

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

**Δαμιανός Σ. Νεοκλέους  
Γεωπόνος**

**«ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ  
ΚΟΛΟΚΥΝΘΟΕΙΔΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΟΥΜΕΝΑ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΑ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΑ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ»**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΑΘΗΝΑ 2017**

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

**Δαμιανός Σ. Νεοκλέους  
Γεωπόνος**

**«ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ  
ΚΟΛΟΚΥΝΘΟΕΙΔΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΟΥΜΕΝΑ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΑ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΑ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ»**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΑΘΗΝΑ 2017**

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

## ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

### «ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ ΚΟΛΟΚΥΝΘΟΕΙΔΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΟΥΜΕΝΑ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΑ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ»

Δαμιανός Σ. Νεοκλέους

Υποβλήθηκε στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών,  
Τμήμα Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής  
Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 2 Ιουνίου, 2017

#### **Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:**

Καθηγητής Γ.Π.Α: Δημήτριος Σάββας, Επιβλέπων

Ομότιμος Καθηγητής Γ.Π.Α: Κωνσταντίνος Ακουμιανάκης

Επίκουρος Καθηγητής Γ.Π.Α: Ιωάννης Καραπάνος

#### **Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:**

Καθηγητής Γ.Π.Α: Δημήτριος Σάββας

Ομότιμος Καθηγητής Γ.Π.Α: Κωνσταντίνος Ακουμιανάκης

Επίκουρος Καθηγητής Γ.Π.Α: Ιωάννης Καραπάνος

Καθηγητής Γ.Π.Α: Δημήτριος Μπουράνης

Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ: Αθανάσιος Κουκουνάρας

Καθηγητής Γ.Π.Α: Δημήτριος Μπιλάλης

Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας: Νικόλαος Κατσούλας

© Δαμιανός Σ. Νεοκλέους

© Γ.Π.Α

«ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ ΚΟΛΟΚΥΝΘΟΕΙΔΗ  
ΚΑΛΛΙΕΡΓΟΥΜΕΝΑ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΑ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ  
ΥΨΗΛΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ»

**ISBN:**

«Η έγκριση της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής από το Τμήμα Επιστήμης Φυτικής  
Παραγωγής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων  
του συγγραφέως (Ν. 5343 / 1932 άρθρο 202, παρ. 2)»

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μελέτη εκπονήθηκε κατά τα έτη 2012-2017 στο Εργαστήριο Κηπευτικών Καλλιεργειών του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών και στο Ινστιτούτο Γεωργικών Ερευνών της Κύπρου.

Θερμές ευχαριστίες θέλω να εκφράσω στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δ. Σάββα για την καθοδήγηση, την εμπιστοσύνη, τις οδηγίες, τις συμβουλές και την πολύτιμη βοήθεια του σε όλα τα στάδια εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής μου. Επίσης τον καθηγητή κ. Κ. Ακουμιανάκη και τον επίκουρο καθηγητή κ. Ι. Καραπάνο για τη συμμετοχή τους στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή και την υποστήριξη τους.

Επίσης ευχαριστώ πολύ τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής για τη συμμετοχή τους στην επιτροπή, την κριτική ανάγνωση του κειμένου και τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Θερμές ευχαριστίες επίσης εκφράζω στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών για τη δυνατότητα περαιτέρω μόρφωσης μου σε ανώτατο επίπεδο, και στο Ινστιτούτο Γεωργικών Ερευνών για τη χωρίς περιορισμούς διάθεση της εργαστηριακής υποδομής για τους σκοπούς της διατριβής.

Τέλος το παρόν σύγγραμμα θέλω να το αφιερώσω στην οικογένεια μου.

## Περιεχόμενα

Γενική Περίληψη .....	5
Summary .....	13
1. Γενική Εισαγωγή – Στόχος της διδακτορικής διατριβής .....	18
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....	23
2.1. Αναγκαία στοιχεία για τη θρέψη των φυτών .....	23
2.1.1. Άζωτο.....	25
2.1.2. Φώσφορος.....	26
2.1.3. Κάλιο .....	27
2.1.4. Ασβέστιο .....	28
2.1.5. Μαγνήσιο .....	29
2.1.6. Θειϊκά.....	30
2.1.7. Ιχνοστοιχεία .....	31
2.2. Απορρόφηση και μεταφορά νερού και θρεπτικών ιόντων στο φυτό.....	33
2.3. Αφομοίωση θρεπτικών ιόντων από το φυτό .....	39
2.4. Σχέσεις μεταξύ των θρεπτικών στοιχείων .....	41
2.5. Αλληλεπιδράσεις αλατότητας - θρεπτικών στοιχείων.....	42
2.6. Συνολική συγκέντρωση ιόντων (ηλεκτρική αγωγιμότητα, EC) και οξύτητα θρεπτικού διαλύματος (pH) .....	44
2.7. Αναλογίες απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων προς νερό - «Συγκεντρώσεις απορρόφησης» .....	46
2.8. Κλειστά συστήματα καλλιέργειας - Ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος.....	48
2.9. Μοντέλα προσομοίωσης και απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων .....	53
2.10. Εκτίμηση απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων .....	54
2.11. Συσσώρευση αλάτων στα κλειστά υδροπονικά συστήματα .....	57
2.12. Κολοκυνθοειδή (Πεπόνι, Κολοκύθι) .....	63
3. Γενική Μεθοδολογία.....	70
3.1. Θερμοκήπιο.....	70
3.2. Τεχνική ανακύκλωσης θρεπτικού διαλύματος.....	71
3.3. Σύστημα καλλιέργειας σε ρηχό ρεύμα θρεπτικού διαλύματος (NFT).....	72
3.4. Φυτικό Υλικό - Συνθήκες ανάπτυξης .....	74
3.5. Προσδιορισμός απορρόφησης θρεπτικών και μη-θρεπτικών στοιχείων με αναλύσεις θρεπτικών διαλυμάτων ή φυτικών ιστών .....	75
3.6. Μεθοδολογίες εργαστηριακών μετρήσεων.....	78
4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ I. «Επίδραση της αναλογίας των μακροκατιόντων (K:Ca:Mg) στην απορρόφηση θρεπτικών μακροστοιχείων και νερού από την πεπονια ( <i>Cucumis melo</i> ) σε υδροπονικό σύστημα με συνεχή ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος» .....	83
4.1. Εισαγωγή.....	83

4.2.	Υλικά και Μέθοδοι .....	86
4.2.1.	Πειραματική εγκατάσταση και φυτικό υλικό .....	86
4.2.2.	Χειρισμός δεδομένων .....	90
4.2.3.	Μετρήσεις και αναλύσεις .....	91
4.2.4.	Στατιστική επεξεργασία .....	92
4.3.	Αποτελέσματα.....	93
4.4.	Συζήτηση.....	106
4.5.	Συμπεράσματα .....	113
5.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ II. «Συσώρευση NaCl και απορρόφηση θρεπτικών μακροστοιχείων σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια πεπονιάς σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού» .....	115
5.1.	Εισαγωγή.....	115
5.2.	Υλικά και Μέθοδοι .....	117
5.2.1.	Πειραματική εγκατάσταση και φυτικό υλικό .....	117
5.2.2.	Χειρισμός δεδομένων και χημικές αναλύσεις .....	119
5.2.3.	Περιγραφή μαθηματικού προσομοιώματος.....	121
5.2.4.	Στατιστική επεξεργασία.....	123
5.3.	Αποτελέσματα.....	123
5.3.1.	Κατανάλωση νερού και συγκέντρωση αλάτων στο ριζόστρωμα .....	123
5.3.2.	Συγκεντρώσεις απορρόφησης του Na <sup>+</sup> και του Cl <sup>-</sup> .....	126
5.3.3.	Ανάπτυξη και βαθμονόμηση του μοντέλου.....	128
5.3.4.	Έλεγχος αξιοπιστίας του μοντέλου.....	129
5.3.5.	Συγκεντρώσεις απορρόφησης των μακροστοιχείων N, P, K, Ca και Mg.....	133
5.4.	Συζήτηση.....	137
5.5.	Συμπεράσματα .....	145
6.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ III. «Επίδραση της βαθμιαίας αύξησης της αλατότητας του θρεπτικού διαλύματος στη βλαστική αύξηση και παραγωγή, καθώς και σε παραμέτρους φυσιολογίας και θρέψης φυτών πεπονιάς ( <i>Cucumis melo</i> L.) καλλιεργούμενων σε κλειστό υδροπονικό σύστημα».....	147
6.1.	Εισαγωγή.....	147
6.2.	Υλικά και Μέθοδοι .....	151
6.2.1.	Συνθήκες ανάπτυξης της καλλιέργειας.....	151
6.2.2.	Μετρήσεις και χημικές αναλύσεις .....	151
6.2.3.	Στατιστική επεξεργασία.....	153
6.3.	Αποτελέσματα.....	154
6.3.1.	Συγκέντρωση αλάτων στο ριζόστρωμα .....	154
6.3.2.	Φυτομάζα, καρπική απόδοση και ποιότητα.....	155
6.3.3.	Ανταλλαγή αερίων κατά τη φωτοσύνθεση και υδατικές σχέσεις.....	156

6.3.4.	Απορρόφηση θρεπτικών και μη-θρεπτικών στοιχείων και συγκεντρώσεις στους φυτικούς ιστούς.....	158
6.4.	Συζήτηση.....	162
6.5.	Συμπεράσματα .....	170
7.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV. «Προσομοίωση της συσσώρευσης NaCl σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς, και η επίδραση της στην απορρόφηση μακροθρεπτικών, την αύξηση, την παραγωγή και την ανταλλαγή αερίων κατά τη φωτοσύνθεση».....	172
7.1.	Εισαγωγή.....	172
7.2.	Υλικά και Μέθοδοι .....	174
7.2.1.	Συνθήκες ανάπτυξης της καλλιέργειας.....	174
7.2.2.	Μετρήσεις .....	176
7.2.3.	Χειρισμός δεδομένων και χημικές αναλύσεις .....	178
7.2.4.	Περιγραφή του μοντέλου αλατότητας .....	178
7.2.5.	Στατιστική επεξεργασία.....	179
7.3.	Αποτελέσματα.....	179
7.3.1.	Κατανάλωση νερού και συγκέντρωση αλάτων στο ριζόστρωμα .....	179
7.3.2.	Βαθμονόμηση και έλεγχος αξιοπιστίας του μοντέλου .....	182
7.3.3.	Συγκεντρώσεις απορρόφησης των μακροστοιχείων N, P, K, Ca και Mg.....	187
7.3.4.	Περιεκτικότητα φυτικών ιστών σε θρεπτικά και μη-θρεπτικά στοιχεία .....	189
7.3.5.	Αύξηση, απόδοση, ποιότητα και ανταλλαγή αερίων κατά τη φωτοσύνθεση ....	191
7.4.	Συζήτηση.....	193
7.5.	Συμπεράσματα .....	198
8.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ V. «Συσχέτιση συσσώρευσης Ca με την αθροιστική κατανάλωση νερού σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς, και οι επιδράσεις της στην απορρόφηση μακροθρεπτικών, την αύξηση, την παραγωγή, την ποιότητα και τη φωτοσύνθεση» ....	200
8.1.	Εισαγωγή.....	200
8.2.	Υλικά και Μέθοδοι .....	202
8.2.1.	Συνθήκες ανάπτυξης της καλλιέργειας.....	202
8.2.2.	Περιγραφή του μοντέλου .....	204
8.2.3.	Δεδομένα και αναλύσεις .....	204
8.2.4.	Μετρήσεις .....	205
8.2.5.	Στατιστική επεξεργασία .....	206
8.3.	Αποτελέσματα.....	207
8.3.1.	Κατανάλωση νερού, συγκέντρωση $Ca^{2+}$ και ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC).....	207
8.3.2.	Βαθμονόμηση και έλεγχος αξιοπιστίας του μοντέλου .....	209
8.3.3.	Συγκεντρώσεις απορρόφησης των μακροστοιχείων N, P, K, Ca και Mg.....	213
8.3.4.	Συγκεντρώσεις μακροθρεπτικών στους φυτικούς ιστούς.....	216
8.3.5.	Αύξηση, απόδοση, ποιότητα και ανταλλαγή αερίων κατά τη φωτοσύνθεση ....	218



8.4. Συζήτηση.....	221
8.5. Συμπεράσματα .....	228
Γενική Συζήτηση – Συμπεράσματα .....	230
Βιβλιογραφία .....	242

## Γενική Περίληψη

Η διατριβή αυτή πραγματεύεται θέματα θρέψης των φυτών και συσσώρευσης αλάτων σε καλλιέργειες δύο κολυκυνθοειδών, του πεπονιού (*Cucumis melo* L.) και του κολοκυθιού (*Cucurbita pepo* L.), σε κλειστά υδροπονικά συστήματα. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής διεξήχθησαν πέντε ερευνητικές πειραματικές εργασίες οι οποίες παρουσιάζονται ως ξεχωριστά Κεφάλαια.

Η πρώτη ερευνητική εργασία είχε σκοπό να μελετήσει την επίδραση της αναλογίας των μακροκατιόντων (K:Ca:Mg) στην απορρόφηση θρεπτικών μακροστοιχείων και νερού από την πεπονιά (*Cucumis melo*) σε υδροπονικό σύστημα με συνεχή ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος. Η αναπλήρωση των προσλαμβανόμενων θρεπτικών στοιχείων και νερού από τα φυτά στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα γινόταν με τρία διαφορετικά θρεπτικά διαλύματα συμπλήρωσης. Το θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης (ΘΔΣ), το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας είχε ηλεκτρική αγωγιμότητα (electrical conductivity, EC)  $1,74 \text{ dS m}^{-1}$  και περιείχε  $6,5 \text{ mM K}^+$ ,  $2,8 \text{ mM Ca}^{2+}$ , και  $1,0 \text{ mM Mg}^{2+}$  ( $\text{K}^+:\text{Ca}^{2+}:\text{Mg}^{2+} = 0,63:0,27:0,10$ ). Τα άλλα δύο ΘΔΣ είχαν υψηλή συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  ( $4,2 \text{ mM}$ ) και είτε οι συγκεντρώσεις  $\text{K}^+$  και  $\text{Mg}^{2+}$  δεν διαφοροποιήθηκαν (σχετική μοριακή αναλογία  $\text{K}^+:\text{Ca}^{2+}:\text{Mg}^{2+} = 0,55:0,36:0,09$ ,  $\text{EC} = 2,0 \text{ dS m}^{-1}$ ), είτε αυξήθηκαν για να διατηρηθεί η ίδια αναλογία  $\text{K}^+:\text{Ca}^{2+}:\text{Mg}^{2+}$  όπως και στο μάρτυρα ( $\text{EC} = 2,45 \text{ dS m}^{-1}$ ). Η εκτίμηση των αναλογιών απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων προς νερό, γνωστές στη διεθνή βιβλιογραφία ως συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ, Uptake Concentrations–UCs) έγινε με δύο διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού. Η πρώτη μέθοδος βασιζόταν στην απομάκρυνση των θρεπτικών στοιχείων και του νερού από το ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα και η δεύτερη βασιζόταν στις ποσότητες των θρεπτικών στοιχείων που ανακτήθηκαν από το σύνολο της ξηρής βιομάζας των φυτών σε συνδυασμό με την καταγραφή της αντίστοιχης κατανάλωσης νερού. Οι δύο μέθοδοι υπολογισμού έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα. Οι μέσες

συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) για N, P, K, Ca και Mg ήταν 15,4, 1,31, 5,47, 3,78, και 1,02 mmol L<sup>-1</sup>, αντίστοιχα, η ενώ η γραμμομοριακή αναλογία K:Ca:Mg στο σύνολο της φυτικής βιομάζας ανήλθε σε 0,55:0,34:0,11. Γενικά οι ΣΑ έτειναν να μειώνονται με την πρόοδο της καλλιέργειας, σε αντίθεση με τους ρυθμούς απορρόφησης (απορροφούμενες ποσότητες ανά μονάδα χρόνου), οι οποίοι αυξήθηκαν ακολουθώντας την αύξηση του ρυθμού συσσώρευσης ξηρής φυτομάζας. Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ζημιά που προκαλείται από την αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) όταν γίνεται προσπάθεια να διατηρηθεί η συνιστώμενη αναλογία των μακροκατιόντων K<sup>+</sup>:Ca<sup>2+</sup>:Mg<sup>2+</sup> στο ΘΔΣ μέσω της αύξησης των συγκεντρώσεων του K<sup>+</sup> και του Mg<sup>2+</sup> σε αντιστοιχία με αυτή του Ca<sup>2+</sup> είναι μεγαλύτερη από το όφελος που προκύπτει. Η πρακτική αυτή αύξησε προοδευτικά την EC στο περιβάλλον της ρίζας σε υψηλότερα επίπεδα από αυτά που παρατηρήθηκαν στις άλλες μεταχειρίσεις, με αποτέλεσμα την μείωση του μέσου βάρους των καρπών και τελικά της ολικής απόδοσης σε καρπούς (20% μείωση). Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής, συνίσταται η κατάστρωση ενός σχήματος θρέψης για την πεπονιά το οποίο περιλαμβάνει διαφορετικές συνθέσεις θρεπτικού διαλύματος σε μακροστοιχεία για τουλάχιστον τρία διακριτά στάδια ανάπτυξης κατά τη διάρκεια του παραγωγικού κύκλου της όταν καλλιεργείται σε κλειστό υδροπονικό σύστημα στις Μεσογειακές συνθήκες, ώστε να επιτευχθεί υψηλή παραγωγικότητα χωρίς να υποβαθμίζονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά και η διατροφική αξία των καρπών.

Η δεύτερη ερευνητική εργασία είχε σκοπό να μελετήσει τη συσσώρευση του NaCl και την απορρόφηση των θρεπτικών μακροστοιχείων σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια πεπονιάς (*Cucumis melo* L.) σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού. Τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl στο χρησιμοποιούμενο νερό άρδευσης, και ειδικότερα 0,7, 2,5, και 5 mM, χρησιμοποιήθηκαν σε δύο πειραματικές καλλιέργειες πεπονιάς, μία που ξεκίνησε το Χειμώνα και ολοκληρώθηκε την Άνοιξη (X-A) και μία δεύτερη που ξεκίνησε

την Άνοιξη και ολοκληρώθηκε το Καλοκαίρι (A-K). Οι σκοποί της παρούσας εργασίας ήταν:

- (1) η μοντελοποίηση της συσσώρευσης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον των ριζών και
- (2) η μελέτη της επίδρασης που ασκεί η βαθμιαία αύξηση της αλατότητας του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος στις συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) των μακροθρεπτικών από τα φυτά. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συγκεντρώσεις του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον της ρίζας ακολουθούν μια σιγμοειδή καμπύλη αύξησης σε συνάρτηση με το χρόνο. Η μαθηματική ανάλυση των δεδομένων έδειξε ότι η σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  ή του  $\text{Cl}^-$  και της αντίστοιχης συγκέντρωσης τους στο περιβάλλον της ρίζας μπορεί να περιγραφεί με εκθετικές εξισώσεις του τύπου  $C_{xu}=aC_{xs}^b$  (όπου  $C_{xu}$  είναι η αναλογία απορρόφησης  $\text{Na}^+$  ή  $\text{Cl}^-$  στο νερό και  $C_{xs}$  η συγκέντρωση του  $\text{Na}^+$  ή του  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον της ρίζας). Εντούτοις, η παραμετροποίηση (βαθμονόμηση των παραμέτρων  $a$  και  $b$ ) του μοντέλου στην πειραματική καλλιέργεια με υψηλούς ρυθμούς διαπνοής (A-K) έδωσε καλύτερα αποτελέσματα. Ο έλεγχος της αξιοπιστίας του μοντέλου επιβεβαίωσε τη δυνατότητα του μοντέλου να εφαρμόζεται σε όλη την καλλιεργητική περίοδο του πεπονιού και για ένα ευρύ φάσμα κλιματικών δεδομένων. Η βαθμιαία συσσώρευση των ιόντων  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στο κλειστό σύστημα στα επίπεδα που μελετήθηκαν στο εν λόγω πείραμα δεν επηρέασε σημαντικά τις μέσες ΣΑ των θρεπτικών μακροστοιχείων (δηλ. N, P, K, Ca και Mg) οι οποίες στα αρχικά στάδια της καλλιέργειας ήταν μεγαλύτερες σε σύγκριση με αυτές που προσδιορίστηκαν στα μεταγενέστερα στάδια. Επίσης, οι μέσες ΣΑ του Ca και του N ήταν υψηλότερες από αυτές που έχουν προσδιορισθεί σε θερμοκήπια των Βόρειων Ευρωπαϊκών χωρών. Τα πιο πάνω αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε λογισμικά προγράμματα υποστήριξης της λήψης απόφασης (Decision Support Systems-DSS), με στόχο την αριστοποίηση της θρέψης και την ελαχιστοποίηση των δυσμενών επιδράσεων της αλατότητας σε καλλιέργειες πεπονιού σε κλειστά υδροπονικά συστήματα όταν η άρδευση γίνεται με χαμηλότερης ποιότητας νερό.

