solutions. *Plant Soil* 49:23–29.
20. Brown, P. H., Welch, R. M. and Cary, E. E. 1987. Nickel: a micronutrient essential for higher plants. *Plant Physiol.* 85, 801-803.
21. Brownell, P.F. 1968. Sodium as an essential micronutrient element for some higher plants. *Plant Soil* 28:161–164.
22. Brun, R. and Morisot, A. 1996. Modelling the uptake of water and nitrate (NO₃) of rose plants in hydroponic culture. *Acta Hort.* 417, 55–63.
23. Bugbee, B. 2004. Nutrient management in recirculating hydroponic culture. *Acta Hort.* (ISHS) 648:99-112
24. Butcher, J.C. 1987. *The Numerical Analysis of Ordinary Differential Equations: Runge-Kutta and General Linear Methods*, , Wiley, London, UK
25. Cakmak, I., Marschner H. 1988. Enhanced superoxide radical production in roots of zinc deficient plants. *J. Exp. Bot.* 39: 1449-1460.
26. Cakmak, I. 2000. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. *New Phytol.* 146: 185-205.
27. Carmassi, G., Incrocci, L., Maggini, R., Malorgio, F., Tognoni, F., Pardossi, A., 2005. Modelling salinity buildup in recirculating nutrient solution culture. *J. Plant Nutr.* 28, 431–445.
28. Carroll, M. D., Loneragan, J. F. 1968. Response of plant species to concentrations of zinc in solution. I. Growth and zinc content of plants. *Aust. J. Agric. Res.* 19, 859-868.
29. Chaney, R. L. 1993. Zinc phytotoxicity, in Robson, A. D.: *Zinc in Soil and Plants*, Kluwer Academic Publ., Dordrecht, The Netherlands, p. 135–150.
30. Chinnery, L. E., Harding, C. P. 1980. The effect of ferrous iron on the uptake of manganese by *Juncus effusus* L. *Ann. Bot.* 46, 409-412.
31. Clarkson, D. T. 1977. Membrane structure and transport. In 'The Molecular Biology of Plant Cells' (H. Smith, ed.), pp. 24-63. Blackwell, Oxford
32. Commission Regulation (EEC) No 1677/88 of 15 June 1988 laying down quality standards for cucumbers *Official Journal L* 150, 16/06/1988 P. 0021 – 0025
33. Crawford, T. W., Kuehl, R.O., Stroehlein, J. L. 1990. Net fluxes of mineral nutrients, water, and carbohydrate influenced by manganese in root and shoot of *Cucumis sativus* L. *J. Plant Nutr.* 13, 759 - 786.

34. Crawford, N.M., Glass, A.D.M. 1998. Molecular and physiological aspects of nitrate uptake in plants. *Trends in Plant Science* 3, 389-395.
35. De Kreij, C., Voogt, W. and R. Baas. 1999. Nutrient solutions and water quality for soilless cultures. Brochure 196. Research Station for Floriculture and Glasshouse Vegetables (PBG), Naaldwijk, The Netherlands.
36. Denny, H.J., and D.A. Wilkins. 1987. Zinc tolerance in *Betula* ssp. I. Effect of external concentration of zinc on growth and uptake. *New Phytol.* 106:517-524.
37. Drew, M.C., Saker, L.R., 1984. Uptake and long-distance transport of phosphate, potassium and chloride in relation to internal ion concentrations in barley: evidence of non-allosteric regulation. *Planta* 160, 500-507.
38. Elamin, O. M., Wilcox, G. E. 1986. Effect of magnesium and manganese nutrition on muskmelon growth and manganese toxicity. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 111, 582-587.
39. El-Jaoual, T., and D.A. Cox. 1998. Manganese toxicity in plants. *J. Plant Nutr.* 21 (2):353- 386.
40. Epstein, E. 1965. Mineral nutrition, in Bonner, J., Vemer J. E.: *Plant Biochemistry*. Academic Press, NY, USA, pp. 438-466.