Η τρίτη ερευνητική εργασία είχε σκοπό να μελετήσει την επίδραση της βαθμιαίας αύξησης της αλατότητας του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος στη βλαστική αύξηση και παραγωγή, καθώς και σε παραμέτρους φυσιολογίας και θρέψης φυτών πεπονιάς (*Cucumis melo* L.) όταν καλλιεργούνται σε κλειστό υδροπονικό σύστημα. Η εργασία αυτή βασίζεται σε δεδομένα προερχόμενα από τα ίδια πειράματα που περιγράφονται στη δεύτερη ερευνητική εργασία. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται επιπλέον αποτελέσματα με στόχο την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών απόκρισης των φυτών πεπονιάς στη βαθμιαία συσσώρευση των αλάτων στο διάλυμα ανακύκλωσης. Επιγραμματικά, συγκεντρώσεις NaCl στο νερό άρδευσης, 0,7, 2,5, και 5 mM, εφαρμόστηκαν σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια πεπονιάς σε δύο διαφορετικές εποχές ανάπτυξης (X-A και A-K). Η παρουσία 2,5 mM NaCl στο νερό άρδευσης που χρησιμοποιούνταν για την παρασκευή των θρεπτικών διαλυμάτων αύξησε τις συγκεντρώσεις Na<sup>+</sup> στο περιβάλλον της ρίζας μέχρι το επίπεδο των 15 mM (X-A) και 20 mM (A-K). Όταν το νερό άρδευσης περιείχε 5 mM NaCl, οι συγκεντρώσεις Na<sup>+</sup> στο περιβάλλον της ρίζας έφτασαν τα 30 mM (X-A) και 40 mM (A-K). Μελετήθηκαν φωτοσυνθετικές παράμετροι, υδατικές σχέσεις, επίπεδα θρεπτικών και μη-θρεπτικών ιόντων στους φυτικούς ιστούς, συνολική απορρόφηση θρεπτικών στοιχείων, αύξηση, παραγωγή και χαρακτηριστικά ποιότητας των καρπών. Και στις δύο εποχές, η παραγόμενη βιομάζα και η απόδοση σε καρπούς επηρεάστηκαν αρνητικά (περίπου 22% μείωση) μόνο στα φυτά που εκτέθηκαν σε υψηλή συγκέντρωση NaCl. Η αρνητική επίπτωση των προαναφερθέντων υψηλών επιπέδων αλατότητας στην παραγωγή ολικής βιομάζας και καρπών φαίνεται να συνδέεται με μείωση της στοματικής αγωγιμότητας, η οποία περιορίσει τη διάχυση του CO<sub>2</sub> στα κύτταρα του φύλλου, καθώς επίσης και σε ωσμωτικές και ειδικές ιοντικές επιδράσεις των αλάτων που συσσωρεύτηκαν στο διάλυμα ριζοστρώματος και ακολούθως στους φυτικούς ιστούς. Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει το συμπέρασμα ότι η χρήση αρδευτικού νερού με συγκέντρωση NaCl μέχρι τα 2,5 mM, επιτρέπει την πλήρη

και συνεχή ανακύκλωση των απορροών σε κλειστό σύστημα καλλιέργειας πεπονιάς, χωρίς δυσμενείς επιδράσεις στην παραγωγή και την ποιότητα.

Η τέταρτη ερευνητική εργασία είχε σκοπό να μελετήσει τη σχέση μεταξύ της κατανάλωσης νερού και της συσσώρευσης NaCl σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς, και την επίδραση της στην απορρόφηση μακροθρεπτικών, την βλαστική αύξηση, την παραγωγή και την ανταλλαγή αερίων κατά τη φωτοσύνθεση. Φυτά κολοκυθιάς (*Cucurbita pepo* L.) καλλιεργήθηκαν σε κλειστό υδροπονικό σύστημα και τροφοδοτήθηκαν με θρεπτικό διάλυμα το οποίο περιείχε διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl (0,7, 3, 5 και 7 mM) τόσο κατά την περίοδο της Άνοιξης (Α), όσο και κατά την περίοδο Φθινοπώρου-Χειμώνα (Φ-Χ). Πρωταρχικός στόχος της εργασίας ήταν η περιγραφή της μαθηματικής σχέσης που συνδέει τη συγκέντρωση του Na<sup>+</sup> και του Cl<sup>-</sup> στο διάλυμα ριζοστρώματος και των αντίστοιχων αναλογιών απορρόφησης Na<sup>+</sup>/νερό και Cl<sup>-</sup>/νερό (συγκεντρώσεις απορρόφησης-ΣΑ). Ο δεύτερος κύριος στόχος ήταν να προσδιορισθούν οι μέσες ΣΑ επιλεγμένων μακροθρεπτικών (δηλ. N, P, K, Ca και Mg) και να μελετηθεί πως επηρεάζονται από τη βαθμιαία αύξηση της αλατότητας NaCl στο περιβάλλον της ρίζας. Ο ρυθμός συσσώρευσης των ιόντων Cl<sup>-</sup> και Na<sup>+</sup> στο χώρο των ριζών αρχικά ήταν αργός, στη συνέχεια επιταχύνθηκε με την πάροδο του χρόνου και την αύξηση του μεγέθους των φυτών και τελικά σχεδόν μηδενίστηκε όταν σταδιακά εξισορροπήθηκαν οι αναλογίες απορρόφησης Na<sup>+</sup>/νερό και Cl<sup>-</sup>/νερό με τις συγκεντρώσεις των δύο αυτών ιόντων στο εισερχόμενο αρδευτικό νερό στην αντίστοιχη μεταχείριση αλατότητας. Η σχέση που συνδέει τις εξωτερικές συγκεντρώσεις με τις συγκεντρώσεις απορρόφησης του Na<sup>+</sup> και του Cl<sup>-</sup> αποδείχθηκε ότι είναι εκθετικής μορφής ( $C_{xu}=aC_{xs}^b$ , όπου  $C_{xu}$  είναι η αναλογία απορρόφησης Na<sup>+</sup> ή Cl<sup>-</sup> προς νερό και  $C_{xs}$  η συγκέντρωση του Na<sup>+</sup> ή του Cl<sup>-</sup> στο περιβάλλον της ρίζας). Οι παράμετροι του μοντέλου ( $a$  και  $b$ ) που βαθμονομήθηκαν κατά την μία καλλιεργητική περίοδο ελέγχθησαν με επιτυχία ως προς την αξιοπιστία τους σε καλλιέργεια διαφορετικής εποχής ανάπτυξης. Το

μοντέλο (προσομοίωμα) αυτό χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για την επίλυση μιας διαφορικής εξίσωσης η οποία αποδίδει τη συγκέντρωση του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον των ριζών κολοκυθιάς σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού από τα φυτά. Τα αποτελέσματα προσδιορισμού των μέσων ΣΑ των μακροθρεπτικών κυμάνθηκαν σε αδρές γραμμές σε παρόμοια επίπεδα στις δύο καλλιεργητικές περιόδους (συνολικά για N, P, K, Ca και Mg ήταν 14,8, 1,1, 5,6, 3,6, και 1,5  $\text{mmol L}^{-1}$ , αντίστοιχα), με αυξημένες τιμές στα αρχικά στάδια οι οποίες μειώθηκαν με την πρόοδο της καλλιέργειας και την αύξηση της διαπνέουσας φυλλικής επιφάνειας. Εντούτοις, ορισμένες διαφορές στις ΣΑ των μακροθρεπτικών ανάμεσα στις μεταχειρίσεις αλατότητας NaCl δεν ήταν πάντα διακριτές στις δύο εποχές καλλιέργειας. Με βάση τις μέσες ΣΑ, η γενική μοριακή αναλογία απορρόφησης K:Ca:Mg ανήλθε σε 0,52:0,34:0,14 ενώ αυτή μεταξύ N και K (N:K) ήταν ίση με 2,64. Τα χαρακτηριστικά της αύξησης και ανάπτυξης των φυτών (δηλ. παραγωγή βιομάζας, απόδοση σε καρπούς, ποιότητα καρπών και ανταλλαγή αερίων κατά τη φωτοσύνθεση) υποδηλώνουν ότι πηγές νερού με συγκέντρωση NaCl που δεν υπερβαίνει τα 3 mM μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια για την παρασκευή θρεπτικών διαλυμάτων σε υδροπονικές καλλιέργειας κολοκυθιάς με συνεχή και πλήρη ανακύκλωση των απορροών.

Τέλος η πέμπτη ερευνητική εργασία είχε σκοπό τη συσχέτιση της συσσώρευσης  $\text{Ca}^{2+}$  με την αθροιστική κατανάλωση νερού σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς, καθώς και τη μελέτη των επιδράσεων που έχει αυτή στην απορρόφηση μακροθρεπτικών, την αύξηση, την παραγωγή, την ποιότητα και τη φωτοσύνθεση. Φυτά κολοκυθιάς (*Cucurbita pepo* L.) καλλιεργούμενα σε κλειστό υδροπονικό σύστημα τροφοδοτήθηκαν με θρεπτικό διάλυμα το οποίο περιείχε διαφορετικές συγκεντρώσεις  $\text{Ca}^{2+}$  (1,5, 3, 4,5 και 6 mM). Για την ανάπτυξη της μαθηματικής σχέσης μεταξύ της συγκέντρωσης του  $\text{Ca}^{2+}$  στο διάλυμα ριζοστρώματος και της αντίστοιχης αναλογίας απορρόφησης  $\text{Ca}^{2+}$  προς νερό από τα φυτά (συγκέντρωση απορρόφησης-ΣΑ), διευρύνθηκε η εφαρμογή καθορισμένων εξισώσεων που

περιγράφουν τη συσσώρευση της αλατότητας NaCl στο περιβάλλον της ρίζας βασισμένα σε ισοζύγια μάζας σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα (βλέπε δεύτερη και τέταρτη εργασία). Πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα, από τα οποία το ένα (καλλιέργεια Άνοιξη-Καλοκαίρι: A-K) χρησιμοποιήθηκε για την παραμετροποίηση του εμπειρικού μοντέλου, ενώ το δεύτερο (καλλιέργεια Φθινόπωρο-Χειμώνα: Φ-X) χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των παραμέτρων του μοντέλου. Δεύτερος κύριος στόχος ήταν να μελετηθεί πως επηρεάζονται οι μέσες ΣΑ επιλεγμένων μακροθρεπτικών (δηλ. N, P, K, Ca και Mg) από τη σταδιακή συσσώρευση  $Ca^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συγκεντρώσεις του  $Ca^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας ακολουθούν μια σιγμοειδή καμπύλη αύξησης σε συνάρτηση με το χρόνο, ακολουθώντας παρόμοια πορεία συσσώρευσης με τα ιόντα του  $Na^+$  και του  $Cl^-$  στο περιβάλλον των ριζών κολοκυθιάς (τέταρτη ερευνητική εργασία). Η μαθηματική σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης του  $Ca^{2+}$  στο διάλυμα ριζοστρώματος και της αντίστοιχης αναλογίας απορρόφησης  $Ca^{2+}$ /νερό αποδείχθηκε ότι είναι εκθετικής μορφής. Με εφαρμογή μη γραμμικής ανάλυσης παλινδρόμησης στα πειραματικά δεδομένα υπολογίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου (πείραμα βαθμονόμησης), και ελέγχθηκε η αξιοπιστία τους σε μια δεύτερη καλλιέργεια (πείραμα επαλήθευσης). Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις σχέσεις, εκτιμήθηκε με ικανοποιητική ακρίβεια η συγκέντρωση του  $Ca^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας ως συνάρτηση της αθροιστικής κατανάλωση νερού από τα φυτά κολοκυθιάς. Η τροφοδότηση των φυτών με διαφορετικά επίπεδα  $Ca^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα επηρέασε τις ΣΑ του N και Ca, σε αντίθεση με τις ΣΑ του P, K και Mg που δεν διαφοροποιήθηκαν. Από τα χαρακτηριστικά της αύξησης και ανάπτυξης των φυτών (δηλ. παραγωγή βιομάζας, απόδοση σε καρπούς, ποιότητα καρπών και ανταλλαγή αερίων κατά τη φωτοσύνθεση) φαίνεται ότι είναι δυνατή η χρήση αρδευτικού νερού με περιεκτικότητα  $Ca^{2+}$  που δεν υπερβαίνει τη συγκέντρωση 3 mM για την παρασκευή θρεπτικών διαλυμάτων σε κλειστές υδροπονικές καλλιέργειες κολοκυθιάς με μηδενικές



απορροές στο περιβάλλον. Το παραπάνω μοντέλο και οι ΣΑ των θρεπτικών στοιχείων μπορούν να ενσωματωθούν επίσης σε ευφυή συστήματα αυτοματισμών (DSS) στα θερμοκήπια για τη διαχείριση του θρεπτικού διαλύματος, ιδιαίτερα όταν το διαθέσιμο νερό άρδευσης χαρακτηρίζεται από αυξημένες συγκεντρώσεις ασβεστίου.

Τα προσομοιώματα (μοντέλα) αυτά όπως και οι μέσες συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) των θρεπτικών στοιχείων που προσδιορίστηκαν μπορούν να συνδυασθούν με εναλλακτικές τεχνικές ανακύκλωσης οι οποίες βασίζονται στην αυτόματη αναπροσαρμογή των δοσολογιών έγχυσης λιπασμάτων. Στόχος της χρήσης αυτών των εναλλακτικών τεχνικών ανακύκλωσης είναι η μείωση της απόρριψης νερού και λιπασμάτων στο περιβάλλον με ταυτόχρονη διατήρηση των αποδόσεων και της ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες πεπονιού και κολοκυθιού στις Μεσογειακές συνθήκες, στις οποίες τα νερά όχι σπάνια χαρακτηρίζονται από υψηλές συγκεντρώσεις  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  αλλά και  $\text{Ca}^{2+}$ .

**Επιστημονική περιοχή:** Θρέψη φυτών

**Λέξεις κλειδιά:** *Cucumis melo*, πεπόνι, *Cucurbita pepo*, κολοκύθι, θρέψη φυτών, μοντέλα αλατότητας,  $\text{NaCl}$ , συσσώρευση  $\text{Ca}$ , θρεπτικά μακροστοιχεία, αναλογία  $\text{K}:\text{Ca}:\text{Mg}$ , συγκεντρώσεις απορρόφησης, ανακύκλωση θρεπτικού διαλύματος, κλειστά συστήματα, υδροπονία, φωτοσύνθεση, παραγωγή, ποιότητα

## Summary

This thesis focuses on plant nutrition aspects with particular emphasis on closed-loop hydroponic systems under salinity conditions. To this purpose a number of experiments have been conducted on melon (*Cucumis melo* L.) and zucchini squash (*Cucurbita pepo* L.) plants with the aim to determine the uptake of nutrients and non-nutrients elements in a recirculating nutrient solution under a progressive salinity built-up. In fact, the research goals and findings of this thesis are discussed in the following numbered paragraphs:

**I:** The aim of the present study was to determine uptake ratios between macronutrients and water for melon (*Cucumis melo* L. cv. Dikti) grown in a closed soilless cropping system. The obtained data can be used to establish standard nutrient solution compositions for melon crops grown in closed hydroponic systems under Mediterranean climatic conditions. Nutrient and water uptake by plants in the closed hydroponic system was compensated for by supplying replenishment nutrient solutions (RNS) differing either in the concentrations of  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ , and  $Mg^{2+}$  or in their mutual ratio. The RNS, used as control treatment, had an electrical conductivity (EC) of  $1.74 \text{ dS m}^{-1}$  and contained  $6.5 \text{ mM } K^+$ ,  $2.8 \text{ mM } Ca^{2+}$ , and  $1.0 \text{ mM } Mg^{2+}$  ( $K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+} = 0.63 : 0.27 : 0.10$ ). Control RNS was compared with two other RNS, both with a high  $Ca^{2+}$  level ( $4.2 \text{ mM}$ ). The  $K^+$  and  $Mg^{2+}$  levels in these two RNSs were: (i) not altered (corresponding to a ratio of  $K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+} = 0.55 : 0.36 : 0.09$ ;  $EC = 2.0 \text{ dS m}^{-1}$ ) or (ii) increased to maintain the same  $K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+}$  ratio as in the control RNS ( $EC = 2.45 \text{ dS m}^{-1}$ ). Nutrient to water uptake ratios, commonly termed uptake concentrations (UCs), were assessed by two alternative methods, i.e. (i) estimating the ratio between nutrient and water removal from the system or (ii) estimating the ratio between the mass of the nutrient that was recovered from plant biomass and the water consumption. Over the two methods, mean UCs for N, P, K, Ca and Mg were  $15.4$ ,  $1.31$ ,  $5.47$ ,  $3.78$ , and  $1.02 \text{ mmol L}^{-1}$ , respectively, and tissue analysis resulted in a  $K : Ca : Mg$

molar ratio of = 0.55 : 0.34 : 0.11 in the whole plant. Moreover, the UCs tended to decrease as the crop aged although, in absolute values, the mass of nutrients absorbed increased following dry-weight accumulation. Based on the obtained results, adapting the composition of the nutrient solution at least three times during the cropping period of melon is recommended. Further, the results revealed that the damage caused by the increase of the EC when attempting to maintain a target  $K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+}$  ratio in the replenishment NS is higher than the benefits from the optimal cation ratio. Increasing  $K^+$  and  $Mg^{2+}$  concentration in addition to that of  $Ca^{2+}$  to maintain a standard  $K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+}$  ratio raises the EC in the root zone ( $4.62 \text{ dS m}^{-1}$ ), due to increased accumulation of nutrients, thereby reducing the mean fruit weight and concomitantly the total fruit yield (20% decrease). Leaf gas exchange, chlorophyll parameters and fruit taste quality were not influenced by the differences in macronutrient cation concentrations or ratios in the RNS, whereas phenolics and antioxidant capacity in melon fruit were enhanced by the increased root-zone EC.

**II:** To optimize nutrient supply in melon (*Cucumis melo* L.) cultivated in closed-loop hydroponic systems under Mediterranean climatic conditions, the process of salinity build-up has to be better understood. To attain this objective, two experiments were conducted in two cropping seasons (winter-spring and spring-summer) in order to: (i) establish relationships between  $Na^+$  and  $Cl^-$  concentrations in the root zone and uptake concentrations (UC) of  $Na^+$  and  $Cl^-$ , respectively, i.e.  $Na^+$ /water and  $Cl^-$ /water uptake ratios, and (ii) test whether macronutrient UC in melon grown in closed hydroponic systems are influenced by the gradual salinity build-up. Three different NaCl concentrations in the irrigation water used to prepare nutrient solutions, i.e. 0.7, 2.5, and 5 mM, were applied. The UC of  $Na^+$  and  $Cl^-$  increased over time but at a certain time point in the cropping cycle they converged to a plateau corresponding to the salinity treatment. Exponential relationships between the  $Na^+$  and  $Cl^-$  concentrations in the root zone and the UC of  $Na^+$  and  $Cl^-$ , respectively, were

successfully fitted experimental results in both experiments. However, parameterization of the model with data from the high-transpiration season revealed superiority. The established model parameters corresponded well over the whole melon cultivation cycle and a wide range of climatic conditions. The NaCl-salinity up to the tested level had no significant effect on the UC of macronutrients (i.e. N, P, K, Ca and Mg). The mean UC of Ca and N were higher than those reported under northern-European climatic conditions. The obtained results may be used through on-line operating Decision Support Systems to optimize nutrient supply and minimize salinity impacts in melon grown in closed hydroponic systems when the quality of the irrigation water is sub-optimal.

**III:** Minimizing salinity impacts on yield in melon crops cultivated in closed-loop hydroponic systems requires better understanding of the physiological impact of gradual salt accumulation in the recycled solution. To attain this objective, different NaCl concentrations in the irrigation water, i.e. 0.7, 2.5, and 5 mM, were applied in two cropping seasons (winter-spring;WS and spring-summer;SS). In both seasons plant biomass and yield were negatively affected only in high NaCl-treated plants, due to stomatal limitations, which restricted CO<sub>2</sub> diffusion into the leaf, osmotic and salt-specific effects. However, a progressive NaCl built-up to maximum concentrations in the root zone solution of 15 (WS) and 20 mM (SS), enabled plants to preserve several physiological mechanisms, thereby adjusting growth and yield without impairing fruit quality. Our results suggest that the use of irrigation water containing up to 2.5 mM NaCl, is feasible in melon crops grown in closed-loop hydroponic systems, without yield and quality losses.

**IV:** Zucchini squash (*Cucurbita pepo* L.) plants were grown in a closed-loop hydroponic system and supplied with nutrient solution (NS) containing NaCl at different concentrations (0.7, 3, 5 and 7 mM). The primary aim of the study was to define the relationship between the concentration of Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> in the root zone solution and the

respective  $\text{Na}^+$ /water or  $\text{Cl}^-$ /water uptake ratios (uptake concentrations, UC). A second objective was to determine the UC of macronutrients (i.e., N, P, K, Ca and Mg) and to test whether they are influenced by the gradual increase of the root zone salinity due to progressive NaCl accumulation. Two experiments were conducted, of which one (spring crop) was used to parameterize an existing empirical model, while the second one (autumn-winter crop) was commissioned to test the validity of the determined model parameters. Both  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$  ions accumulated progressively in the root zone solution over time showing a tendency to stabilize at final concentrations according to the corresponding salinity treatment. The relationship between the  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  concentrations in the root zone and the  $\text{Na}^+$ /water or  $\text{Cl}^-$ /water uptake ratios proved to be exponential and the model parameters successfully fitted to data from crops cultivated at different cropping seasons. This model may be used to monitor  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  concentrations in the root environment of zucchini crops as relationships of the plant water consumption. The exposure of plants to NaCl salinity affected the UC of N, K, Ca and Mg, but the results for some nutrients were not consistent in both growing seasons. The measurements of plant growth characteristics (i.e., biomass, yield, fruit quality and photosynthesis) revealed that water resources containing up to 3 mM NaCl do not cause unacceptable yield losses in zucchini crops grown in completely closed hydroponic systems.

**V:** Zucchini (*Cucurbita pepo* L.) crops were grown in a recirculating nutrient solution (NS) with different  $\text{Ca}^{2+}$  concentrations (1.5, 3, 4.5 and 6 mM) in two cropping seasons (spring-summer; SS and autumn-winter; AW). The objectives of this study were, first, to mathematically correlate the accumulation of  $\text{Ca}^{2+}$  in the root environment and the respective  $\text{Ca}^{2+}$ /water uptake ratio (namely uptake concentration; UC). Secondly, UC of macronutrients (i.e., N, P, K, Ca and Mg) were determined under gradually increased concentrations of  $\text{Ca}^{2+}$  in the root zone solution. Equations of the literature (see Sonneveld et al., 1999; Carmassi et al., 2005), initially developed to predict salt accumulation in a closed hydroponic system,

were further extended to fit experimental results. Calcium concentrations in the recycled solution progressively increased during experimental period but on the last part of the growth cycle accumulation rates were decreased and final concentrations were nearly stabilized. As indicated by regression coefficients, the empirical relationship between the concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  in the root zone and the corresponding uptake ratio  $\text{Ca}^{2+}/\text{water}$  was better described by curvilinear rather than linear functions. Validation of the model showed a very good agreement between simulated and measured values and the model version proved to be operative to simulate  $\text{Ca}^{2+}$  accumulation in soilless zucchini. The exposure of plants to increasing  $\text{Ca}^{2+}$  levels affected both tissue concentrations and UCs of Ca and N, but this was not true for P, K, and Mg. Photosynthesis, plant growth, yield and water uptake were restricted (15% decrease) at high external  $\text{Ca}^{2+}$  levels, due to high total salt concentration (EC) in the recycled solution. Fruit quality results, however, remained unaffected by treatments with the exception of fruit nitrate content. The empirical model (relationship) developed in this work, indicates the possibility to predict  $\text{Ca}^{2+}$  ion concentrations in the root environment of zucchini crops as relationships of the water absorbed by the crop, on the basis of a mass balance equation. Last but not least, the results showed that in soilless zucchini crops with zero discharge of fertigation effluents, there is no compelling reason not to use irrigation water resources with  $\text{Ca}^{2+}$  concentration up to 3 mM.

**Scientific area:** Plant nutrition

**Keywords:** *Cucumis melo*, melon, *Cucurbita pepo*, zucchini, plant nutrition, salinity models, NaCl, Ca, macronutrient uptake, K:Ca:Mg, uptake concentrations, recirculating nutrient solution, closed systems, hydroponics, photosynthesis, growth, production, fruit quality

## 1. Γενική Εισαγωγή – Στόχος της διδακτορικής διατριβής

Η καλλιέργεια φυτών εκτός εδάφους (γνωστή και ως υδροπονία - hydroponics) και ειδικότερα η καλλιέργεια σε υποστρώματα (π.χ. πετροβάμβακα, ίνες καρύδας) και θρεπτικά διαλύματα (π.χ. NFT), εφαρμόζεται με μεγάλη επιτυχία σε παγκόσμια κλίμακα για την παραγωγή κηπευτικών θερμοκηπίου (Raviv and Lieth, 2008, Savvas et al., 2013). Η εφαρμογή της υδροπονίας στα θερμοκήπια των χωρών της Βόρειας Ευρώπης αρχικά ξεκίνησε ως ένας τρόπος αντιμετώπισης των εδαφογενών παθογόνων, της υποβάθμισης της γονιμότητας του εδάφους λόγω της συνεχούς εκμετάλλευσης, αλλά και για τον καλύτερο έλεγχο της θρέψης των φυτών (Sonneveld and Voogt, 2009). Η εξέλιξη όμως και η τελειοποίηση της υδροπονίας ως σύγχρονης μεθόδου καλλιέργειας φυτών στο θερμοκήπιο είναι θεαματική τις τελευταίες δεκαετίες, με αποτέλεσμα σήμερα π.χ. στην Ολλανδία όχι μόνο να εφαρμόζεται ως κύρια μέθοδος καλλιέργειας καρποδοτικών λαχανικών στο θερμοκήπιο αλλά και η ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος να είναι υποχρεωτική από το νόμο (Pardossi et al., 2006, Sonneveld and Voogt, 2009). Παρόλο που υπήρξε μια χρονική υστέρηση σε σχέση με τις Βόρειες χώρες, οι υδροπονικές καλλιέργειες αυξήθηκαν σημαντικά με την πάροδο του χρόνου και στην περιοχή της Μεσογείου τα τελευταία χρόνια (π.χ. Ισπανία, Ισραήλ) ως η πλέον εντατική μορφή καλλιέργειας, λόγω των απρόβλεπτων κλιματικών αλλαγών, της υποβάθμισης του εδάφους, της περιορισμένης διαθεσιμότητας υψηλής ποιότητας νερού άρδευσης, της ανάγκης για αυξημένη ασφάλεια των τροφίμων και της επιβολής πολλών περιβαλλοντικών περιορισμών (Pardossi et al., 2004, Raviv and Lieth, 2008, Roupael and Colla, 2009, IPCC, 2014). Ένας από τους βασικούς λόγους της περιορισμένης εξάπλωσης της υδροπονικής καλλιέργειας στις Μεσογειακές συνθήκες είναι η ανεπάρκεια εξειδικευμένων γνώσεων και τεχνολογιών για την εφαρμογή τους στις Μεσογειακές κλιματικές συνθήκες, ιδιαίτερα όσον αφορά τη διαχείριση και κατάρτιση σχημάτων θρέψης των φυτών (ειδικά στα κλειστά συστήματα στα οποία γίνεται σημαντική

εξοικονόμηση νερού και θρεπτικών στοιχείων μέσω της ανακύκλωσης), καθώς και τη διαχείριση της άρδευσης (Ravin et al., 1998, Savvas, 2002a, b, Katsoulas et al., 2006, Signore et al., 2016). Ταυτόχρονα όμως λύσεις που υιοθετούνται πολλές φορές αυτούσιες, όπως εφαρμόζονται σε άλλες χώρες, εμπεριέχουν κινδύνους π.χ. μετά από κάποιο χρονικό διάστημα να χαρακτηριστούν ακατάλληλες για τις Μεσογειακές συνθήκες (Νεοκλέους, 2014). Στα Ελληνικά θερμοκήπια υπολογίζεται ότι τα τελευταία χρόνια η εκτός εδάφους καλλιέργεια κηπευτικών και δρεπτών ανθέων υπερβαίνει τα 1.500 στρέμματα σε ένα σύνολο θερμοκηπιακών καλλιεργειών που προσεγγίζει τα 55.000 στρέμματα (Σάββας, 2012). Στην Κύπρο σήμερα τα θερμοκήπια καταλαμβάνουν έκταση 3.755 στρέμματα και οι υδροπονικές καλλιέργειες 342 στρέμματα (Νεοκλέους, 2014). Η σχετικά περιορισμένη εξάπλωση των υδροπονικών καλλιεργειών κηπευτικών στην Ελλάδα αντικατοπτρίζει την γενικότερη τεχνολογική υστέρηση του κλάδου των θερμοκηπιακών εκμεταλλεύσεων και αποτελεί μία από τις αιτίες της χαμηλής παραγωγικότητας και κατ' επέκταση της χαμηλής ανταγωνιστικότητάς τους σε σύγκριση όχι μόνο με την Ολλανδία αλλά και με άλλες ανταγωνίστριες χώρες της Μεσογειακής λεκάνης (π.χ. Ισραήλ, Ισπανία, LIFE+ project [www.adapt2change.eu](http://www.adapt2change.eu)). Για παράδειγμα, στην Ισπανία τα τελευταία 30 χρόνια έχουν αυξηθεί ραγδαία οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες ενώ μόνο στην περιοχή της Αλμερίας τα θερμοκήπια καταλαμβάνουν έκταση 270.000 στρ. και οι υδροπονικές καλλιέργειες έκταση 50.000 στρ. για την παραγωγή εκτός εποχής κηπευτικών με κύριο προορισμό τις αγορές της Δ. Ευρώπης (Magán et al., 2008, Thompson et al., 2013). Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η στήριξη ερευνητικών προσπαθειών με στόχο την ανάπτυξη τεχνολογιών υδροπονικής καλλιέργειας κηπευτικών που είναι κατάλληλες για τα μεσογειακά θερμοκήπια κρίνεται στόχος ύψιστης προτεραιότητας για το συγκεκριμένο παραγωγικό κλάδο. Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στην ανακύκλωση των απορροών (ανάπτυξη κλειστών συστημάτων) με στόχο την καλύτερη διαχείριση των υδάτινων πόρων και του περιορισμού της απόρριψης ανόργανων χημικών



στοιχείων στο περιβάλλον όπως και την αριστοποίηση της ποιότητας μέσω βελτιστοποίησης της θρέψης χωρίς να επηρεάζεται αρνητικά το μέγεθος της παραγωγής (Katsoulas et al., 2015).

Οι ανάγκες των φυτών σε νερό και θρεπτικά στοιχεία εξαρτώνται από το γονότυπο τους (είδος και ποικιλία), το στάδιο ανάπτυξης τους, και το περιβάλλον (θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία, σχετική υγρασία κ.λπ.) στο οποίο καλλιεργούνται (Marschner, 1995, Adams, 2002, Sonneveld, 2002, Savvas et al., 2010). Οι παράγοντες αυτοί δεν επηρεάζονται από το αν το σύστημα είναι ανοιχτό ή κλειστό και επομένως οι ανάγκες των φυτών είναι ίδιες τόσο σε ανοιχτά όσο και σε κλειστά υδροπονικά συστήματα. Αυτό έχει ως φυσικό επακόλουθο, οι αναλογίες απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων και νερού (γνωστές στη βιβλιογραφία ως συγκεντρώσεις απορρόφησης/ uptake concentrations, Sonneveld, 2002) από τα φυτά να είναι ταυτόσημες στα δύο συστήματα εφόσον τα επίπεδα στη ρίζα είναι παρόμοια. Συνεπώς, οι συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων που πρέπει να διατηρούνται στο περιβάλλον των ριζών είναι ίδιες τόσο στα ανοιχτά όσο και στα κλειστά υδροπονικά συστήματα. Η σύνθεση των παρεχόμενων θρεπτικών διαλυμάτων όμως είναι διαφορετική, γιατί στα ανοιχτά συστήματα ένα μέρος των θρεπτικών στοιχείων απορρίπτεται στο περιβάλλον.

Στις καλλιέργειες σε ανοιχτά υδροπονικά συστήματα, οι επιθυμητές τιμές στη ρίζα επιτυγχάνονται πιο εύκολα καθώς στο διάλυμα τροφοδοσίας τόσο η σύνθεση όσο και η συχνότητα παροχής ελέγχεται πλήρως από τον καλλιεργητή. Στα κλειστά συστήματα όμως για το διάλυμα τροφοδοσίας υπάρχουν ιδιαιτερότητες καθώς γίνεται επαναχρησιμοποίηση του θρεπτικού διαλύματος που απορρέει από το χώρο των ριζών. Αυτό είναι μια από τις σημαντικότερες δυσκολίες που αντιμετωπίζει η εξάπλωση των κλειστών υδροπονικών συστημάτων ανάμεσα στους παραγωγούς, ιδιαίτερα στην περιοχή της Μεσογείου με τις ιδιαιτερότητες των αρδευτικών νερών (Bar-Yosef, 2008). Το ιδανικό θα ήταν να

υπολογίζονται και να προστίθενται αυτόματα σε συνθήκες πραγματικού χρόνου οι ακριβείς ποσότητες θρεπτικών στοιχείων που απορροφούν τα φυτά κάθε φορά. Προς το παρόν όμως αυτό δεν είναι εφικτό, αφού δεν είναι δυνατή η αυτόματη μέτρηση των συγκεντρώσεων των επιμέρους θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα απορροής μέσω αισθητήρων σε συνθήκες πραγματικού χρόνου (Van Os et al., 2008). Έτσι, για να είναι εφικτή από τεχνική και οικονομική άποψη η ανακύκλωση του διαλύματος απορροής στην υδροπονία, γίνεται αυτόματα η συμπλήρωσή του με νερό και θρεπτικά στοιχεία, σε αναλογίες ίσες με τις συγκεντρώσεις απορρόφησης (Sonneveld and Voogt, 2009).

Ο πειραματικός προσδιορισμός των συγκεντρώσεων απορρόφησης (μάζα απορροφούμενου θρεπτικού στοιχείου ανά μονάδα όγκου απορροφούμενου νερού) για μία συγκεκριμένη καλλιέργεια δεν είναι ιδιαίτερα εύκολος, είναι όμως εφικτός εφόσον οι σχετικές μετρήσεις γίνονται σε κλειστά υδροπονικά συστήματα και ακριβέστερα σε συστήματα καλλιέργειας χωρίς υπόστρωμα, στα οποία τα φυτά αναπτύσσονται σε ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα, όπως π.χ. το σύστημα NFT (Graves, 1983, Savvas and Lenz, 2000, Adams, 2002, Pardossi et al., 2006). Οι συγκεντρώσεις προσθήκης θρεπτικών στοιχείων σε κλειστά υδροπονικά συστήματα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία βασίζονται κυρίως σε Ολλανδικά πειραματικά δεδομένα (Sonneveld and Straver, 1994, De Kreij et al., 1999, Adams, 2002, Sonneveld, 2002, Sonneveld and Voogt, 2009). Οι αντίστοιχες τιμές για καλλιέργειες κάτω από μεσογειακές κλιματικές συνθήκες είναι πιθανότατα μειωμένες λόγω των αυξημένων ρυθμών διαπνοής που κατά κανόνα επικρατούν (Σάββας, 2012). Επομένως, οι επιθυμητές συγκεντρώσεις απορρόφησης που αναφέρονται σε διάφορες βιβλιογραφικές πηγές είναι ενδεικτικές για ένα συγκεκριμένο στάδιο καλλιέργειας και μια συγκεκριμένη εποχή του έτους και είναι δυνατό να υπόκεινται σε σημαντικές τροποποιήσεις όταν τα δεδομένα της καλλιέργειας αλλάξουν (Adams, 2002, Papadopoulos and Hao, 2002). Σημαντικές διαφορές έχουν παρατηρηθεί και μεταξύ των τιμών που προσδιορίστηκαν σε

διαφορετικές εποχές του έτους, δεδομένου ότι οι συγκεντρώσεις απορρόφησης επηρεάζονται από τις καιρικές συνθήκες (Adams, 2002, Σάββας, 2012). Ο λόγος είναι ότι οι εποχιακές μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας δεν επιδρούν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο στην απορρόφηση θρεπτικών στοιχείων και νερού και επομένως η μεταξύ τους αναλογία (συγκέντρωση απορρόφησης) μπορεί να μεταβάλλεται με την εποχή (Σάββας, 2012). Για παράδειγμα στο Ισραήλ (Bar-Tal et al., 2001a, b) συνιστούν για την πιπεριά συγκεντρώσεις N 8,3-9,3 mmol L<sup>-1</sup> στο θρεπτικό διάλυμα ενώ οι Ολλανδοί (De Kreij et al., 1999) συνιστούν συγκέντρωση N 16 mmol L<sup>-1</sup>. Προφανώς οι διαφορές αυτές αντικατοπτρίζουν διαφορετικές κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στο Ισραήλ με τη Β. Ευρώπη οι οποίες επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο τους ρυθμούς διαπνοής. Επίσης, η αύξηση της θερμοκρασίας της ρίζας σε τομάτα από τους 14 στους 16°C αύξησε την απορρόφηση του νερού και των θρεπτικών στοιχείων κατά 30% (Schröder and Lieth, 2002). Οι ίδιοι ερευνητές αναφέρουν ότι η απορρόφηση του Ca και P αυξήθηκε πολύ περισσότερο (45 και 64% αντίστοιχα) από την απορρόφηση του N, K, Mg (21-24%) όταν ανυψώθηκε η θερμοκρασία ρίζας. Επομένως, αν για κάποια θρεπτικά στοιχεία υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των πραγματικών και των προτύπων τιμών, τότε θα πρέπει κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας να γίνεται κατάλληλη διόρθωση των συγκεντρώσεων απορρόφησης που έχουν τεθεί ως βάση των υπολογισμών (Σάββας, 2012).