41. Eskew, D. L., Welch, R. M., and Cary, E. E. 1983. Nickel: An essential micronutrient for legumes and possibly all higher plants. *Science* 222, 621-623.
42. Farquhar, G. D., Sharkey, T. D. 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. *Ann. Rev. Plant Physiol.*33, 317-345.
43. Feng, J. P., Shi, Q. H., Wang, X. F. 2009. Effects of exogenous silicon on photosynthetic capacity and antioxidant enzyme activities in chloroplast of cucumber seedlings under excess manganese. *Agric. Sci. China* 8, 40-50.
44. Fodor, F. 2002. Physiological responses of vascular plants to heavy metals, in Prasad, M. N. V., Strzalka, K.: *Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants*. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, The Netherlands, pp.149-177.
45. Foy, C. D., Chaney, R. L., White, M. C. 1978. The physiology of metal toxicity in plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 29, 511-566.
46. Gieling, T.H., Cover, F.J.M., Janssen, H.J.J., van Straten, V., van Ooteghem, R.J.C., van Dijk, G.J. 2005. Hydrion-line, towards a closed system for water and nutrients: feedback control of water and nutrients in the drain. *Acta Hort.* 691: 259-266.
47. Gorbe, E., and A. Calatayud. 2010. Optimization of nutrition in soilless systems: A review. *Adv. Bot. Res.* 53:193-245.
48. Graves, C. J. 1983. The nutrient film technique. *Hort. Rev.* 5, 1-44.
49. Gray, James R. 2004. "Conductivity Analyzers and Their Application". In Down, R.D; Lehr, J.H. *Environmental Instrumentation and Analysis Handbook*. Wiley. pp. 491-510. ISBN 978-0-471-46354-2. Retrieved 2009-05-10.
50. Grewal, H. S., Maheshwari, B., Parks, S. E. 2011. Water and nutrient use efficiency of a low-cost hydroponic greenhouse for a cucumber crop: An Australian case study, *Agricultural Water Management*, 98 (5): 841-846.

51. Grotz, N. Fox, T., Connolly, E., Park, W., Guerinot M. and D. Eide 1998. Identification of a family of zinc transporter genes from *Arabidopsis* that respond to zinc deficiency. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 95 (12): 7220-7224.
52. Guidotti, D., Pardossi, A., Colla, V., Bellocchi, G., Buttazzo, G., Malorgio, F., Serra, G., Tognoni, F. 1998. Using artificial neural networks in horticulture. A control system for mineral supply in closed-loop hydroponics. In Computer Technology in Agricultural Management and Risk Prevention, Proceedings of 7th International Congress for Computer Technology in Agriculture (ICCTA), Firenze, Nov. 15–18, 1998; ICCTA: Firenze, Italy, 1998; 279–286.
53. Gupta, U. C., Gupta, S. C. 1998. Trace element toxicity relationships to crop production and livestock and human health: Implications for management. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 29: 1491-1522.
54. Gutiérrez, M., S. Alegret, R. Cáceres, J. Casadesús, O. Marfà, and M. del Valle. 2007. Application of a potentiometric electronic tongue to fertigation strategy in greenhouse cultivation. Comput. Electron. Agric. 57:12–22.
55. Hacisalihoglu, G., Hart, J.J., Kochian, L.V. 2001. High- and Low-Affinity Zinc Transport Systems and Their Possible Role in Zinc Efficiency in Bread Wheat. Plant Physiology 125, 456-463.
56. Hall, J.L. 2002. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance J. Exp. Bot. 53 (366): 1-11
57. Hannam, K. J, and Ohki, K. 1988. Detection of manganese deficiency and toxicity in plants, in Graham R. D., Hannam R. J., Uren N.C.: Manganese in Soils and Plants. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands. pp. 246-259.
58. Hart J. J., Norvell, W. A., Welch, R. M., Sullivan, L. A., and L. V. Kochian. 1998. Characterization of Zinc Uptake, Binding, and Translocation in Intact Seedlings of Bread and Durum Wheat Cultivars. Plant Physiol. 1998 September; 118(1): 219–226.