Συνοψίζοντας, τις τελευταίες δεκαετίες έγινε σημαντική έρευνα στον τομέα της θρέψης στις υδροπονικές καλλιέργειες (Sonneveld and Straver, 1994, De Kreij et al., 1999, Adams, 2002, Sonneveld, 2002, Sonneveld and Voogt, 2009, Σάββας, 2012). Ωστόσο, η καλύτερη κατανόηση της θρέψης των φυτών (απορρόφηση, διακίνηση και αφομοίωση των θρεπτικών στοιχείων) σε συνθήκες σταδιακής συσσώρευσης αλάτων NaCl ή θρεπτικών ιόντων όπως π.χ. το Ca<sup>2+</sup>, τα οποία όχι σπάνια υπάρχουν σε υψηλές συγκεντρώσεις στα αρδευτικά νερά στην περιοχή της Μεσογείου και κατ' επέκταση στο θρεπτικό διάλυμα

ανακύκλωσης (Bar-Yosef, 2008), θα δημιουργήσει νέα γνώση στο γνωστικό αντικείμενο της διαχείρισης της θρέψης φυτών και ειδικότερα στα κλειστά υδροπονικά συστήματα. Ως εκ τούτου, ο ερευνητικός στόχος της εργασίας είναι η **«Μελέτη της απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων από κολοκυνθοειδή (πεπόνι και κολοκύθι) καλλιεργούμενα σε κλειστά υδροπονικά συστήματα σε συνθήκες υψηλής αλατότητας»**. Προφανώς τα δεδομένα αυτά (οι συγκεντρώσεις απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων και τα μοντέλα που περιγράφουν τη συσσώρευση αλάτων στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα) μπορούν να αξιοποιηθούν σε σύγχρονα αυτοματοποιημένα συστήματα υποστήριξης της λήψης απόφασης (decision support systems-DSS) για την καλύτερη διαχείριση των θρεπτικών διαλυμάτων σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες στην περιοχή της Μεσογείου (Savvas, 2002a, Massa et al., 2011, Incrocci et al., 2012, Katsoulas et al., 2015). Επίσης, στο γενικότερο πλαίσιο των στόχων της εργασίας είναι η υιοθέτηση γεωργικών συστημάτων ακριβείας (κλειστά συστήματα καλλιέργειας) που δύνανται να προσαρμοστούν ή είναι λιγότερο ευπαθή στις καινούργιες κλιματικές συνθήκες στην περιοχή της Μεσογείου (π.χ. μοντελοποίηση χρήσης αλατούχου νερού σε συνδυασμό με την επιλογή της καλλιέργειας, Flowers and Colmer, 2015, Flowers et al., 2015). Σίγουρα όμως τα εχέγγυα της επιτυχίας βασίζονται στα θεμέλια της γνώσης ενός εξειδικευμένου επιστημονικού και τεχνολογικού γνωστικού πεδίου το οποίο υποστηρίζεται από έγκριτα ερευνητικά δεδομένα σε επίπεδο διδακτορικής διατριβής.

## **2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση**

### **2.1. Αναγκαία στοιχεία για τη θρέψη των φυτών**

Ως απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία χαρακτηρίζονται τα χημικά στοιχεία που είναι αναγκαία και αναντικατάστατα για τη φυτική ανάπτυξη. Ως απαραίτητο θρεπτικό στοιχείο ορίζεται εκείνο που έχει ένα σαφή φυσιολογικό ρόλο και του οποίου η απουσία εμποδίζει ένα φυτό να ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής (Arnon and Stout, 1939, Τσέκος, 2004). Τα

απαραίτητα στοιχεία που χρησιμοποιούμε στα θρεπτικά διαλύματα στις καλλιέργειες εκτός εδάφους τα διακρίνουμε σε μακροστοιχεία (N, P, K, Ca, Mg και S) και σε ιχνοστοιχεία (Fe, Mn, B, Zn, Cu και Mo) με βάση τις συγκεντρώσεις τους στους φυτικούς ιστούς (Καράταγλης, 1992). Οι μορφές των θρεπτικών στοιχείων που συμμετέχουν στα θρεπτικά διαλύματα είναι ως ανιόντα ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{MoO}_4^{2-}$ ), ως κατιόντα ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ) και ως ουδέτερες χημικές ενώσεις ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ). Εκτός από τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία, μπορούν να προστίθενται και κάποια άλλα με επωφελή δράση (π.χ. Na, Co, Si, Va), αν και στην πράξη αυτό συμβαίνει μόνο με το Si. Αντίθετα, το χλώριο (Cl) δεν προστίθεται στα θρεπτικά διαλύματα μέσω λιπασμάτων γιατί εμπεριέχεται σχεδόν πάντοτε σε επαρκείς ποσότητες στο χρησιμοποιούμενο νερό ή βρίσκεται ως πρόσμιξη στα λιπάσματα (Sonneveld, 2002). Σε ένα θρεπτικό διάλυμα εκτός από την πληρότητα όσο αφορά όλα τα αναγκαία ιόντα και την ποσότητα του κάθε θρεπτικού στοιχείου, μας ενδιαφέρουν και οι σχετικές αναλογίες μεταξύ τους καθώς υπάρχει διαφορετική αποτελεσματικότητα απορρόφησης για το κάθε θρεπτικό στοιχείο ώστε τελικά να παρουσιάζονται αλληλεπιδράσεις (Papadopoulos and Hao, 2002). Επίσης στη βιβλιογραφία (Mengel and Kirkby, 2001, Taiz and Zeiger, 2002) αναφέρεται και η ταξινόμηση των απαραίτητων στοιχείων με βάση τη φυσιολογική τους δράση και το βιοχημικό τους ρόλο σε τέσσερις ομάδες παρά με βάση το μέγεθος των συγκεντρώσεων τους στους φυτικούς ιστούς ως ακολούθως: ομάδα 1 (N, S): Θρεπτικά στοιχεία που σχηματίζουν τα οργανικά συστατικά των φυτών, ομάδα 2 (P, B): Θρεπτικά στοιχεία που είναι σημαντικά στην αποταμίευση ενέργειας ή στη δομική ολοκλήρωση, ομάδα 3 (K, Mg, Ca, Mn, Cl): Θρεπτικά στοιχεία που απαντώνται κυρίως σε ιοντική μορφή και ομάδα 4 (Fe, Cu, Zn, Mo, Ni): Θρεπτικά στοιχεία που συμβάλλουν στη μεταφορά ηλεκτρονίων σε διάφορα ενζυμικά συστήματα.

### 2.1.1. Άζωτο

Το άζωτο (N) είναι το μεταλλικό στοιχείο το οποίο τα φυτά χρειάζονται στις μεγαλύτερες ποσότητες και είναι συστατικό πολλών ουσιών του μεταβολισμού των φυτικών κυττάρων, μεταξύ των οποίων οι πρωτεΐνες, που αποτελούν κύριο μέρος του πρωτοπλάσματος. Το άζωτο επίσης αποτελεί συστατικό της χλωροφύλλης, των αμινοξέων, νουκλεϊκών οξέων, αλκαλοειδών και ορισμένων ορμονών (Τσέκος, 2004, Fageria and Moreira, 2011). Κατά μέσο όρο το άζωτο αποτελεί το 2-6% της ξηρής ουσίας του φυτού (Adams, 2002, Κουκουλάκης και Παπαδόπουλος, 2003) και μεταφέρεται στο φυτό κυρίως υπό την μορφή αμινοξέων (αναγωγή νιτρικών, Marschner, 1995) ενώ μπορεί να βρίσκεται και στην ανόργανη μορφή ως  $\text{NO}_3\text{-N}$  στα φύλλα και στα αγγεία του ξυλώματος (Mengel and Kirkby, 2001, Bouranis et al., 2004). Το άζωτο προστίθεται στα θρεπτικά διαλύματα ως  $\text{NO}_3^-$  και  $\text{NH}_4^+$  ιόντα, μορφές οι οποίες απορροφούνται από τα φυτά (Sonneveld, 2002, Silber and Bar-Tal, 2008, Savvas et al., 2013), αλλά το μεγαλύτερο μέρος προστίθεται σε μορφή νιτρικών όπου ο τρόπος πρόσληψης ακολουθεί τη βαθμίδα συγκέντρωσης του N (King et al., 1993, Adams, 2002). Η συγκέντρωση των αμμωνιακών στο θρεπτικό διάλυμα δεν πρέπει να είναι πάνω από  $1,5\text{-}2 \text{ mmol L}^{-1}$  ενώ συνήθως επιδιώκονται συγκεντρώσεις  $1\text{-}1,5 \text{ mmol L}^{-1}$  ώστε να μην προκαλούνται φαινόμενα φυτοτοξικότητας και ταυτόχρονα να ρυθμίζεται καλύτερα το pH στο περιβάλλον των ριζών (Sonneveld and Voogt, 2009). Τα αμμωνιακά ιόντα αν το pH αυξηθεί ( $>7,2$ ) μπορεί να μετατραπούν σε αέρια αμμωνία και ένα μέρος του αζώτου να χαθεί. Σε αντίθεση με τα αμμωνιακά, οι συγκεντρώσεις νιτρικών στα θρεπτικά διαλύματα κυμαίνονται μεταξύ  $8$  και  $18 \text{ mmol L}^{-1}$  (Σάββας, 2012) ή  $100\text{-}200 \text{ mg L}^{-1}$  (ppm, Benton Jones, 1997). Το άζωτο προστίθεται ως νιτρικά ιόντα ( $\text{NO}_3^-$ ) κατά 80-90% τόσο γιατί τα αμμωνιακά δεν μπορούν να προστεθούν σε ψηλές συγκεντρώσεις λόγω φυτοτοξικότητας αλλά και γιατί τα νιτρικά ισοσκελίζουν ηλεκτροχημικά τη συγκέντρωση των κατιόντων ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) στο διάλυμα, καθώς τα θειικά ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) και φωσφορικά ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) ανιόντα

χρειάζονται σε χαμηλές συγκεντρώσεις (διατήρηση ηλεκτρικής ουδετερότητας του διαλύματος, Benton Jones, 1997). Φυσικά υπερβολικές συγκεντρώσεις νιτρικών στο θρεπτικό διάλυμα μπορεί να δημιουργήσουν ανισορροπίες στην ανάπτυξη και υποβάθμιση της ποιότητας του προϊόντος (Gianquinto et al., 2013). Τα αμμωνιακά ιόντα προστίθενται στο διάλυμα κυρίως μέσω της νιτρικής αμμωνίας ενώ τα νιτρικά μπορεί να προστεθούν με τα λιπάσματα του νιτρικού ασβεστίου, νιτρικού μαγνησίου, νιτρικής αμμωνίας, νιτρικού καλίου και νιτρικού οξέος.

### **2.1.2. Φώσφορος**

Ο φώσφορος (P) είναι ένα συστατικό των νουκλεϊκών οξέων, των φωσφολιπιδίων, φωσφοπρωτεϊνών, διουκλεοτιδίων, και της τριφωσφορικής αδενοσίνης (ATP). Ως εκ τούτου, ο P απαιτείται για διαδικασίες που περιλαμβάνουν την αποθήκευση και μεταφορά ενέργειας, τη φωτοσύνθεση, τη ρύθμιση ορισμένων ενζύμων, καθώς και τη μεταφορά των υδατανθράκων (ενεργειακός μεταβολισμός, Τσέκος, 2004). Ο φώσφορος βρίσκεται στο θρεπτικό διάλυμα και απορροφάται με ευχέρεια από τα φυτά (ρίζα) κυρίως ως δισόξινο φωσφορικό ιόν ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , pH 5-7) ενώ σε υψηλές τιμές pH (>7) η θρέψη των φυτών με P καθίσταται προβληματική (Schachtman et al., 1998). Ο φώσφορος έχει περισσότερο λειτουργικό ρόλο και όχι δομικό όπως το  $\text{K}^+$  για αυτό δεν απαιτείται σε ψηλές συγκεντρώσεις (ο P αποτελεί το 0,2-1% της ξηρής ουσίας του φυτού, Κουκουλάκης και Παπαδόπουλος, 2003). Οι επιθυμητές συγκεντρώσεις στα θρεπτικά διαλύματα ανέρχονται σε 1-1,5 mmol L<sup>-1</sup> (Σάββας, 2012) ή 30-50 mg L<sup>-1</sup> (ppm, Benton Jones, 1997) και προστίθεται κυρίως ως φωσφορικό μονοκάλιο ή με τη μορφή φωσφορικού οξέος. Τα φυτά έχουν αναπτύξει αποτελεσματικούς μηχανισμούς απορρόφησης του φωσφόρου όπου η πρόσληψη του μπορεί να γίνει ενεργητικά αντίθετα με τη διαβάθμιση της συγκέντρωσης του (Schachtman et al., 1998), ενώ μεγάλες συγκεντρώσεις στα θρεπτικά διαλύματα μπορεί να

οδηγήσουν σε τοξικότητα ή ανταγωνισμό με άλλα θρεπτικά όπως π.χ. το  $Mn^{2+}$ , ο  $Zn^{2+}$  και το B (Adams, 2002), ή στο σχηματισμό αδιάλυτων φωσφορικών συμπλόκων (π.χ.  $Ca_3PO_4$ ). Ο P είναι ευκίνητος μέσα στο φυτό και μεταφέρεται μέσω του ξυλώματος από τις ρίζες στα νέα φύλλα, ενώ μπορεί να αναδιανέμεται από τα παλιά φύλλα μέσω του ηθμού στα αυξανόμενα μέρη (Mimura, 1995).

### 2.1.3. Κάλιο

Το κάλιο (K) είναι ένας σημαντικός παράγοντας στη σύνθεση πρωτεϊνών, γλυκολυτικών ενζύμων, την ενεργοποίηση ενζύμων και τη φωτοσύνθεση και τη διατήρηση της ηλεκτρικής ουδετερότητας του κυττάρου. Είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την ωσμωρύθμιση, τη σπαργή των κυττάρων και τις στοματικές κινήσεις ενώ σε συνθήκες αλατότητας ανταγωνίζεται το  $Na^+$  (Marschner, 1995, Gierth and Mäserb, 2007). Το  $K^+$  όπως έχει αναφερθεί, είναι ένα από τα πιο σημαντικά κατιόντα το οποίο έχει δομικό και λειτουργικό ρόλο στο φυτό με αποτέλεσμα οι ανάγκες των φυτών να είναι σχετικά μεγάλες και οι ρυθμοί απορρόφησης από τη ρίζα υψηλοί. Κατά μέσο όρο τα φύλλα περιέχουν K από 2-5% της ξηρής ουσίας ενώ σε ορισμένα φυτικά όργανα (π.χ. μίσχοι, στελέχη) η συγκέντρωση μπορεί να υπερβαίνει το 6% (Benton Jones, 1997, Κουκουλάκης και Παπαδόπουλος, 2003). Το  $K^+$  απορροφάται από τα φυτά ως μονοσθενές κατιόν με ενεργούς μηχανισμούς ώστε να διασφαλίζεται ικανοποιητική τροφοδότηση των φυτών, ενώ τα ιόντα  $K^+$  δείχνουν μεγάλη κινητικότητα τόσο μέσα στο κύτταρο όσο και στους ιστούς (Μαυρογιαννόπουλος, 2006). Στις καλλιέργειες εκτός εδάφους τα επίπεδα  $K^+$  που επιδιώκονται στα θρεπτικά διαλύματα κυμαίνονται μεταξύ 3 και 11 mmol L<sup>-1</sup>, ανάλογα με το είδος του φυτού, το στάδιο ανάπτυξης, κ.λπ. (Sonneveld and Straver, 1994, De Kreij et al., 1999, Savvas et al., 2013). Το κάλιο παρέχεται με τη μορφή νιτρικού καλίου, φωσφορικού μονοκαλίου και θεικού καλίου (Sonneveld, 2002). Ο Benton Jones (1997) αναφέρει



συγκέντρωση  $K^+$  στα θρεπτικά διαλύματα γύρω στα  $200 \text{ mg L}^{-1}$  (ppm). Υπερβολικά υψηλές συγκεντρώσεις  $K^+$  μπορεί να επιφέρουν αλατούχο καταπόνηση ή να δημιουργήσουν ανισορροπίες στη θρέψη των φυτών λόγω ανταγωνισμού με άλλα κατιόντα όπως π.χ. με το  $Ca^{2+}$  και το  $Mg^{2+}$  (Sonneveld and Voogt, 2009, Σάββας, 2012).

#### **2.1.4. Ασβέστιο**

Το ασβέστιο (Ca) παίζει ζωτικό ρόλο στη ρύθμιση πολλών φυσιολογικών διεργασιών που επηρεάζουν τόσο την ανάπτυξη όσο και τις αποκρίσεις στις περιβαλλοντικές καταπονήσεις. Η κίνηση του νερού και των διαλυμένων ουσιών επηρεάζεται μέσω της εμπλοκής του  $Ca^{2+}$  στη δομή της μεμβράνης (σταθεροποίηση λειτουργικότητας και ακεραιότητας των μεμβρανών), τη λειτουργία των στομάτων, τη διαίρεση του κυττάρου και τη σύνθεση του κυτταρικού τοιχώματος (White and Broadley, 2003). Επίσης έχει άμεσο ή έμμεσο ρόλο (σηματοδότη) σε συστήματα που εμπλέκονται στην άμυνα των φυτών (McLaughlin and Wimmer, 1999). Παρά την προφανή σημασία του  $Ca^{2+}$ , υπάρχει και μια έλλειψη αναγνώρισης του περιοριστικού του ρόλου, η οποία οφείλεται εν μέρει στο γεγονός ότι ορισμένες φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών επηρεάζονται σημαντικά από πολύ μικρές αλλαγές στις ποσότητες  $Ca^{2+}$  μέσα στο κυτταρόπλασμα, την ίδια στιγμή, που τα επίπεδα ασβεστίου στο φύλλο μπορεί να μην αντανakλούν τυχόν περιορισμούς (Hu and Schmidhalter, 2005). Το ασβέστιο απορροφάται με παθητική διαδικασία ως ιόν  $Ca^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα από περιοχές της ρίζας (κορυφές ριζιδίων) που δεν είναι αποφελλωμένες ώστε να μην παρεμποδίζεται η κίνηση του προς τον εσωτερικό και για το λόγο αυτό οι ρυθμοί πρόσληψης του ασβεστίου είναι σχετικά χαμηλοί (White, 1998). Το  $Ca^{2+}$  μεταφέρεται μέσω των ξυλωδών αγγείων με ανοδική κίνηση από τις ρίζες στην κυρίως διαπνέουσα επιφάνεια ενώ η καθοδική του κίνηση μέσω του ηθμού είναι εξαιρετικά περιορισμένη (Adams, 2002). Κατά μέσο όρο η περιεκτικότητα σε ασβέστιο των διαφόρων φυτών

κυμαίνεται μεταξύ 0,1-5% της ξηρής ουσίας και εξαρτάται από τις συνθήκες ανάπτυξης, το είδος και το μέρος του φυτού (White and Broadley, 2003). Η σχέση  $\text{Ca}^{2+} : \text{Na}^{2+}$  είναι ιδιαίτερα σημαντική κάτω από συνθήκες αλατότητας όπως και η σχέση  $\text{K}^+ : \text{Ca}^{2+}$  στην ισορροπημένη θρέψη των φυτών (Grattan and Grieve, 1999, Silber and Bar-Tal, 2008). Οι συγκεντρώσεις  $\text{Ca}^{2+}$  στα θρεπτικά διαλύματα που χορηγούνται σε παραγωγικές καλλιέργειες εκτός εδάφους συνίσταται να κυμαίνονται κατά κανόνα από 2 έως 6  $\text{mmol L}^{-1}$  (Adams, 2002, Sonneveld, 2002, Silber and Bar-Tal, 2008, Sonneveld and Voogt, 2009) ενώ η άριστη συγκέντρωση στα θρεπτικά διαλύματα εξαρτάται και από την παρουσία άλλων στοιχείων που ανταγωνίζονται το  $\text{Ca}^{2+}$  στις μεμβράνες (Μαυρογιαννόπουλος, 2006). Ο Benton Jones (1997) αναφέρει συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  στα θρεπτικά διαλύματα γύρω στα 200  $\text{mg L}^{-1}$  (ppm). Η απαιτούμενη ποσότητα ασβεστίου σχεδόν πάντα προστίθεται με τη μορφή νιτρικού ασβεστίου στα θρεπτικά διαλύματα. Συχνά ένα σημαντικό μέρος του  $\text{Ca}^{2+}$  που πρέπει να προστεθεί στα θρεπτικά διαλύματα βρίσκεται στο αρδευτικό νερό λόγω της υψηλής περιεκτικότητας των εδαφών σε  $\text{Ca}^{2+}$  (ασβεστολιθικά πετρώματα) που μπορεί να εκπλυθεί στα υπόγεια νερά (Σάββας, 2012). Επίσης η υψηλή συγκέντρωση P και η ανύψωση του pH στο θρεπτικό διάλυμα στην μπορεί να οδηγήσει στον σχηματισμό αδιάλυτων φωσφορικών συμπλόκων (π.χ.  $\text{Ca}_3\text{PO}_4$ ).

### 2.1.5. Μαγνήσιο

Το μαγνήσιο (Mg) είναι δομικό συστατικό της χλωροφύλλης και ενεργοποιητής ενζύμων. Είναι απαραίτητο συστατικό των ριβοσωμάτων και απαραίτητο στις RNA-πολυμεράσες ενώ υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός ενζυμικών αντιδράσεων που χρειάζονται μαγνήσιο (π.χ σύνθεση του ATP από ADP, ρύθμιση συγκέντρωσης καρβοξυλάσης της διφωσφορικής ριβουλόζης, Guo et al., 2016). Όπως και το  $\text{Ca}^{2+}$  το  $\text{Mg}^{2+}$  που πρέπει να προστεθεί στα θρεπτικά διαλύματα βρίσκεται σε σημαντικές ποσότητες στο αρδευτικό νερό

λόγω της περιεκτικότητας πολλών πετρωμάτων σε  $Mg^{2+}$  που μπορεί να εκπλυθεί στα υπόγεια νερά (Σάββας, 2012). Η συγκέντρωση  $Mg^{2+}$  στα θρεπτικά διαλύματα στις καλλιέργειες εκτός εδάφους κυμαίνεται συνήθως από 0,7 έως 3  $mmol L^{-1}$  (Sonneveld and Straver, 1994, Savvas et al., 2013), ανάλογα με το είδος του φυτού. Για την παρασκευή των θρεπτικών διαλυμάτων το  $Mg^{2+}$  προστίθεται με τη μορφή επταϋδρικού θειϊκού μαγνησίου και νιτρικού μαγνησίου. Ο Benton Jones (1997) αναφέρει συγκέντρωση  $Mg^{2+}$  στα θρεπτικά διαλύματα γύρω στα 50  $mg L^{-1}$  (ppm). Το μαγνήσιο βρίσκεται και απορροφάται στο θρεπτικό διάλυμα ως  $Mg^{2+}$  και έχει περισσότερο λειτουργικό ρόλο παρά δομικό, όπως π.χ. το  $K^+$ , για αυτό δεν απαιτείται σε τόσο υψηλές συγκεντρώσεις (Guo et al., 2016). Το μαγνήσιο απορροφάται ενεργά και κάτω από συνθήκες χαμηλών εξωτερικών συγκεντρώσεων αλλά η ταχύτητα απορρόφησης είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτή του  $K^+$  ενώ όσο αφορά την κινητικότητα του, σε αντίθεση με το  $Ca^{2+}$  που στο φλοιώμα είναι πολύ δυσκίνητο, το  $Mg^{2+}$  είναι πολύ ευκίνητο (Shewmaker et al., 2008). Κατά μέσο όρο, οι απαιτήσεις του φυτού σε  $Mg^{2+}$  για άριστη ανάπτυξη είναι 0,5% της ξηρής ουσίας του φυτού ενώ το εύρος της περιεκτικότητας σε  $Mg^{2+}$  κυμαίνεται 0,15-1% του ξηρού βάρους. Στην υδροπονία ένα μικρό ποσοστό της παρεχόμενης ποσότητας (10%) μπορεί να καταστεί μη διαθέσιμο καθώς το pH του θρεπτικού διαλύματος αυξάνεται από 5 έως 7 (Σάββας, 2012).

#### **2.1.6. Θειϊκά**

Το θείο (S) είναι βασικό συστατικό των αμινοξέων κυστεΐνης, κυστίνης και μεθειονίνης καθώς και άλλων βιολογικά δραστικών συστατικών, όπως συνενζύμων και προσθετικών ομάδων (Hoefgen and Hesse, 2007). Το θείο προσλαμβάνεται από τις ρίζες των φυτών σε μορφή θειικού ιόντος ( $SO_4^{2-}$ ) και προστίθεται στο διάλυμα ως θειικό κάλιο και θειικό μαγνήσιο. Η πρόσληψη  $SO_4^{2-}$  από τις ρίζες γίνεται μέσω μηχανισμών ενεργού μεταφοράς ενώ μπορεί να αποθηκεύονται στα χυμοτόπια της ρίζας, να γίνεται αναγωγή ή να

φορτώνονται στο ξύλωμα για μεταφορά στο υπέργειο μέρος. Η πρόσληψη  $\text{SO}_4^{2-}$  δεν φαίνεται να παρεμποδίζεται σημαντικά από τα υπόλοιπα μακροανιόντα ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ). Η περιεκτικότητα του θείου (S) στους φυτικούς ιστούς ανέρχεται μεταξύ 0,2-0,5% του ξηρού βάρους του φυτού (Haneklaus et al., 2007). Στις υδροπονικές καλλιέργειες, οι επιθυμητές συγκεντρώσεις θείου στα θρεπτικά διαλύματα κυμαίνονται μεταξύ 1 και 2,5  $\text{mmol L}^{-1}$  (De Krijg et al., 1999). Ο Benton Jones (1997) αναφέρει συγκέντρωση S στα θρεπτικά διαλύματα γύρω στα 50  $\text{mg L}^{-1}$  (ppm). Πολλές φορές τα αρδευτικά νερά περιέχουν σημαντικές ποσότητες  $\text{SO}_4^{2-}$  που μπορούν να καλύψουν ένα μέρος των απαιτήσεων της καλλιέργειας, ενώ ορισμένες φορές μπορεί και να τις υπερβαίνουν. Η μέχρι ενός αρκετά υψηλού ορίου συσσώρευση θεικών στην περιοχή της ρίζας δεν φαίνεται να προκαλεί ειδική τοξικότητα. Για αυτό τα ιόντα  $\text{SO}_4^{2-}$  μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλείο για αύξηση της αλατότητας στο διάλυμα τροφοδοσίας για σκοπούς π.χ. βελτίωσης της ποιότητας των καρπών (Sonneveld, 2002). Όπως και στην περίπτωση των νιτρικών ( $\text{NO}_3^-$ ), η αξιοποίηση των θεικών στο μεταβολισμό των φυτών προϋποθέτει απαραίτητα την αναγωγή τους για την ενσωμάτωση του θείου στα αμινοξέα τις πρωτεΐνες και τα συνένζυμα (Hawkesford, 2007). Οι θεικές ρίζες μπορεί να σχηματίζουν σύμπλοκα στα θρεπτικά διαλύματα όπως π.χ. με το ασβέστιο και να καταβυθίζονται αλλά το φαινόμενο αυτό στις συνηθισμένες συγκεντρώσεις αυτών των ιόντων είναι περιορισμένο και δεν έχει ιδιαίτερη πρακτική σημασία για τη θρέψη των φυτών (Σάββας, 2012).

### **2.1.7. Ιχνοστοιχεία**

Οι συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων στους φυτικούς ιστούς είναι πολύ χαμηλότερες από αυτές των μακροστοιχείων και επομένως αντίστοιχα χαμηλότερες είναι οι συγκεντρώσεις τους στα θρεπτικά διαλύματα (π.χ. μοριακή αναλογία απορρόφησης  $\text{S/Fe} \approx 100$  και  $\text{N/Mo} \approx 10^6$ , Sonneveld, 2002). Τα φυτά απορροφούν κατά κανόνα τα

μεταλλικά ιχνοστοιχεία σίδηρο ( $\text{Fe}^{2+}$ ), μαγγάνιο ( $\text{Mn}^{2+}$ ), ψευδάργυρο ( $\text{Zn}^{2+}$ ), και χαλκό ( $\text{Cu}^{2+}$ ) σε μορφές δισθενών κατιόντων και τα επίπεδα επάρκειας στα περισσότερα φυτά κυμαίνονται μεταξύ 50-250, 20-300, 20-100 και 5-20  $\mu\text{g}$  ανά  $\text{g}$  ξηρού βάρους, αντίστοιχα (Fageria et al., 2002). Τα στοιχεία αυτά συνήθως συνδέονται με τις οξειδο-αναγωγικές αντιδράσεις και την ενζυμική δραστηριότητα των φυτών. Στην περίπτωση των μεταλλικών ιχνοστοιχείων, η διαθεσιμότητα τους στα θρεπτικά διαλύματα, εκτός από την αρχική τους συγκέντρωση, επηρεάζεται σημαντικά και από το pH του θρεπτικού διαλύματος. Σε  $\text{pH}>7$  μειώνεται σημαντικά η διαθεσιμότητα τους σε αντίθεση με τα μεταλλικά μακροστοιχεία (π.χ.  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), των οποίων η διαθεσιμότητα δεν επηρεάζεται από το pH (Fageria et al., 2002, Σάββας, 2012). Η μείωση της διαθεσιμότητας του σιδήρου στα θρεπτικά διαλύματα επιλύεται με τη χρήση συνθετικών χηλικών ενώσεων σιδήρου (Schmidt, 1999). Τα υπόλοιπα ιχνοστοιχεία προστίθενται με τις θεικές τους μορφές (Sonneveld and Voogt, 2009). Οι συγκεντρώσεις των μεταλλικών ιχνοστοιχείων στα θρεπτικά διαλύματα κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 10-40  $\mu\text{mol L}^{-1}$  για το Fe, 5-10  $\mu\text{mol L}^{-1}$  για το Mn, 3-5  $\mu\text{mol L}^{-1}$  για τον Zn και 0,5-1  $\mu\text{mol L}^{-1}$  για το Cu (Σάββας, 2012). Το βόριο (B) απορροφάται από τα θρεπτικά διαλύματα ως βορικό οξύ ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) και προστίθεται σε αυτά ως βορικό οξύ ή τέτρα- ή όκτα-βορικό νάτριο. Το στοιχείο αυτό συνδέεται με το μεταβολισμό των νουκλεϊκών οξέων και των κυτταρικών τοιχωμάτων. Τα όρια της συγκέντρωσης του βορίου στα θρεπτικά διαλύματα είναι μεταξύ 20-40  $\mu\text{mol L}^{-1}$ . Είναι εύκολο στην περίπτωση του βορίου το θρεπτικό διάλυμα από την ανεπάρκεια να μεταβεί στην τοξικότητα καθώς η άριστη συγκέντρωση (10-50  $\mu\text{g}$  ανά  $\text{g}$  ξηρού βάρους) πλησιάζει πάρα πολύ τα τοξικά επίπεδα (50-200  $\mu\text{g}$  ανά  $\text{g}$  ξηρού βάρους). Το μολυβδαίνιο (Mo) είναι συστατικό στοιχείο της νιτρικής ρεδουκτάσης. Απορροφάται από τα θρεπτικά διαλύματα ως  $\text{MoO}_4^{2-}$  και προστίθεται ως μολυβδαινικό νάτριο ή αμμώνιο. Σχεδόν για όλα τα φυτά η συνιστώμενη συγκέντρωση μολυβδαινίου στα θρεπτικά διαλύματα ανέρχεται στα 0,5  $\mu\text{mol L}^{-1}$  και η συγκέντρωση στους

φυτικών ιστούς από 0,35-1,5 μg ανά g ξηρού βάρους. Στις εκτός εδάφους καλλιέργειες, προβλήματα τροφοπενιών μπορούν να προκαλέσουν κυρίως οι Fe, Mn, Zn, Cu και το B ενώ εύκολα οι Mn, Zn, και B μπορεί να προκαλέσουν τοξικότητα αν οι συγκεντρώσεις τους υπερβαίνουν το συνιστώμενο για το καθένα εύρος τιμών. Το χλώριο (Cl<sup>-</sup>) περιέχεται σε επαρκείς ποσότητες στο αρδευτικό νερό ή άλλες χρησιμοποιούμενες χημικές ενώσεις (π.χ. ως πρόσμιξη σε λιπάσματα) και δεν είναι αναγκαία η προσθήκη του στα θρεπτικά διαλύματα (Sonneveld, 2002). Μολονότι το Cl<sup>-</sup> θεωρείται ιχνοστοιχείο, οι συγκεντρώσεις του στους φυτικούς ιστούς, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 2-20 mg ανά g ξηρού βάρους, ομοιάζουν με αυτές των μακροστοιχείων (Fageria et al., 2002). Η κινητικότητα των μικροστοιχείων μέσα στο φυτό είναι περιορισμένη (με εξαίρεση το Mo), με συνέπεια τα συμπτώματα έλλειψης τους τα εμφανίζονται στα νεαρότερα φύλλα, ενώ ειδικά αυτά του βορίου εμφανίζονται στις κορυφές αύξησης (Θερίος, 1996).

## **2.2. Απορρόφηση και μεταφορά νερού και θρεπτικών ιόντων στο φυτό**

Η απορρόφηση του νερού και των ιόντων γίνεται από τη ρίζα για να μεταφερθούν ακολούθως κατακόρυφα στο βλαστό και τα φύλλα (Clemens et al., 2002). Νερό και ιόντα εισέρχονται στη ρίζα ακολουθώντας έναν συνδυασμό διαδρομών μέσω του αποπλάστη (μεσοκυττάριοι χώροι και κυτταρικά τοιχώματα), των μεμβρανών (πλασματική μεμβράνη στην είσοδο και έξοδο του κυττάρου) και συμπλάστη (σύνολο των πρωτοπλαστών που αλληλοσυνδέονται με τις πλασμοδέσμες). Στην ενδοδερμίδα η διαδρομή του νερού και των διαλυμένων ουσιών μπλοκάρεται από τις ταινίες του Caspary (Casparyan strip/ σουβερίνη) με αποτέλεσμα να πρέπει να ακολουθήσουν την κυτταρική διαδρομή (μέσω μεμβρανών και συμπλάστη). Μετά την ενδοδερμίδα, νερό και ανόργανα ιόντα καταλήγουν στον κεντρικό κύλινδρο για να μεταφερθούν στα ξυλώδη αγγεία και από εκεί στο υπέργειο μέρος του φυτού (Clemens et al., 2002). Κινητήριο δύναμη για την μεταφορά αυτή είναι η εξάτμιση του

νερού από τα φύλλα (διαπνοή) η οποία δημιουργεί μια αναρροφητική δύναμη (πτώση υδατικού δυναμικού στα αγγεία) από τα αγγεία των φύλλων στα αγγεία του βλαστού και στα αγγεία της ρίζας (ρεύμα διαπνοής) με αποτέλεσμα να τροφοδοτείται το φυτό με νερό και ανόργανα ιόντα. Σε συνθήκες πολύ χαμηλών ρυθμών διαπνοής (πολύ υψηλή ατμοσφαιρική υγρασία), στην ανοδική κίνηση των ιόντων και του νερού μέσω των αγγείων του ξύλου μπορεί να συμμετέχει και η ριζική πίεση. Η ριζική πίεση προκαλείται από την πτώση του υδατικού δυναμικού στα αγγεία του ξύλου στη ρίζα, λόγω της ενεργητικής απέκκρισης ανόργανων ιόντων σε συνδυασμό με την μη απομάκρυνση τους όταν οι ρυθμοί διαπνοής είναι από εξαιρετικά χαμηλοί έως μηδενικοί. Το αποτέλεσμα αυτής της κατάστασης είναι η ανάπτυξη διαφοράς ωσμωτικού δυναμικού μεταξύ του νερού των αγγείων του ξύλου και του εξωτερικού διαλύματος το οποίο προκαλεί είσοδο νερού στα αγγεία του ξύλου. Το εισερχόμενο νερό ωθεί προς τα επάνω το νερό και τα θρεπτικά στοιχεία που υπάρχουν ήδη στα αγγεία του ξύλου, με συνέπεια την μεταφορά τους σε όλους τους υπέργειους φυτικούς ιστούς ομοιόμορφα. Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ της μεταφοράς θρεπτικών στοιχείων μέσω του ρεύματος διαπνοής και μέσω της ριζικής πίεσης είναι ότι στην δεύτερη περίπτωση τα θρεπτικά στοιχεία μεταφέρονται ομοιόμορφα σε όλους τους υπέργειους φυτικούς ιστούς (δηλαδή και στους καρπούς και τις κορυφές αύξησης και όχι κυρίως στα φύλλα που διαπνέουν). Η περιοχή της ρίζας που είναι πιο αποδοτική ως σημείο εισόδου νερού και ανόργανων ιόντων είναι η κορυφή της καθώς και οι κορυφές των πλαγίων ριζών και τα ριζικά τριχίδια (Gassmann and Schroeder, 1994). Όπως ελέγχθη νωρίτερα, τα ανόργανα ιόντα, για να καταλήξουν στον αγγειώδη κύλινδρο της ρίζας θα πρέπει να εισέλθουν σε κάποιο στάδιο της διαδρομής τους στα κύτταρα μέσω της πλασματικής μεμβράνης λόγω της ταινίας του Caspary. Η πλασματική μεμβράνη εξασφαλίζει την επιλεκτική μεταφορά ιόντων εσωτερικά και εξωτερικά του κυττάρου χάρη στη λειτουργία ενεργών συστημάτων μεταφοράς τους. Το ίδιο ισχύει και για την μεταφορά ιόντων από το κυτόπλασμα στο

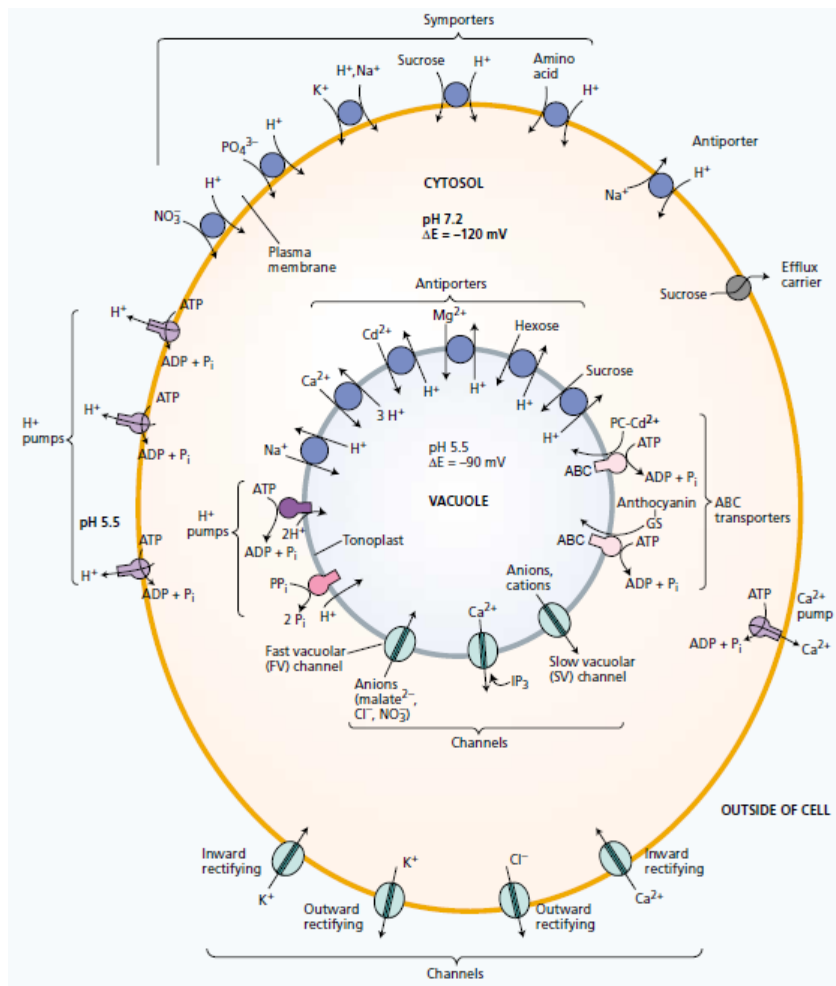
χυμοτόπιο, η οποία πραγματοποιείται μέσω του τονοπλάστη. Γενικά, η κίνηση των ιόντων διαμέσου μιας μεμβράνης είναι αποτέλεσμα διαβαθμίσεων τόσο της συγκέντρωσης όσο και του ηλεκτρικού δυναμικού (διαφορά ηλεκτρικής φόρτισης εκατέρωθεν της μεμβράνης λόγω μεταφοράς φορτισμένης ουσίας, Chrispeels et al., 1999). Η απορρόφηση των ιόντων και η μεταφορά τους στο κυτόπλασμα διακρίνεται σε ενεργητική και παθητική. Η παθητική απορρόφηση (διάχυση) προϋποθέτει τη μεταφορά ιόντων από τη μεγαλύτερη προς τη μικρότερη συγκέντρωση και μπορεί να συμβεί αυθόρμητα (νόμος του Fick). Αντίθετα, στην ενεργητική μεταφορά, το ιόν οδεύει αντίθετα με τη διαβάθμιση της συγκέντρωσης του μέσω μεταφορέων ιόντων οι οποίοι για να λειτουργήσουν απαιτούν την κατανάλωση μεταβολικής ενέργειας, παρεχόμενης κατά κύριο λόγο με τη μορφή ATP. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση Nerst μπορεί να λεχθεί κατά πόσο ένα ιόν μεταφέρεται ενεργητικά ή παθητικά (Γκανή-Σπυροπούλου, 2003).