59. Haslett, B.S., Reid, R.J. and Rengel, Z. 2001. Zinc mobility in wheat: Uptake and distribution of zinc applied to leaves or roots. Ann. Bot. 87: 379-386.
60. Hauck, M., Paul, A., Mulack, C., Fritz, E., Runge, M. 2002. Effects of manganese on the viability of vegetative diaspores of the epiphytic lichen *Hypogymnia physodes*. Environ. Exp. Bot. 47: 127-142.
61. Hauck, M., Paul, A., Gross, S., Raubuch, M. 2003. Manganese toxicity in epiphytic lichens: chlorophyll degradation and interaction with iron and phosphorus. Environ. Exp. Bot. 49: 181-191.
62. He, Z. L. L., Yang, X. E., Stoffella, P. J. 2005. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. J. Trace Elem. Med. Biol. 19: 125-140.
63. Heckman, J.R., Johnston, S., Cowgill, W., 2003. Pumpkin yield and disease response to amending soil with silicon. HortSci. 38, 552-554.
64. Hewitt, E.J. and Watson, E.F. 1980. The production of micronutrient element deficiencies in plants grown in recirculated nutrient film (NFT) systems. ActaHort. (ISHS) 98:179-190

65. Hoagland, D. R. and D.I. Arnon, 1950. The water-culture method for growing plants without soil. Circ. Univ. of Calif. Agric. Exp. Station, Berkley. 347:1-32
66. Hoather, R. C., Rackham, R. F. 1959. Oxidised nitrogen in waters and sewage effluents observed by ultra-violet spectrophotometry. The Analyst 84: 548-551.
67. Horiguchi, T. 1987. Mechanism of manganese toxicity and tolerance of plants. II. Deposition of oxidized manganese in plant tissues. Soil Sci. Plant Nutr. 33: 595-606.
68. Horst, W., Fecht, M., Naumann, A., Wissemeier, A., Maier, P. 1999. Physiology of manganese toxicity and tolerance in *Vigna unguiculata* (L.)Walp. J. Plant Nutr. Soil Sci. 162:263-274.
69. Hu, H., Brown, P. 1997. Absorption of boron by plant roots. Plant and Soil 193: 49-58.
70. Humphries, J., Stangoulis, J., Graham, R. 2007. Manganese. In: A. Barker, D. Pilbeam (eds). Handbook of Plant Nutrition, Taylor and Francis, USA, pp. 351-366.
71. Jacobson, L. 1951. Maintenance of iron supply in nutrient solutions by a single addition of ferric potassium ethylenediamine tetra-acetate. Plant Physiology 26: 411-413.
72. Jelakovic, S., Kopriva, S., Suss, K.H., Schulz, G.E. 2003. Structure and catalytic mechanism of the cytosolic D-ribulose-5-phosphate 3-epimerase from rice. J. Mol. Biol. 326: 127-135.
73. Jones, B.R. 2005. Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower (2nd edn). Boca Raton: St.-Lucie Press.
74. Kabata - Pendias, A., Pendias, H. 2001. Trace elements in soils and plants. 3rd Edition, CRC Press.
75. Klaring, H.P.; Cierpinski, W. 1998. Control of nutrient solution concentration depending on greenhouse climate in a sweet pepper crop. Acta Hort. 458: 141–146
76. Klaring, H.P. 2001. Strategies to control water and nutrient supplies to greenhouse crops. A review. Agronomie 21:311–321.
77. Klieber, A., Lin, W. C., Jolliffe, P. A., Hall, J. W. 1993. Training systems affect canopy light exposure and shelf life of long English cucumber. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 118: 786-790.
78. Kopittke, P. M., Blamey, F. P. C., Asher, C. J. Menzies, N. W. 2010. Trace metal phytotoxicity in solution culture: A review. J. Exp. Bot. 61: 945-954.
79. Kramer, U., Clemens, S. 2006. Function and homeostasis of zinc, copper, and nickel in plants. Topics Curr. Genet. 14: 215-271.