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

όπου  $\Delta\mu$  είναι η διαφορά του ηλεκτροχημικού δυναμικού εκατέρωθεν της μεμβράνης,  $RT\ln C$  ( $R$  σταθερά αερίων,  $T$  απόλυτη θερμοκρασία,  $C$  συγκέντρωση ιόντος) εκφράζει το χημικό δυναμικό και  $zF\psi$  ( $z$  σθένος του ιόντος,  $F$  σταθερά Faraday,  $\psi$  ηλεκτρικό δυναμικό) το ηλεκτρικό δυναμικό του ιόντος. Εάν το  $\Delta\mu$  είναι θετικό, τότε η μεταφορά είναι ενεργητική, ενώ για τιμές  $\Delta\mu$  μικρότερες ή ίσες του μηδενός είναι παθητική. Σε κατάσταση ισορροπίας η διαφορά στη συγκέντρωση ενός ιόντος εξισορροπείται από τη διαφορά τάσεως εκατέρωθεν της μεμβράνης (Taiz and Zeiger, 2002). Το  $K^+$  κατά κανόνα μεταφέρεται ενεργητικά στο εσωτερικό του κυττάρου και του χυμοτόπιου δεδομένου ότι οι εξωτερικές συγκεντρώσεις του είναι πιο χαμηλές από αυτές που υφίστανται στο κυτόπλασμα και αυτές του κυτοπλάσματος πιο χαμηλές από αυτές που επικρατούν στο χυμοτόπιο. Αντίθετα, το  $Ca^{2+}$  μεταφέρεται ενεργητικά εκτός του κυττάρου ή στο χυμοτόπιο όπως και το  $Na^+$  γιατί οι συγκεντρώσεις τους στο κυτόπλασμα πρέπει να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα (Shi et al., 2002). Επίσης



όλα τα ανιόντα μπορούν να μεταφέρονται ενεργητικά στο κυτόπλασμα ενώ η περίσσεια πρωτονίων ( $H^+$ ) από τον ενδιάμεσο μεταβολισμό αποβάλλεται από το κυτόπλασμα για να διατηρηθεί η ηλεκτρική ουδετερότητα ανταλλάσόμενο κυρίως με  $K^+$  (Taiz and Zeiger, 2002, Τσέκος, 2004). Όταν λαμβάνεται υπόψη ειδικότερα η συμβολή των ιόντων  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$  στην ανάπτυξη δυναμικού διαμέσου της μεμβράνης τότε η εξίσωση Goldman συσχετίζει τις διαβαθμίσεις ιόντων με το μεμβρανικό δυναμικό που αναπτύσσεται (Taiz and Zeiger, 2002).



**Εικόνα 2.1.** Διαδικασίες μεταφοράς διαμέσου της πλασματικής μεμβράνης και του τονοπλάστη των φυτικών κυττάρων (πηγή: Taiz and Zeiger, 2002).

Για τη μεταφορά των ιόντων διαμέσου των μεμβρανών υπάρχουν ειδικές εξειδικευμένες πρωτεΐνες (η διαπερατότητα εξαρτάται από τη σύσταση της μεμβράνης και τη

χημική φύση του ιόντος) ενσωματωμένες στη μεμβράνη οι οποίες δίνουν το χαρακτηριστικό της εκλεκτικής διαπερατότητας (Gouaux and MacKinnon, 2005). Οι μεμβρανικές πρωτεΐνες μπορεί να είναι ΑΤΡάσες, πρωτεΐνες – κανάλια και πρωτεΐνες – μεταφορείς. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ενέργεια που απαιτείται για την ενεργό μεταφορά (σε κατεύθυνση αντίθετη από τη διαβάθμιση του ηλεκτροχημικού δυναμικού) συχνά προέρχεται από την υδρόλυση του ΑΤΡ από τις ΑΤΡάσες οι οποίες λειτουργούν ως αντλίες πρωτονίων ( $H^+$ -ΑΤΡάση) δημιουργώντας διαβάθμιση ηλεκτρικού δυναμικού εκατέρωθεν της μεμβράνης που είναι η κινητήριος δύναμη για την είσοδο των κατιόντων. Εκτός όμως από τη διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού δημιουργείται και διαφορά χημικού δυναμικού (διαβάθμιση pH) δεδομένου ότι η είσοδος των αναγκαίων κατιόντων στον πρωτοπλάστη, ενώ συνδυάζεται κυρίως με την είσοδο ανιόντων μπορεί εν μέρει να συνδυάζεται και με την έξοδο πρωτονίων, ώστε να διατηρείται η ισορροπία ηλεκτρικού δυναμικού. Το ίδιο συμβαίνει και με την είσοδο ανιόντων, η οποία εν μέρει μπορεί να συνδυάζεται με την έξοδο  $OH^-$  ή  $HCO_3^-$  (Σάβας, 2012). Επίσης, υπάρχουν  $H^+$ -ΑΤΡάσες και στις άλλες ενδομεμβράνες (η  $H^+$ -ΑΤΡάση του τονοπλάστη παρέχει τη κινητήρια δύναμη για τη συσσώρευση διαλυμένων ουσιών στα χυμοτόπια) όπως και  $Ca^{2+}$ -ΑΤΡάσες για τη μεταφορά των ιόντων ασβεστίου στον αποπλάστη. Επίσης οι διαμεμβρανικές μεταφορικές πρωτεΐνες (κανάλια, φορείς, αντλίες) διευκολύνουν την είσοδο των ιόντων και του νερού (Chrispeels et al., 1999). Η μεταφορά μέσω καναλιών είναι παθητική και γίνεται προς την κατεύθυνση διαβάθμισης του δυναμικού της μεμβράνης. Επίσης σε αυτή την περίπτωση, δεν υπάρχει εκλεκτική πρόσδεση του ιόντος και η ρύθμιση της μεταφοράς γίνεται με το άνοιγμα ή κλείσιμο της εσωτερική κοιλότητας του πόρου. Επειδή οι κυτταρικές μεμβράνες απαρτίζονται κατά κύριο λόγο από μία διπλή στρώση λιπιδίων με συνέπεια να είναι υδρόφοβες, η είσοδος του νερού διευκολύνεται από διαμεμβρανικές πρωτεΐνες - υδατικά κανάλια, τα οποία ονομάζονται υδατοπορίνες (aquaporins, Chrispeels et al., 1999, Silber and Bar-Tal, 2008). Αντίθετα, οι πρωτεΐνες-

φορείς δεσμεύουν την ουσία κατά τη μεταφορά (συζευγμένη μεταφορά) η οποία μπορεί να γίνεται προς (παθητικά, διευκολυμένης διάχυση) ή αντίθετα (ενεργητικά) με τη διαβάθμιση της συγκέντρωσης της ουσίας. Εντούτοις, η ενέργεια δεν προέρχεται από την υδρόλυση του ATP αλλά από τη διαβάθμιση του ηλεκτροχημικού δυναμικού (κινητήρια δύναμη πρωτονίων- διαβάθμιση του  $H^+$ ). Έτσι η κίνηση πρωτονίων προς το εσωτερικό του κυττάρου μπορεί να συμεταφέρει π.χ. το  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $H_2PO_4^-$  ή να αντιμεταφέρει, π.χ.  $Ca^{2+}$  (Taiz and Zeiger, 2002). Γενικά υπάρχει εξειδίκευση φορέα-ιόντος, μπορεί όμως κατιόντα ή ανιόντα όμοια χημικώς να ανταγωνίζονται το ένα το άλλο όσο αφορά τα σημεία πρόσδεσης τους πάνω στο φορέα. Για παράδειγμα τα  $Ca^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  ανταγωνίζονται αποτελεσματικά το  $Mg^{2+}$ , όπως επίσης ανταγωνισμός παρατηρείται μεταξύ  $NO_3^-$  και  $Cl^-$  (Μαυρογιαννόπουλος, 2006). Επίσης, όπως έχει αναφερθεί, ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς ενός θρεπτικού στοιχείου στα υπόλοιπα όργανα μέσα στο φυτό είναι ορατά και τα συμπτώματα της έλλειψης του. Για παράδειγμα, φώσφορος, κάλιο και μαγνήσιο (P, K, Mg) μεταφέρονται μέσα από το φλοιώμα για αυτό τα συμπτώματα της έλλειψης εμφανίζονται στα γηραιότερα φύλλα ενώ θείο, και ασβέστιο (S, Ca) μεταφέρονται δια μέσω του ξυλώματος και για αυτό τα συμπτώματα της έλλειψης εμφανίζονται πρώτα στα νεαρότερα φύλλα (Γκανή-Σπυροπούλου, 2003).

Σχετικά με την κινητική των μηχανισμών πρόσληψης, στην απλή διάχυση η ταχύτητα μεταφοράς στο εσωτερικό είναι ανάλογη της εξωτερικής συγκέντρωσης της ουσίας. Στη μεταφορά μέσω φορέων σύμφωνα με τον Epstein υπάρχει ένα δυαδικό σύστημα απορρόφησης σε συνάρτηση με την εξωτερική συγκέντρωση των ιόντων. Το πρώτο σύστημα (μηχανισμός I) λειτουργεί σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις και είναι περισσότερο εξειδικευμένο ενώ το δεύτερο (μηχανισμός II) λειτουργεί σε υψηλότερες συγκεντρώσεις και είναι λιγότερο εξειδικευμένο (Chrispeels et al., 1999). Άλλοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων εκτός από τη συγκέντρωσή τους στο εξωτερικό διάλυμα (Sonneveld and Voogt, 2009) είναι η ηλιακή ακτινοβολία (άμεσα

συνυφασμένη με την πρόσληψη νερού και θρεπτικών στοιχείων αλλά και την διαθεσιμότητα χημικής ενέργειας στο φυτό προερχόμενης από τα προϊόντα της αφομοίωσης), το pH (επηρεάζει τις ιονικές μορφές των θρεπτικών στοιχείων αλλά και φαινόμενα ανταγωνισμού), η θερμοκρασία του διαλύματος (π.χ. επηρεάζεται περισσότερο η απορρόφηση του P), η επίδραση άλλων ιόντων συνεργιστικά ή ανταγωνιστικά (π.χ. το  $\text{Ca}^{2+}$  είναι σημαντικό για τη διατήρηση του μηχανισμού της απορρόφησης αλλά και μπορεί να δράσει ανταγωνιστικά στην απορρόφηση άλλων κατιόντων, White, 1998, White and Broadley, 2003, Bouranis et al., 2014).

Τα τελευταία χρόνια, έρευνες στη μοριακή ρύθμιση της θρέψης έχουν αναδείξει πολλαπλά γονίδια που κωδικοποιούν το σύστημα μεταφορέων των ιόντων σε διαφορετικές μεμβράνες. Τα νέα αυτά δεδομένα έχουν ανοίξει νέους δρόμους στη ρύθμιση της θρέψης των φυτών (Gassmann and Schroeder, 1994, Chrispeels et al., 1999, Shi et al., 2002, Chen et al., 2007, Shabala et al., 2016). Εντούτοις, η μοριακή ρύθμιση της θρέψης ειδικότερα σε συνθήκες αλατότητας έχει δώσει περιορισμένα επιτυχή αποτελέσματα μέχρι σήμερα λόγω της πολυπλοκότητας των βιολογικών φαινομένων (Flowers, 2004, Flowers et al., 2015, Shabala et al., 2016).

### **2.3. Αφομοίωση θρεπτικών ιόντων από το φυτό**

Η ενσωμάτωση των ανόργανων θρεπτικών στοιχείων στην οργανική ύλη ορίζεται ως αφομοίωση θρεπτικών στοιχείων. Η διαδικασία μπορεί να εμπλέκει ενεργοβόρες βιοχημικές διαδικασίες όπως στην περίπτωση της αναγωγής των νιτρικών ( $\text{NO}_3^-$ ) και θεικών ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) ιόντων αλλά και τη δημιουργία συμπλόκων με οργανικές χημικές ενώσεις όπως στην περίπτωση των θρεπτικών μεταλλικών στοιχείων. Όταν οι ρίζες των φυτών απορροφούν  $\text{NO}_3^-$  ιόντα, το ένζυμο νιτρική ρεδοκτάση στο κυτόπλασμα ανάγει τα νιτρικά ιόντα σε νιτρώδη ( $\text{NO}_2^-$ ) χρησιμοποιώντας ένα δότη ηλεκτρονίων και κατόπιν το ένζυμο νιτρώδης

ρεδουκτάση ανάγει τα νιτρώδη ( $\text{NO}_2^-$ ) σε αμμωνιακά ( $\text{NH}_4^+$ ) στα πλαστίδια της ρίζας ή στους χλωροπλάστες των φύλλων (Campbell, 1999, Bouranis et al., 2004). Ακολούθως τα αμμωνιακά αφομοιώνονται στο κετογλουταρικό οξύ οδηγώντας στο σχηματισμό γλουταμινικού οξέως και γλουταμίνης και μέσω αυτών στην βιοσύνθεση και άλλων αμινοξέων μέσω αντιδράσεων τρανσαμίνωσης (Τσέκος, 2004). Το θειικό ιόν ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) είναι η κύρια μορφή πρόσληψης του θείου από τα φυτά διαμέσου της διαβάθμισης του ηλεκτροχημικού δυναμικού στην πλασματική μεμβράνη. Όπως και στο νιτρικό ιόν, το πρώτο βήμα ενσωμάτωσης του στα οργανικά συστατικά του κυττάρου είναι η αναγωγή του προς το αμινοξύ κυστεΐνη στις ρίζες (πλαστίδια) ή τα φύλλα (χλωροπλάστες). Μετά τη σύνθεση της κυστεΐνης και μεθειονίνης, το θείο μπορεί να ενσωματωθεί στις πρωτεΐνες και ορισμένες άλλες θειούχες χημικές ενώσεις (γλουταθειόνη). Τα φωσφορικά ιόντα ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) προσλαμβάνονται από τις ρίζες για να αφομοιωθούν κατά τη διάρκεια του σχηματισμού του ATP (φωσφορικοί δεσμοί) αλλά και για να σχηματισθούν και διάφορα φωσφορυλιωμένα συστατικά (π.χ. η φωσφορυλίωση στη μοριακή δομή των σακχάρων καθιστά τα τελευταία πιο ενεργά). Τα υπόλοιπα θρεπτικά στοιχεία (π.χ. K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn) συνδέονται με σταθερούς δεσμούς σε διάφορα οργανικά συστατικά των φυτών (Taiz and Zeiger, 2002). Έτσι η σύνδεση του  $\text{Ca}^{2+}$  στο κυτταρικό τοίχωμα θεωρείται ότι γίνεται κυρίως με δεσμό ανάμεσα στο ασβέστιο και τα οξυγόνα των υδροξυλίων στις καρβοξυλικές ομάδες ( $\text{R-COO}^-$ ) για να σχηματίσουν το σύμπλοκο πηκτινικό ασβέστιο. Επίσης το  $\text{Mg}^{2+}$  συνδέεται με τα άτομα αζώτου στο μόριο της χλωροφύλλης (όπως και ο Fe στο δακτύλιο της πορφυρίνης) και το  $\text{K}^+$  μπορεί να σχηματίσει δεσμούς με τις καρβοξυλικές ομάδες πολλών οργανικών οξέων (π.χ. μηλικό κάλιο) και να εισέλθει στην οργανική ύλη (Papadopoulos and Hao, 2002). Γενικά η αφομοίωση των ανόργανων θρεπτικών στοιχείων σε οργανικές ενώσεις είναι μια ενεργοβόρος διαδικασία για τα φυτά και γι' αυτό γίνεται στο στρώμα των χλωροπλάστων

όπου υπάρχει η ανάλογη αναγωγική δύναμη (π.χ. NADPH) η οποία δημιουργείται κατά τη φωτοσυνθετική ροή των ηλεκτρονίων (Papadopoulos and Hao, 2002).

#### 2.4. Σχέσεις μεταξύ των θρεπτικών στοιχείων

Εκτός από τις συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων, οι αναλογίες μεταξύ τους (βάση μονάδων μάζας mol/mol ή χημικών ισοδυνάμων eq/eq) είναι εξίσου σημαντικές στα θρεπτικά διαλύματα. Η αξία του καθορισμού άριστων αναλογιών μεταξύ των θρεπτικών στοιχείων έγκειται στο ότι αυτές μπορούν να διατηρούνται σταθερές ανεξάρτητα από την ολική συγκέντρωση αλάτων (Sonneveld and Voogt, 1985). Οι αναλογίες θρεπτικών στοιχείων που έχει διαπιστωθεί ότι επηρεάζουν τις αποδόσεις των φυτών που καλλιεργούνται εκτός εδάφους είναι κυρίως οι σχέσεις K:Ca:Mg, K:Ca, K:N και  $\text{NH}_4/(\text{NH}_4+\text{NO}_3)$ , καθώς και η αναλογία των μακροανιόντων  $\text{NO}_3:\text{SO}_4$  (Σάββας, 2012, Neocleous and Savvas, 2013). Ο P ενδιαφέρει κυρίως ως προς το ύψος της συγκέντρωσης στο θρεπτικό διάλυμα του ώστε να μην δημιουργούνται φωσφορικές αδιάλυτες ενώσεις. Οι αναλογίες που εφαρμόζονται στις καλλιέργειες εκτός εδάφους αποσκοπούν στην επίτευξη επιθυμητών τιμών στο περιβάλλον των ριζών (Sonneveld, 2002, Σάββας, 2012). Για παράδειγμα, στην τομάτα για να επιτευχθούν στη ρίζα οι αναλογίες σε mol/mol  $\text{N}:\text{K} \approx 2$ ,  $\text{K}:\text{Ca} \approx 1$  και  $\text{Ca}:\text{Mg} \approx 2,2$ , επιδιώκεται στο διάλυμα τροφοδοσίας η σχέση τους (mol/mol) να είναι  $\text{N}:\text{K} \approx 1,5$ ,  $\text{K}:\text{Ca} \approx 1,6$  και  $\text{Ca}:\text{Mg} \approx 3,5$ , αντίστοιχα. Στην περίπτωση του αγγουριού οι πιο πάνω αναλογίες είναι  $\text{N}:\text{K} \approx 2,25$ ,  $\text{K}:\text{Ca} \approx 1,6$ ,  $\text{K}:\text{Mg} \approx 5,5$ ,  $\text{Ca}:\text{Mg} \approx 3,5$ ,  $\text{N}:\text{S} \approx 10-15$  (Μαυρογιαννόπουλος, 2006).

Το άζωτο απορροφάται από τα φυτά σχεδόν αποκλειστικά σε μορφή νιτρικών και αμμωνιακών ιόντων. Το ποιο από τα δύο προσφέρεται στο φυτό και γενικά η ισορροπία απορρόφησης μεταξύ κατιόντων-ανιόντων επηρεάζει το pH του εξωτερικού διαλύματος. Υπερβολική απορρόφηση ανιόντων (π.χ.  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) αυξάνει το pH του εξωτερικού

διαλύματος γιατί εξισορροπείται ηλεκτροχημικά από τα κύτταρα με αποβολή  $\text{OH}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , ενώ υπερβολική απορρόφηση κατιόντων (π.χ.  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) το μειώνει λόγω απέκκρισης ιόντων  $\text{H}^+$  με στόχο και πάλι την εξισορρόπηση του ηλεκτροχημικού δυναμικού. Το N με τη μορφή νιτρικών ή αμμωνιακών υφίσταται ανταγωνιστικές σχέσεις με Ca, Mg, K, P και S ενώ το K περιορίζει το ρυθμό απορρόφησης των Ca και Mg (Sonneveld and Voogt, 1985, Κουκουλάκης και Παπαδόπουλος, 2003). Το Mg ανταγωνίζεται αποτελεσματικά το Mn ενώ ομοίως ανταγωνιστική είναι η σχέση του Cu με το K και Fe. Επιπρόσθετα πρέπει να αποφεύγεται υψηλή συγκέντρωση P στο διάλυμα σε περίπτωση αύξησης της EC καθώς μπορεί να οδηγήσει σε τοξικότητα ή να δημιουργήσει έλλειψη Ca ή μικροστοιχείων όπως Zn, όπως και η χρήση μεγάλων ποσοτήτων θεικών μπορεί να δημιουργήσει αδιάλυτες ενώσεις Ca στις ρίζες. Επίσης είναι γνωστός ο ανταγωνισμός μεταξύ  $\text{NO}_3^-$  και  $\text{Cl}^-$ , όπου η απορρόφηση  $\text{NO}_3^-$  περιορίζεται από τα  $\text{Cl}^-$  όπως επίσης η σχέση  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ . Τα ιχνοστοιχεία και ειδικότερα τα Fe, Mn, Zn, Cu ανταγωνίζονται τόσο μεταξύ τους όσο και με τα μακροστοιχεία (Adams, 2002).

## 2.5. Αλληλεπιδράσεις αλατότητας - θρεπτικών στοιχείων

Ο όρος αλατότητα αναφέρεται στην ύπαρξη υπερβολικά υψηλών συγκεντρώσεων ιόντων στο περιβάλλον της ρίζας (κατά κανόνα  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$ , Κωνσταντινίδου, 2003). Η αλατότητα μπορεί να δημιουργήσει ανισορροπίες στη θρέψη των φυτών λόγω ανταγωνισμού των ιόντων  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  με θρεπτικά στοιχεία όπως  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{NO}_3^-$  δημιουργώντας π.χ. πάρα πολύ υψηλές αναλογίες  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-$  (Läuchli and Grattan, 2007). Επίσης εκτός από τις τοξικές επιδράσεις των αλάτων η επίδραση στο περιβάλλον της ρίζας είναι ωσμωτική φύσης με αποτέλεσμα την τροποποίηση του μεταβολισμού των φυτών, ώστε να αποφευχθεί η αδυναμία πρόσληψης νερού (Munns, 2002, Silber and Bar-Tal, 2008). Οι Hu and Schmidhalter (2005) αναφέρουν ότι η αλληλεπίδραση της αλατότητας με τα κύρια

θρεπτικά στοιχεία (N, P, K, Ca, Mg και S) σε υδροπονική καλλιέργεια σιταριού δεν ήταν σημαντική όταν οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων βρίσκονταν στα επιθυμητά επίπεδα όπως και σε ορισμένες κηπευτικές καλλιέργειες (Sonneveld and Voogt, 2009). Επίσης, σύμφωνα με τους ίδιους ερευνητές, αρκετές εργασίες έδειξαν ότι σε συνθήκες αλατότητας, αντίθετα με την ολική συγκέντρωση N στο φυτό, η συγκέντρωση των  $\text{NO}_3^-$  μπορεί να μειώνεται από την αυξημένη συγκέντρωση χλωριόντων ( $\text{Cl}^-$ ) και το αντίστροφο. Η ανταγωνιστική σχέση απορρόφησης  $\text{Cl}^-$  και  $\text{NO}_3^-$  ιόντων έχει πολλές φορές αποδειχθεί στη βιβλιογραφία (Silber and Bar-Tal, 2008). Εντούτοις, δεν ισχύει το ίδιο με τα  $\text{Cl}^-$  και  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ενώ ορισμένες ερευνητικές εργασίες με θρεπτικά διαλύματα κατέδειξαν και αύξηση της συγκέντρωσης φωσφόρου στους ιστούς σε συνθήκες υψηλής αλατότητας (Hu and Schmidhalter, 2005, Silber and Bar-Tal, 2008). Επίσης, λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων  $\text{Na}^+$  στο εξωτερικό διάλυμα, συχνά εμφανίζονται δυσχέρειες στην πρόσληψη, μεταφορά και κατανομή του  $\text{K}^+$  και  $\text{Ca}^{2+}$  στο φυτό (Parida and Das, 2005, Sonneveld and Voogt, 2009). Ειδικότερα η σχέση  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  είναι ιδιαίτερα σημαντική τόσο γιατί η αλατότητα μπορεί να προκαλέσει ελλείψεις ασβεστίου στο φυτό όσο και γιατί η αυξημένη συγκέντρωση ασβεστίου μπορεί να ενισχύσει την αντοχή των φυτών στην αλατότητα (Sonneveld and Voogt, 2009). Προφανώς, η επαρκής τροφοδότηση των φυτών με ασβέστιο μέσω του θρεπτικού διαλύματος μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην ελαχιστοποίηση των δυσμενών επιδράσεων της αλατότητας σε μια υδροπονική καλλιέργεια (Ravin and Lieth, 2008). Για το  $\text{Mg}^{2+}$  αναφέρεται ότι αύξηση της συγκέντρωσης του, όταν βρίσκεται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, μπορεί να αυξήσει την αντοχή των φυτών στην αλατότητα ενώ για τα ιχνοστοιχεία αναφέρονται διαφορετικές αποκρίσεις στην αλατότητα ανάλογα με το καλλιεργούμενο είδος και το επίπεδο αλατότητας αν και όχι ιδιαίτερα σημαντικές (Hu and Schmidhalter, 2005). Τέλος, οι Silber and Bar-Tal (2008) αναφέρουν ότι, παρόλο που αρκετές εργασίες έχουν δείξει ότι σε συνθήκες αλατότητας μπορεί να μειωθεί η απορρόφηση των θρεπτικών



στοιχείων, δεν υπάρχουν δεδομένα που να υποστηρίζουν ότι οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων πρέπει να αυξηθούν πέραν των επιθυμητών τιμών σε συνθήκες υψηλής αλατότητας.

## **2.6. Συνολική συγκέντρωση ιόντων (ηλεκτρική αγωγιμότητα, EC) και οξύτητα**

### **Θρεπτικού διαλύματος (pH)**

Η συγκέντρωση διαλυτών αλάτων (αλατότητα/salinity) στο μέσο ανάπτυξης της ρίζας των φυτών προσδιορίζεται έμμεσα με τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (electrical conductivity, EC dS m<sup>-1</sup>) του μέσου. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) δεν μας δίνει καμία πληροφορία για το είδος των αλάτων που βρίσκονται σε ένα διάλυμα, αλλά μόνο για τη συνολική τους συγκέντρωση. Η συνολική συγκέντρωση αλάτων στα θρεπτικά διαλύματα (C, meq L<sup>-1</sup>) μπορεί να υπολογίζεται ως συνάρτηση της EC (dS m<sup>-1</sup>) με τη βοήθεια των σχέσεων  $C = 9,819 \times EC - 1,462$  (Savvas and Adamidis, 1999). Η EC των θρεπτικών διαλυμάτων είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των κύριων θρεπτικών στοιχείων (δηλ. συνολική συγκέντρωση των κατιόντων K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> ή των ανιόντων SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> και Cl<sup>-</sup>) ενώ δεν παρέχει πληροφορίες για τα ιχνοστοιχεία λόγω της πολύ μικρής τους συγκέντρωσης, συγκριτικά με τα μακροστοιχεία. Τιμές EC χαμηλότερες από ένα κατώτερο όριο υποδηλώνουν ότι η περιεκτικότητα του διαλύματος σε ορισμένα τουλάχιστον θρεπτικά στοιχεία είναι ανεπαρκής. Ανάλογα, πολύ υψηλές τιμές EC πάνω από ένα ανώτατο όριο σημαίνουν ότι η συνολική περιεκτικότητα του διαλύματος σε άλατα (θρεπτικών στοιχείων και μη) είναι τόσο μεγάλη, ώστε τα φυτά υφίστανται αλατούχο καταπόνηση. Σύμφωνα με τους Shannon and Grieve (1999) που περιέγραψαν την αντοχή των κηπευτικών καλλιεργειών στην αλατότητα, η αλατούχος καταπόνηση μπορεί να έχει επιδράσεις όπως την μικρότερη ανάπτυξη του φυτού, αλλοιώσεις στο χρωματισμό και αριθμό των φύλλων, των αναπαραγωγικών χαρακτηριστικών και της καρποφορίας, στο ριζικό σύστημα και στο λόγο

ρίζας/βλαστού αλλά σημειώνουν ότι εκτός από το γονότυπο οι περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν την απόκριση των φυτών στην αλατότητα. Γενικά οι ανθοκομικές καλλιέργειες απαιτούν χαμηλότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα από τις λαχανοκομικές καλλιέργειες στο περιβάλλον της ρίζας τους. Για τα περισσότερα καλλιεργούμενα καρποδοτικά λαχανοκομικά φυτά η ηλεκτρική αγωγιμότητα των χορηγούμενων θρεπτικών διαλυμάτων πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 1,5- 2,5 dS m<sup>-1</sup> ενώ στο περιβάλλον των ριζών από 2,5 έως 3,5 dS m<sup>-1</sup>. Για τα πλείστα ανθοκομικά φυτά η αγωγιμότητα στη ρίζα δεν πρέπει να αφήνεται να υπερβεί τα 2,1 dS m<sup>-1</sup>. Πρότυπες τιμές EC για το διάλυμα τροφοδοσίας και ριζοστρώματος δίνονται για πολλά καλλιεργούμενα φυτά στο βιβλίο του Σάββα (2012). Γενικά η EC στη ρίζα τείνει να αυξάνει με την πάροδο του χρόνου σε σχέση με το διάλυμα τροφοδοσίας και αυτό οφείλεται στη συσσώρευση ορισμένων ιόντων (κυρίως δισθενή ιόντα και ιόντα νατρίου). Ο όρος ανώτατο επιτρεπτό όριο αλατότητας ή κατώφλι αλατότητας (salinity threshold value) είναι η ανώτατη τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) στο περιβάλλον της ρίζας η οποία δεν προκαλεί μείωση στην παραγωγική απόδοση της καλλιέργειας ενώ το μέγεθος της μείωσης ανά μονάδα αύξησης της EC ονομάζεται συντελεστής αλατούχου επιβάρυνσης της καλλιέργειας (salinity yield decrease, Shannon and Grieve, 1999, Bar-Yosef, 2008, Sonneveld and Voogt, 2009). Όπως έχει αναφερθεί, η αύξηση της EC στο περιβάλλον της ρίζας μπορεί να οφείλεται σε αυξημένη συγκέντρωση είτε του NaCl είτε των θρεπτικών μακροστοιχείων. Εντούτοις, διάφορες ερευνητικές εργασίες (αναφορές από Σάββα, 2012) έδειξαν ότι, ανάλογα με το καλλιεργούμενο είδος, το ποσοστό μείωσης της παραγωγής λόγω αύξησης της EC μέχρι ένα επίπεδο δεν εξαρτάται από αν είναι το NaCl ή τα θρεπτικά στοιχεία που προκαλούν την αλατότητα. Επίσης, η ανώτατη επιτρεπτή τιμή αλατότητας σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα μπορεί να διαφέρει από την ούτως καλούμενη τιμή-κατώφλι αλατότητας για την καλλιέργεια (Bar-Yosef, 2008). Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι μια βαθμιαία έκθεση των φυτών σε συνθήκες αλατότητας έχει λιγότερο

καταστρεπτικές συνέπειες από ότι μια απότομη αύξηση της συγκέντρωσης των αλάτων, διότι τα φυτά στην πρώτη περίπτωση μπορούν να ρυθμίζουν το ωσμωτικό τους δυναμικό (Savvas et al., 2005a, b).

Εξίσου σημαντικός παράγοντας των θρεπτικών διαλυμάτων είναι η περιεκτικότητα του περιβάλλοντος της ρίζας σε ενεργά ιόντα υδρογόνου (pH), η οποία καθορίζει και την καταλληλότητα του περιβάλλοντος αυτού για την ανάπτυξη και τη λειτουργία της ρίζας. Πολύ χαμηλό pH (όξινο διάλυμα) ή πολύ υψηλό pH (αλκαλικό διάλυμα) μπορεί να προξενήσει καταστροφή των κυτταρικών τοιχωμάτων και καταστροφή των φυτών. Για τα περισσότερα καλλιεργούμενα φυτά η τιμή του pH του διαλύματος ριζοστρώματος που ευνοεί περισσότερο την ανάπτυξη και τη παραγωγή τους κυμαίνεται μεταξύ 5,5 και 6,5. Πολλά θρεπτικά στοιχεία, όπως P, Fe, Mn, Zn και Cu καθίστανται δυσδιάλυτα σε υψηλό pH και δεν είναι δυνατό να απορροφηθούν από τα φυτά. Στην πράξη το pH στο περιβάλλον των ριζών τείνει να αυξάνει ως αποτέλεσμα της άνισης απορρόφησης ανιόντων και κατιόντων σε σχέση με το pH στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας (Bar-Yosef, 2008, Sonneveld and Voogt, 2009, Σάββας, 2012).

## **2.7. Αναλογίες απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων προς νερό - «Συγκεντρώσεις απορρόφησης»**

Η ημερήσια πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων ανά φυτό επηρεάζεται σημαντικά από τις συνθήκες ανάπτυξης και ειδικότερα από τις κλιματικές συνθήκες και αυτό είναι απόλυτα λογικό δεδομένου ότι η ακτινοβολία συσχετίζεται στενά με την πρόσληψη των θρεπτικών στοιχείων (Sonneveld, 2002). Επίσης παρόμοια πορεία με την πρόσληψη των θρεπτικών στοιχείων ακολουθούν και οι υδατικές ανάγκες των φυτών λόγω διαπνοής, τα οποία και είναι μεγέθη ανάλογα της ανάπτυξης του φυτού, σύμφωνα με τον ίδιο συγγραφέα. Αυτό πηγάζει από το γεγονός ότι οι μηχανισμοί που καθορίζουν τις ανάγκες του φυτού σε θρεπτικά

στοιχεία και νερό και ειδικότερα η φωτοσύνθεση και η διαπνοή αντίστοιχα, αν και φυσιολογικά ανεξάρτητοι μηχανισμοί μοιράζονται την ίδια μεταφορική οδό, δηλαδή τα στομάτια των φύλλων (Savvas et al., 2005a, b, Σάββας, 2012). Επομένως, οι αναλογίες μεταξύ της μάζας του θρεπτικού στοιχείου που απορροφάται (για τη σύνθεση της φυτικής βιομάζας) και του όγκου του νερού που καταναλώνεται (μέσω της διαπνοής), αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία ως συγκεντρώσεις απορρόφησης (Uptake Concentrations—UCs  $\text{mmol L}^{-1}$ , Sonneveld, 2002), και δεν παρουσιάζουν τόσο σημαντικές χρονικές διακυμάνσεις όπως οι αντίστοιχοι ρυθμοί πρόσληψης νερού και στοιχείων ξεχωριστά (Savvas and Lenz, 2000, Neocleous and Savvas, 2015, 2016). Στα κλειστά συστήματα στα οποία εφαρμόζεται επαναχρησιμοποίηση του θρεπτικού διαλύματος απορροής, ο λόγος μεταξύ των προστιθέμενων θρεπτικών συστατικών και νερού στο σύστημα (συγκεντρώσεις στο θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης) θα πρέπει να είναι ίσος με τις συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) των στοιχείων ώστε να μην υπάρχει συσσώρευση ή εξάντλησή τους στο περιβάλλον των ριζών, αφού η μόνη οδός απομάκρυνσης των θρεπτικών συστατικών από το περιβάλλον των ριζών είναι η πρόσληψη από τα φυτά (De Kreij, 1995). Αναλογίες απορρόφησης μεταξύ θρεπτικών στοιχείων και νερού (ΣΑ) έχουν προσδιορισθεί πειραματικά για τα περισσότερα φυτά θερμοκηπίου (De Kreij et al., 1999, Adams, 2002, Sonneveld, 2002, Sonneveld and Voogt, 2009, Σάββας, 2012, Savvas et al., 2013). Πρέπει βέβαια να τονισθεί ότι, οι ΣΑ που παρατίθενται στην βιβλιογραφία για ένα συγκεκριμένο φυτό θα πρέπει πάντοτε να θεωρούνται ενδεικτικές για ένα συγκεκριμένο στάδιο καλλιέργειας και μία συγκεκριμένη εποχή του έτους γιατί επηρεάζονται πολύ από τις συνθήκες του περιβάλλοντος (Papadopoulos and Hao, 2002). Επίσης η συγκέντρωση του θρεπτικού στοιχείου στη ρίζα, ασκεί σημαντική επίδραση στο ύψος των συγκεντρώσεων απορρόφησης (Sonneveld and Voogt, 2009). Παρόλες τις παραπάνω επιφυλάξεις, οι ΣΑ αποτελούν μία καλή βάση για τον υπολογισμό των ενδεδειγμένων δοσολογιών και την αυτοματοποίηση της προσθήκης

θρεπτικών στοιχείων στα φυτά που καλλιεργούνται σε κλειστά υδροπονικά συστήματα (Savvas, 2002a, b, Sonneveld, 2002, Van Os et al., 2008).

## **2.8. Κλειστά συστήματα καλλιέργειας - Ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος**

Για την ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος στα «κλειστά συστήματα» καλλιέργειας απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη ενός κατάλληλου δικτύου αγωγών που συλλέγουν και ανακυκλώνουν το θρεπτικό διάλυμα, ώστε να δημιουργείται τελικά ένα κλειστό σύστημα, σε αντίθεση με τα ανοιχτά συστήματα καλλιέργειας όπου ένα κλάσμα απορροής της τάξης του 25-35% (Schröder and Lieth, 2002) απορρίπτεται στο περιβάλλον. Η σπατάλη νερού θεωρείται σοβαρό μειονέκτημα λόγω της ανεπάρκειας νερού άρδευσης καλής ποιότητας που επικρατεί διεθνώς και ιδιαίτερα σε περιοχές με ημίξηρο κλίμα, όπως είναι η λεκάνη της Μεσογείου (Pardossi et al., 2006). Ταυτόχρονα, η διαφυγή λιπασμάτων μέσω του διαλύματος απορροής επιβαρύνει το περιβάλλον π.χ. με νιτρικά και φωσφορικά ιόντα (Savvas, 2002a, b). Με την τρέχουσα έμφαση στις περιβαλλοντικές ρυθμίσεις, είναι πολύ πιθανόν τα ανοιχτά συστήματα να εξαφανιστούν στο μέλλον (Bar-Yosef, 2008). Η εφαρμογή της ανακύκλωσης επιτρέπει τον περιορισμό ή ακόμη και την πλήρη πρόληψη της έκλυσης χημικών ανόργανων στοιχείων στα υπόγεια ύδατα ενώ ταυτόχρονα η εξοικονόμηση σε λιπάσματα μπορεί να φθάσει σε ένα επίπεδο μεταξύ 40-50% της συνολικής παρεχόμενης ποσότητας. Ωστόσο, τα οφέλη για το περιβάλλον είναι ακόμα πιο σημαντικά, εν όψει του γεγονότος ότι σε ετήσιες καλλιέργειες το ποσό του  $\text{NO}_3\text{-N}$ , που εκπλύνεται από τις ρίζες μέσω του διαλύματος που απορρέει, μπορεί να υπερβαίνει τα 800 χιλιόγραμμα ανά εκτάριο ανά έτος (Σάββας, 2012). Εντούτοις, το όφελος από την ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος χωρίς να έχει δυσμενή επίπτωση στις αποδόσεις, προϋποθέτει ότι πριν την επαναχρησιμοποίηση του συμπληρώνεται με τις κατάλληλες ποσότητες θρεπτικών στοιχείων (Savvas and Gizas, 2002, Raviv and Lieth, 2008). Ειδικότερα, η απορρόφηση των θρεπτικών

στοιχείων από την καλλιέργεια έχει σημαντικές διακυμάνσεις, που επηρεάζονται κυρίως από α) το είδος και στάδιο ανάπτυξης των φυτών β) από τις συνθήκες καλλιέργειας και του περιβάλλοντος και γ) το μέγεθος της καρποφορίας. Δηλαδή οι ανάγκες των φυτών σε νερό και θρεπτικά στοιχεία είναι χαρακτηριστικά που εξαρτώνται από το ίδιο το φυτό και το περιβάλλον ανάπτυξης του και σε αδρές γραμμές παραμένουν ίδιες ανεξάρτητα αν τα φυτά καλλιεργούνται σε ανοιχτά ή κλειστά υδροπονικά συστήματα. Αυτό δηλαδή που διαφοροποιεί τη θρέψη στα ανοιχτά από τα κλειστά συστήματα είναι πως επιτυγχάνονται οι επιθυμητές τιμές των θρεπτικών στοιχείων στη ρίζα αφού στα μεν κλειστά ότι δεν απορροφάται συσσωρεύεται (τα επίπεδα των δυσθενών στοιχείων π.χ.  $\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{Mg}^{2+}$  έχουν την τάση να συσσωρεύονται) ενώ στα ανοιχτά ένα σημαντικό μέρος εκπλύνεται.