80. Le Bot, J., Goss, M. J., Carvalho, M. J. G. P. R., Van Beusichem, M. L., Kirkby, E. A. 1990a: The significance of the magnesium to manganese ratio in plant tissues for growth and alleviation of manganese toxicity in tomato (*Lycopersicon esculentum*) and wheat (*Triticum aestivum*) plants. Plant Soil 124, 205-210.
81. Le Bot, J., Adamowicz, S., Robin, P. 1998. Modelling plant nutrition of horticultural crops: A review. Scientia Hort. 74: 47–82.

82. Lehr, J.J. 1953. Sodium as a plant nutrient. *J. Sci. Fd. Agric.* 4: 460–471.
83. Lidon, F. C., Teixeira, M. G. 2000. Oxy radicals production and control in the chloroplast of Mn-treated rice. *Plant Sci.* 152, 7-15.
84. Lieth, J.H. 1999. Crop management models for decision support and automated optimization. *Acta Hort.* 507: 271–277
85. Loneragan, J. F. 1988. Distribution and movement of manganese in plants. In: R.D. Graham, R.J. Hannam, N.C. Uren, eds. *Manganese in Soils and Plants*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988, pp. 113–121.
86. Long, X. X., Yang, X. E., Ni, W. Z., Ye, Z. Q., He, Z. L., Calvert, D. V., Stoffella, J. P. 2003. Assessing zinc thresholds for phytotoxicity and potential dietary toxicity in selected vegetable crops. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 34: 1421-1434.
87. Maas, E. V., Moore, D. P., Mason, B. J. 1969. Influence of calcium and magnesium on manganese absorption. *Plant Physiol.* 44: 796-800.
88. Maathuis, F.J.M., Sanders, D., 1996. Mechanisms of potassium absorption by higher plant roots. *Physiologia Plantarum* 96: 158-168.
89. Macfie, S. M., Taylor, G. J. 1992. The effects of excess manganese on photosynthetic rate and concentration of chlorophyll in *Triticum aestivum* grown in solution culture. *Physiol. Plantarum* 85: 467-475.
90. Magalhaes, J.R., Wilcox, G.E., 1983. Tomato growth and nutrient uptake patterns as influenced by nitrogen form and light intensity. *Journal of Plant Nutrition* 6: 941-956.
91. Maggini, R., Carmassi, G., Incrocci, L., Pardossi, A. 2010. Evaluation of quick test kits for the determination of nitrate, ammonium and phosphate in soil and in hydroponic nutrient. *Agrochimica*, 44 : 331–341
92. Mankin, K.R., Fynn, R.P. 1996. Modeling individual nutrient uptake by plants: Relating demand to microclimate. *Agricultural Systems* 50: 101-114.
93. Marcelis, L. F. M. 1993. Fruit growth and biomass allocation to the fruits in cucumber. 2. Effect of irradiance. *Sci. Hort.* 54: 123-130
94. Marschner, H. 1991. Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. In: R. Wright, V. Baligar, R. Murrmann (Eds). *Development in Plant and Soil Sciences. Plant-soil interactions at low pH*. Kluwer Academic Publisher, West Virginia, pp. 1-20.
95. Marschner, H. 1995. Functions of mineral nutrients: micronutrients, in *Mineral Nutrition of Higher Plants* (2nd ed.), Academic Press Limited, San Diego, CA, pp. 313–396.
96. Massa, D., Incrocci, L., Maggini, R., Bibbiani, C., Carmassi, G., Malorgio, F. and A. Pardossi, 2011. Simulation of crop water and mineral relations in greenhouse soilless culture. *Environ. Model. & Softw.* 26: 711-722.
97. Mathieu, J., Kurata, K., Goto, E., Albright, L. 1999. A discussion of nutrient uptake equations in hydroponic culture and their use in computer simulation. *Acta Hort.* 1999, 507: 205–213.

98. Mengel, K., Kirkby, E.A. 2001. Principles of plant nutrition. 5th edn. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. pp. 849
99. Mishra, S., Dubey, R. S. 2005. Heavy metal toxicity induced alterations in photosynthetic metabolism in plants, in M. Pessarakli (ed): Handbook of Photosynthesis 2nd Edition, CRC Press, Taylor and Francis Group, NY, USA, pp. 845-863.
100. Monnet, F., Vaillant, N., Vernay, P., Coudret, A., Sallanon, H., Hitmi, A. 2001. Relationship between PSII activity, CO₂ fixation, and Zn, Mn and Mg contents of *Lolium perenne* under zinc stress. J. Plant Physiol. 158, 1137-1144.
101. Moreau, S. *et al.*, 2002. GmZIP1 encodes a symbiosis-specific zinc transporter in soybean. J. Biol. Chem. 277: 4738-4746.
102. Mukhopadhyay M., Sharma, A. 1991. Manganese in cell metabolism of higher plants Bot. Rev. 57: 117-149.
103. Nable, R. O., Houtz, R. L., Cheniae, G. M. 1988. Early inhibition of photosynthesis during development of Mn toxicity in tobacco. Plant Physiol. 86, 1136-1142.
104. Nicholas, D.J.D. 1961. Minor mineral nutrients. Ann. Rev. Plant Physiol. 11:314–324.
105. Olympios, C.M., 1999. Overview of soilless culture: Advantages, constraints and perspectives for its use in the Mediterranean countries. Cahiers Options Méditerranéennes Vol. 31
106. Osawa, T., Ikeda, H. 1974. Heavy metal toxicity in vegetable crops. III. Effect of manganese concentration in nutrient solution on growth of vegetable crops (Japanese). J. Japan. Soc. Hort. Sci. 43: 260-266.
107. Papadopoulos, A. P. 1994. Growing greenhouse seedless cucumbers in soil and in soilless media. Agriculture and Agri-Food Canada Publication, 1902/E. 126p.
108. Pardossi, A., Falossi, F., Malorgio, Incrocci, L., Bellocchi, G. 2004. Empirical models of macronutrient uptake in melon plants grown in recirculating nutrient solution culture. Taylor & Francis, Philadelphia, NJ, ETATS-UNIS.
109. Pardossi, A., Malorgio, F., Incrocci, L., Carmassi, G., Maggini, R., Massa, D. and F. Tognoni. 2006. Simplified models for the water relations of soilless cultures: what they do or suggest for sustainable water use in intensive horticulture. Acta Hort. 718:425-434.
110. Pearson, J.N., Rengel, Z., Jenner, C.F. and Graham, R.D. 1995. Transport of zinc and manganese to developing wheat grains. Physiol. Plant. 95: 449-455.
111. Procopiou, J., Wallace, A. 1981. A case of cucumber wilting involving excess trace element stress in the Ierapetra area of Greece. J. Plant Nutr. 3, 509 - 511.
112. Raviv, M., Krasnovsky, A., Medina, S., Reuveni, R., 1998. Assessment of various control strategies for recirculation of greenhouse effluents under semi-arid conditions. Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 73 (4): 485–491
113. Raviv, M. and H.J. Lieth, (Ed), 2007. Soilless Culture: Theory and Practice. Elsevier Science.

114. Reichman, S. M. 2002. The responses of plants to metal toxicity. A review focusing on copper, manganese and zinc. Australian Minerals and Energy Environment Foundation, Occasional Paper No.14, ISBN 1-876205-13-X, Melbourne, Australia, 54 p.
115. Reid, R., Brookes, J., Tester, M., Smith, F.A. 1996. The mechanism of zinc uptake in plants. *Planta* 198, 39-45.
116. Rengel, Z., Batten, G. D., Crowley, D. E. 1999. Agronomic approaches for improving the micronutrient density in edible portions of field crops. *Field Crops Res.* 60: 27–40.
117. Rengel, Z. 2000. Uptake and transport of manganese in plants. In: A. Sigel, H. Sigel (eds.). *Metal Ions in Biological Systems*. New York, Marcel Dekker, pp. 57-87
118. Rengel, Z. 2001. Genotypic differences in micronutrient use efficiency in crops. *Comm. Soil Sci. Pl. An.* 32:1163-1186.
119. Richter, S., Lamppa, G. K. 2003. Structural properties of the chloroplast stromal processing peptidase required for its function in transit peptide removal. *J. Biol. Chem.* 278:39497-39502.
120. Rogalla, H., Romheld, V., 2002. Role of leaf apoplast in silicon mediated manganese tolerance of *Cucumis sativus* L. *Plant Cell Environ.* 25: 549-555.
121. Rosen, J. A., Pike, C. S., Golden, M. L. 1977. Zinc, Iron, and Chlorophyll Metabolism in Zinc-toxic Corn. *Plant Physiol.* 59: 1085-1087.
122. Roupael, Y., Cardarelli, M., Rea, E. and G. Colla. 2008. Grafting of cucumber as a means to minimize copper toxicity. *Environ. Exp. Bot.* 63:49-58.
123. Ruano, A., Barceló, J., Poschenrieder, C. 1987. Zinc toxicity-induced variation of mineral element composition in hydroponically grown bush bean plants. *J. Plant Nutr.* 10: 373 - 384.
124. Rufty, T. W., Miner, G. S., Raper, C. D. 1979. Temperature effects on growth and manganese tolerance in tobacco. *Agron. J.* 71: 638-644.
125. Savvas, D., Papastavrou, D., Ntatsi, G., Ropokis, A., Olympios, C., Hartmann, H., Schwarz, D. 2009. Interactive effects of grafting and manganese supply on growth, yield, and nutrient uptake by tomato. *HortScience* 44: 1978-1982.
126. Savvas, D. und F. Lenz, 1995. Nährstoffaufnahme von Aubergine (*Solanum melongena* L.) in Hydrokultur. *Gartenbauwissenschaft (European Journal of Horticultural Science)* 60: 29-33.
127. Savvas, D. and Adamidis, K. 1999. Automated management of nutrient solutions based on target electrical conductivity, pH, and nutrient concentrations ratios. *J. Plant Nutr.* 22: 1415–1432.
128. Savvas, D., 2002. Nutrient solution recycling. In: Savvas, D., Passam, H.C. (Eds.), *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*. Embryo Publications, Athens, Greece, pp. 299–343.
129. Savvas, D., 2002a. Automated Replenishment of Recycled Greenhouse Effluents with Individual Nutrients in Hydroponics by Means of Two Alternative Models. *Biosystems Engineering* 83, 225-236.

130. Savvas, D. and G. Gizas, 2002. Response of hydroponically grown gerbera to nutrient solution recycling and different nutrient cation ratios. *Scientia Horticulturae*, 96: 267-280.
131. Savvas, D., Meletiou, G., Margariti, S., Tsirogiannis, L., Kotsiras, A., 2005. Modeling the relationship between water uptake by cucumber and NaCl accumulation in a closed hydroponic system. *Hortscience* 40, 802-807.
132. Savvas, D., Pappa, V. A., Kotsiras, A., Gizas, G. 2005a. NaCl accumulation in a cucumber crop grown in a completely closed hydroponic system as influenced by NaCl concentration in irrigation water. *Europ. J. Hort. Sci.* 70: 217-223.
133. Savvas, D. Pappas, V.A., Gizas, G., Maglaras, L., 2006. Influence of NaCl concentration in the irrigation water on salt accumulation in the root zone and yield in a cucumber crop grown in a closed hydroponic system. *Acta Hort.* 697, 93-99.
134. Savvas, D., Mantzos, N. Barouchas, P., Tsirogiannis, I., Olympios, C., Passam, H.C., 2007. Modelling salt accumulation by a bean crop grown in a closed hydroponic system in relation to water uptake. *Sci. Hort.* 111, 311-318.
135. Savvas, D., Chatzieustratiou, E., Pervolaraki, G., Gizas, G., Sigrimis, N., 2008. Modelling Na and Cl concentrations in the recycling nutrient solution of a closed-cycle pepper cultivation. *Biosystems Engineering* 99, 282-291.
136. Schachtman, D.P., Reid, R.J., Ayling, S.M. 1998. Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. *Plant Physiology* 116: 447-453.
137. Schiff, J.A. 1983. Reduction and Other Metabolic Reactions of Sulfate. In: Läuchli, A., Bielecki, R. (Eds.), *Inorganic Plant Nutrition*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 401-421.
138. Schmidke, I., Stephan, U.W. 1995. Transfer of metal micronutrients in phloem of castor beans (*Ricinus communis*) seedlings. *Physiol. Plant.* 95:147-153.
139. Sheikh, B.A. 2006. Hydroponics: key to sustain agriculture in water stressed and urban environment. *Pak. J. Agric., Agril. Eng., Vet. Sci.*, 22: 53–57
140. Shi, Q., Bao, Z., Zhu, Z., He, Y., Qian, Q., Yu, J. 2005. Silicon-mediated alleviation of Mn toxicity in *Cucumis sativus* in relation to activities of superoxide dismutase and ascorbate peroxidase. *Phytochem.* 66, 1551-1559.
141. Shi, Q., Zhu, Z., Xu, M., Qian, Q. and J. Yu. 2006. Effect of excess manganese on the antioxidant system in *Cucumis sativus* L. under two light intensities. *Environ. Exp. Bot.* 58:197-205.
142. Shi, Q., and Z. Zhu. 2008. Effects of exogenous salicylic acid on manganese toxicity, element contents and antioxidative system in cucumber. *Environ. Exp. Bot.* 63: 317-326.
143. Shi, G., Cai, Q. 2009. Photosynthetic and anatomic responses of peanut leaves to zinc stress. *Biologia Plantarum* 53: 391-394.
144. Silber, A., Bar-Yosef, B., Levkovitch, I., Kautzky, L., Minz, D. 2008. Kinetics and mechanisms of pH-dependent Mn(II) reactions in plant-growth medium. *Soil Biol. Biochem.* 40: 2787-2795.

145. Silberbush, M., Ben-Asher, J., 2001. Simulation study of nutrient uptake by plants from soilless culture as affected by salinity buildup and transpiration. *Plant Soil* 233, 59-69.
146. Silberbush, M., Ben-Asher, J., Ephrath, J.E., 2005. A model for nutrient and water flow and their uptake by plants grown in a soilless culture. *Plant and Soil* 271 (1): 309-319.
147. Singh, B., Steenberg, K., 1974. Plant response to micronutrients. *Plant and Soil* 40, 655-667.
148. Sonneveld, C., and S. J. Voogt. 1980. The application of manganese in nutrient solutions for tomatoes grown in a recirculating system. *Acta Hort.* 98: 171–178.
149. Sonneveld, C., and S. S. de Bes. 1984. Micro nutrient uptake of glasshouse cucumbers grown on rockwool. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 15: 519 - 535.
150. Sonneveld, C., Baas, R., Nijssen, H.M.C. and De Hoog, J. 1999. Salt tolerance of flower crops grown in soilless culture. *J. Plant Nutr.*, 22: 1033–1048.
151. Sonneveld, C., 2000. Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture. Thesis, Wageningen University, The Netherlands, 151 pp.
152. Sonneveld, C. 2002. Composition of nutrient solutions. In: Savvas, D., and H.C. Passam (eds). *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*. Embryo Publ., Athens, Greece, pp. 179-212.
153. Sonneveld, C., and W. Voogt. 2009. *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*. Springer, Dordrecht Heidelberg, London, New York. 431 p.
154. Steiner, A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil*, 15: 134–154.
155. Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. *Proc 6th Int. Congr. Soilless Culture*. Luntern, Wageningen: ISOSC, pp. 633–649.
156. Stępień, P. and Kłbus, G. 2006. Water relations and photosynthesis in *Cucumis sativus* L. leaves under salt stress. *Biologia Plantarum* 50(4): 610-616.
157. Taiz, L. and E. Zeiger, 2002. *Plant Physiology*, Sinauer Associates, 3rd edition pp. 690 ISBN: 0878938230 (Aug 30, 2002)
158. Tzerakis, C., Savvas, D., Sigrimis, N. 2012. Responses of cucumber grown in recirculating nutrient solution to gradual Mn and Zn accumulation in the root zone owing to excessive supply via the irrigation water. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 175: 125–134.
159. Van Assche, F., Clijsters, H. 1986. Inhibition of photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* by treatment with toxic concentrations of zinc: effects on electron transport and photophosphorylation. *Physiol. Plantarum* 66: 717-721.
160. Van Oijen, M. 2002. On the use of specific publication criteria for papers on process-based modelling in plant science. *Field Crops Research*, 74: 197-205.
161. Van Os, E., T.H. Gieling, and H.J. Lieth. 2008. Technical equipment in soilless production systems. In: Raviv, M., and H.J. Lieth (eds.). *Soilless Culture: Theory and Practice*. Elsevier, Amsterdam, pp. 157-207.

162. 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 Mgt.* 97: 1242-1250.
163. Venkatesan, S., Hemalatha, K. V., Jayaganesh, S. 2006. Zinc toxicity and its influence on nutrient uptake in Tea. *Am. J. Plant Physiol.* 1: 185-192.
164. Vernay, P., Gauthier-Moussard, C., Hitmi, A. 2007. Interaction of bioaccumulation of heavy metal chromium with water relation, mineral nutrition and photosynthesis in developed leaves of *Lolium perenne* L. *Chemosphere* 68, 1563-1575.
165. Von Caemmerer, S., Farquhar, G.D., 1981. Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. *Planta* 153, 376-387.
166. Wallace, A. 1982. Additive, protective and synergistic effects on plants with excess trace elements. *Soil Sci.* 133: 319-323.
167. Wallace, A., Abou-Zamzam, A. M. 1989. Cobalt-zinc interactions in bush beans grown in solution culture. *Soil Sci.* 147: 436-438.
168. Wang, W., 1987. Root elongation method for toxicity testing of organic and inorganic pollutants. *Environ. Toxic.Chem.* 6:409-414.
169. Wang, J., Nielsen, M. T., Evangelou, B. P. 1994. A solution culture study of manganese-tolerant and -sensitive tobacco genotypes. *J. Plant Nutr.* 17: 1079 - 1093.
170. White, M.C., Decker A.M., Chaney, R.L. 1981. Metal complexation in xylem fluid I. Chemical composition of tomato and soybean root exudate. *Plant Physiol.* 67: 301-310.
171. Yan, F., Y. Zhu, C. Möller, Ch. Zörb, and S. Schubert, 2002: Adaptation of H⁺-pumping and plasma membrane H⁺ ATPase activity in proteoid roots of white lupin under phosphate deficiency. *Plant Physiology* 129: 50-63
172. Yang, Hong-Qiang, Jie, Yu-Ling, 2005. Uptake and Transport of Calcium in Plants. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 31 (3): 227-234
173. Zekki, H., Gauthier, L., Gosselin, A. 1996. Growth, productivity, and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 121(6): 1082–1088
174. Zerche, S. 2001. Nitrogen demand of cut chrysanthemum in relation to shoot height and solar radiation. *Acta Hort.* 511: 99–106.
175. Μαυρογιαννόπουλος, Γ. Ν. 1994. Υδροπονικές καλλιέργειες και θρεπτικά διαλύματα. Εκδόσεις Α. Σταμούλης, σελ. 132
176. Μαυρογιαννόπουλος, Γ. Ν. 2007. Υδροπονικές Εγκαταστάσεις. Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε., σελ. 278
177. Σάββας, Δ. 2012. Καλλιέργειες εκτός εδάφους: υδροπονία, υποστρώματα. Εκδόσεις ΑγροΤύπος, σελ. 528.
178. Τσικαλάς, Π. 1997. Σημειώσεις Εργαστηρίων Φυλλοδιαγνωστικής. Τ.Ε.Ι. Ηρακλείου, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας, Ηράκλειο.