Η σύνθεση επομένως του θρεπτικού διαλύματος που χορηγείται στα φυτά στα συστήματα εκτός εδάφους, μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των φυτών, και το ιδανικό θα ήταν να προστίθενται οι ακριβείς ποσότητες θρεπτικών στοιχείων (μακροστοιχείων, N, P, K, Ca, Mg, S και ιχνοστοιχείων, Fe, Mn, Zn, Cu, B και Mo) οι οποίες έχουν απορροφηθεί από τα φυτά. Εντούτοις, επειδή μέχρι σήμερα δεν είναι δυνατή η αυτόματη επιτόπια (με ειδικούς ιοντικούς αισθητήρες) μέτρηση των επιμέρους συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων (π.χ.  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) στο διάλυμα της απορροής, δεν μπορούν να υπολογίζονται σε συνθήκες πραγματικού χρόνου (με βάση τα ισοζύγια μάζας) οι θρεπτικές ανάγκες των φυτών. Επομένως, η συμπλήρωση θρεπτικών στοιχείων και νερού στα σύγχρονα αυτοματοποιημένα συστήματα ανακύκλωσης γίνεται με τη βοήθεια κατάλληλων υπολογιστικών μοντέλων (προσομοιωμάτων) και προηγμένων συστημάτων αυτόματης διαχείρισης θρεπτικών διαλυμάτων (Van Os et al., 2008, Sonneveld and Voogt, 2009, Σάββας, 2012) σε συγκεκριμένες δοσολογίες αντίστοιχες με τις ανάγκες των φυτών. Τα μοντέλα (μαθηματικά προσομοιώματα) που εφαρμόζονται σήμερα για την εκτίμηση των λιπαντικών αναγκών των φυτών στα κλειστά συστήματα καλλιέργειας εκτός

εδάφους βασίζονται σε δύο διαφορετικές τεχνικές ανακύκλωσης όπως περιγράφονται αναλυτικά από τον Σάββα (2012). Εντούτοις, για την εφαρμογή τους απαιτείται η εισαγωγή δεδομένων σχετικά με τις ανάγκες των φυτών σε θρεπτικά στοιχεία από αντίστοιχα πειράματα.

1. Η πρώτη τεχνική στηρίζεται στη σύνθεση του διαλύματος απορροής και
2. Η δεύτερη τεχνική αποβλέπει στην παροχή θρεπτικών στοιχείων και νερού στην καλλιέργεια σε ίσες αναλογίες με αυτές που διέπουν τις συγκεντρώσεις απορρόφησης.

Σύμφωνα με την πρώτη τεχνική, τα λιπάσματα δεν προστίθενται σε καθαρό νερό άρδευσης αλλά στο διάλυμα που προκύπτει από την ανάμειξη διαλύματος απορροής και νερού. Η ανάμειξη γίνεται αρχικά μέσω ενός κατάλληλου μείκτη και ακολούθως το διάλυμα που προκύπτει οδηγείται σε μια κεφαλή υδρολίπανσης για την προσθήκη των πυκνών λιπασμάτων. Αρχικά οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα απορροής θεωρούνται ότι είναι οι ίδιες με τις επιθυμητές τιμές στο περιβάλλον της ρίζας ( $C_{it}$ , δεδομένα βιβλιογραφίας), ενώ στη συνέχεια μετρούνται ή υπολογίζονται. Η ανάμειξη διαλύματος απορροής και νερού γίνεται με μια αναλογία ( $\alpha$ ) ώστε να επιτυγχάνεται μια ενδιάμεση τιμή-στόχος ( $C_{im}$ ) για το εκάστοτε ( $i$ ) θρεπτικό στοιχείο στο διάλυμα που προκύπτει. Η τιμή αυτή υπολογίζεται ως  $C_{im} = \alpha C_{id} + (1-\alpha) C_{iw}$ , όπου  $C_{id}$  και  $C_{iw}$  είναι οι συγκεντρώσεις στο διάλυμα απορροής και στο νερό, αντίστοιχα. Για να υπολογιστεί η δοσολογία προσθήκης του κάθε θρεπτικού στοιχείου ( $C_{if}$ ) χρησιμοποιείται η εξίσωση  $C_{if} = C_{it} - C_{im}$  (Σάββας, 2012). Οι δοσολογίες προσθήκης των θρεπτικών στοιχείων χρησιμοποιούνται ακολούθως για τον υπολογισμό των μαζών των λιπασμάτων που πρέπει να προστεθούν ακολουθώντας την ίδια διαδικασία όπως και στα ανοιχτά υδροπονικά συστήματα (Σάββας, 2012). Για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας ανάμειξης και συμπλήρωσης από τη μονάδα αυτόματης παρασκευής του θρεπτικού διαλύματος χρησιμοποιείται αντίστοιχα η τιμή ηλεκτρικής

αγωγιμότητας (στο μείκτη)  $EC_m = \alpha EC_d + (1-\alpha) EC_w$ , όπου  $EC_m$  είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του διαλύματος από την ανάμειξη διαλύματος απορροής και νερού, και  $E_d$ ,  $E_w$  οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο διάλυμα απορροής και αρδευτικό νερό, αντίστοιχα. Ταυτόχρονα στην κεφαλή υδρολίπανσης εισάγεται μια τιμή-στόχος ηλεκτρικής αγωγιμότητας  $EC_t$  (όπως και στα ανοιχτά συστήματα) ώστε να προστίθενται συνεχώς ένα σταθερό επίπεδο λιπασμάτων (και επομένως θρεπτικών στοιχείων) στο σύστημα το οποίο αυξάνει την τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα από την τιμή  $EC_m$  στην τιμή  $EC_t$ .

Σύμφωνα με τη δεύτερη τεχνική, για να διατηρηθούν οι επιθυμητές συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα, οι ποσότητες νερού και θρεπτικών στοιχείων που εισάγονται στο σύστημα θα πρέπει να είναι ίσες με αυτές που απορροφώνται από τα φυτά (μέσες αναμενόμενες συγκεντρώσεις απορρόφησης). Μαθηματικά το πιο πάνω εκφράζεται ως  $C_{if} = C_{iu} - C_{iw}$ , όπου  $C_{if}$  είναι η δόσολογία προσθήκης του εκάστοτε  $i$  θρεπτικού στοιχείου,  $C_{iw}$  η συγκέντρωση στο χρησιμοποιούμενο νερό και  $C_{iu}$  η συγκέντρωση απορρόφησης του θρεπτικού στοιχείου. Επομένως, αν οι μέσες συγκεντρώσεις απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων και νερού για ένα συγκεκριμένο καλλιεργούμενο είδος φυτού είναι γνωστές από πειράματα (Adams, 2002, Sonneveld, 2002, Bar-Yosef, 2008, Σάββας, 2012), τότε αυτές είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για την παρασκευή θρεπτικού διαλύματος συμπλήρωσης για κλειστό σύστημα. Το θρεπτικό διάλυμα που παρασκευάζεται από την κεφαλή υδρολίπανσης θα έχει συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων ίσες με  $C_{iu}$  και ηλεκτρική αγωγιμότητα ίση  $EC_u$  η οποία αντικατοπτρίζει το άθροισμα των συγκεντρώσεων όλων των θρεπτικών μακροκατιόντων συμπεριλαμβανομένου και του  $Na^+$  στο νερό άρδευσης και ονομάζεται «θρεπτικό διάλυμα για κλειστό σύστημα». Ακολούθως το διάλυμα αυτό αναμειγνύεται με διάλυμα απορροής, με στόχο την παρασκευή θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας προκαθορισμένης τιμής  $EC_t$  όπως



και με την προηγούμενη τεχνική (Σάββας, 2012). Μπορεί όμως να εφαρμόζονται και άλλες εναλλακτικές τεχνικές ανακύκλωσης οι οποίες κατά βάση είναι παραλλαγές αυτών που έχουν περιγραφεί παραπάνω. Μία τέτοια εναλλακτική προσέγγιση είναι να διατηρούνται σταθερές οι δοσολογίες παροχής θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα ώστε να διασφαλίζεται ένα άριστο επίπεδο παροχής θρεπτικών στοιχείων στην καλλιέργεια χωρίς όμως να παραμένει σταθερή η τιμή της  $EC_t$  στο εξερχόμενο θρεπτικό διάλυμα (Pardossi et al., 2002, Signore et al., 2016). Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται ή λογική της παροχής ενός θρεπτικού διαλύματος με συγκεντρώσεις ίσες με τις προβλεπόμενες συγκεντρώσεις απορρόφησης αλλά ο μείκτης του διαλύματος αυτού με το διάλυμα απορροής προγραμματίζεται να μεταβάλλει χρονικά την  $EC_t$ . Αυτή η προσέγγιση μπορεί να συνδυαστεί πολύ καλά με μοντέλα πρόβλεψης του ρυθμού συσσώρευσης των ιόντων  $Na^+$  στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα, με βάση τα οποία θα αναπροσαρμόζεται αυτόματα η  $EC_t$  (Savvas et al., 2006, Katsoulas et al., 2015). Μία άλλη προσέγγιση είναι να μην διατηρούνται σταθερές οι δοσολογίες παροχής θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα με στόχο να ανακυκλώνεται όλο το κλάσμα απορροής και να παραμένει σταθερή η τιμή της  $EC_t$  στο εξερχόμενο θρεπτικό διάλυμα (Savvas, 2002a, b, Pardossi et al., 2006).



**Εικόνα 2.2.** Κεφαλή υδρολίπανσης και σύστημα ανάμειξης διαλύματος απορροής και νερού σε ρυθμιζόμενη αναλογία με βάση μια προεπιλεγμένη τιμή  $EC_t$ .

## 2.9. Μοντέλα προσομοίωσης και απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων

Τα τελευταία χρόνια, προηγμένες κεφαλές υδρολίπανσης διαθέτουν ειδικά προγράμματα (συστήματα υποστήριξης απόφασης, Decision Support Systems-DSS) τα οποία αξιοποιούν δεδομένα από διάφορους αισθητήρες όπως EC, pH, αλλά και άλλους αισθητήρες μέτρησης π.χ. κλιματικών και φυσιολογικών παραμέτρων των φυτών (Sonneveld and Voogt, 2009, Katsoulas et al., 2016). Τα συστήματα αυτά βασίζονται σε διάφορα μοντέλα (π.χ. εμπειρικά ή μαθηματικά) τα οποία με βάση τις μετρήσεις από αισθητήρες σε συνθήκες πραγματικού χρόνου (on-line), διαχειρίζονται αυτόματα τόσο το θρεπτικό διάλυμα όσο και το περιβάλλον του θερμοκηπίου. Επίσης οι παρατηρήσεις από τους αισθητήρες μπορούν να καταγράφονται ανεξάρτητα και να εισάγονται από τον παραγωγό σε δεύτερο στάδιο (off-line) ώστε να ληφθεί η τελική απόφαση (Σάββας, 2012). Εντούτοις, στη συνήθη πρακτική στα κλειστά συστήματα υδροπονίας το θρεπτικό διάλυμα ανακυκλώνεται μέχρι η ιοντική του σύνθεση και η συνολική περιεκτικότητα σε άλατα (ηλεκτρική αγωγιμότητα-EC) αποκλίνει από τα βέλτιστα όρια για την καλλιέργεια και στη συνέχεια ανανεώνεται, με αποτέλεσμα την απώλεια νερού και θρεπτικών συστατικών. Προφανώς για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που οφείλονται σε περιοδική απόρριψη, το θρεπτικό διάλυμα πρέπει να ανακυκλώνεται όσο το δυνατόν περισσότερο και αυτό απαιτεί συχνές χημικές αναλύσεις, οι οποίες μπορεί να γίνουν με ακριβή συστήματα ελέγχου (Van Os et al., 2008) ή μέσω των συμβατικών εργαστηριακών αναλύσεων. Γίνεται έτσι αντιληπτό ότι η μοντελοποίηση των καλλιεργειών μπορεί να αποτελέσει έναν σημαντικό εργαλείο στη διαχείριση των εμπορικών υδροπονικών καλλιεργειών (Le Bot et al., 1998). Υπό την έννοια αυτή, τα μοντέλα μπορούν να θεωρηθούν ως υποκατάστατα για τους αισθητήρες. Για παράδειγμα, τα μοντέλα πρόσληψης θρεπτικών στοιχείων θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (DSS) για τον περιορισμό των αναγκών των καλλιεργητών για χημικές αναλύσεις (Raviv and Lieth, 2008, Massa et al., 2011, Incrocci et al., 2012, Katsoulas et al.,

2015). Η αυξανόμενη επιτυχία των προσομοιωμάτων - μοντέλων έχει δρομολογήσει την ανάπτυξη των εργαλείων μοντελοποίησης διαφόρων επιπέδων πολυπλοκότητας, γενικότητας και εγκυρότητας, με στόχο την περιγραφή και / ή την πρόβλεψη των διαδικασιών που σχετίζονται με τη θρέψη των φυτών (Le Bot et al., 1998, Silberbush et al., 2005). Ενδεχομένως τα μηχανιστικά μοντέλα να έχουν καλύτερες δυνατότητες πρόγνωσης και να μπορούν να δημιουργήσουν ευκολότερα νέα γνώση, ωστόσο, τα εμπειρικά μοντέλα μπορούν να έχουν μια καλύτερη πρακτική αξία, λόγω της πολυπλοκότητας των μηχανισμών που εμπλέκονται (π.χ. υπολογισμός της απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων με βάση τη φωτοσύνθεση και τη διαπνοή). Διάφορες εργασίες έχουν παρουσιάσει τους δύο τύπους των μοντέλων για τη θρέψη των φυτών στην υδροπονία όπως επίσης, και τη χρήση νευρωνικών δικτύων (neural nets) στη μοντελοποίηση απορρόφησης νερού και θρεπτικών στοιχείων από τις καλλιέργειες (αναφορές στις εργασίες Pardossi et al., 2004, Signore et al., 2016).

Στο παρελθόν έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για την προσομοίωση της αύξησης της αλατότητας και της απορρόφησης των θρεπτικών ουσιών σε υδροπονικές καλλιέργειες (Baas et al., 1995, Sonneveld et al., 1999, Silberbush and Ben-Asher, 2001, Kempkes and Stanghellini, 2003, Pardossi et al., 2004, Carmassi et al., 2003, 2005, Savvas et al., 2006). Εντούτοις, η θρέψη των φυτών σε συνθήκες βαθμιαίας συσσώρευσης της αλατότητας (μηχανισμοί προσαρμογής εάν η καταπόνηση επέλθει σταδιακά) δεν έχει επαρκώς μελετηθεί σε συστήματα με συνεχή και πλήρη ανακύκλωση των απορροών (Varlagas et al., 2010, Massa et al., 2011, Katsoulas et al., 2015, Neocleous and Savvas 2016).

## **2.10. Εκτίμηση απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων**

Σύμφωνα με τον Pardossi et al. (2004), η απορρόφηση θρεπτικών στοιχείων μπορεί να εκτιμηθεί από τις αλλαγές στις συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα. Ο ρυθμός απορρόφησης ( $U$ , εκφράζεται ως  $\text{mg plant}^{-1} \text{ d}^{-1}$

<sup>1)</sup> υπολογιζόταν σε εβδομαδιαία με βάση τη συγκέντρωση στην αρχή ( $C_0$ ) και στο τέλος ( $C_1$ ) της εβδομάδας του θρεπτικού διαλύματος, του όγκου του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος ( $V_R$ ), της ποσότητας και της συγκέντρωσης στο νερό ( $C_W$ ,  $V_W$ ) και στο διάλυμα συμπλήρωσης ( $C_S$ ,  $V_S$ ) το οποίο χρησιμοποιείται για την συμπλήρωση του θρεπτικού διαλύματος κατά τη διάρκεια της εβδομάδας ως εξής:

$$U = (C_0 \times V_R + C_W \times V_W + C_S \times V_S - C_1 \times V_R) / 7$$

Η μέθοδος αυτή θεωρήθηκε επιτυχής στην εκτίμηση της απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων σε σύστημα NFT σε καλλιέργεια πεπονιάς όπως και σε αγγούρι. Η διαδικασία αυτή θεωρήθηκε κατάλληλη για την εκτίμηση της πρόσληψη των θρεπτικών στοιχείων και στην τομάτα, αναφέροντας ότι η ποσότητα των θρεπτικών συστατικών (π.χ. N και K) που τροφοδοτήθηκε η καλλιέργεια αντιστοιχούσε στην ποσότητα των θρεπτικών που απορροφήθηκε από τα φυτά, όπως καθορίστηκε με βάση την χημική ανάλυση της ξηρής βιομάζας (Pardossi et al., 2004).

Επίσης ο Carmassi et al. (2005) αναφέρει ότι το ισοζύγιο της απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων ( $U$ , meq) σε ένα διάστημα μεταξύ  $n$  και  $n-1$  (ημέρες ή εβδομάδες) εκφράζεται από τη σχέση:

$$U = V \times C_{n-1} + V_R \times C_R - V \times C_n$$

όπου  $V$  και  $C$  είναι, αντίστοιχα, ο όγκος του συστήματος ( $L$ ) και η ιοντική συγκέντρωση (meq  $L^{-1}$ ) του ανακυκλούμενου διαλύματος (συμπεριλαμβανομένου αυτού στην δεξαμενή αναμίξεως, στη γραμμή άρδευσης, και στο υπόστρωμα), και  $V_R$  και  $C_R$  είναι ο όγκος και η ιοντική συγκέντρωση του θρεπτικού διαλύματος που προστίθεται στο σύστημα (διάλυμα συμπλήρωσης) κατά τη διάρκεια ενός δεδομένου διαστήματος. Δεδομένου ότι η εξάτμιση από το υπόστρωμα και οι απώλειες είναι γενικά αμελητέες, η  $V_R$  αντιστοιχεί σε αδρές γραμμές στην απορρόφηση νερού από τις καλλιέργειες ( $VU$ ). Η αναλογία απορρόφησης

ιόντων και νερού από την καλλιέργεια (δηλαδή, η συγκέντρωση απορρόφησης για κάθε θρεπτικό στοιχείο CU) εκφράζεται ως ακολούθως:

$$CU = U / VU$$

Ο Bar-Tal et al. (1995, 2001b) υπολόγισε τη διαπνοή και την απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων στην πιπεριά και στην τομάτα από δεδομένα του θρεπτικού διαλύματος ως ακολούθως. Αρχικά η απορρόφηση του νερού,  $U_w$  ( $L \text{ plant}^{-1}$ ), για ένα συγκεκριμένο χρονοδιάστημα υπολογίστηκε ως:

$$U_w = (W_{in} + W_m - W_f) / N$$

όπου  $W_{in}$  αρχικός όγκος νερού (L),  $W_m$  όγκος προστιθέμενου νερού (L),  $W_f$  τελικός όγκος νερού (L), και  $N$  αριθμός των φυτών. Ο ρυθμός διαπνοής,  $T_r$  ( $L \cdot d^{-1}$ ), υπολογιζόταν ως:

$$T_r = U_w / t$$

όπου  $t$  χρονικό διάστημα (d). Ακολούθως η απορρόφηση N ( $NH_4 + NO_3$ ), K και Ca, ( $U_i$ ,  $g \text{ plant}^{-1}$ ), υπολογίστηκαν ως:

$$U_i = (W_{in} \times C_{iin} + W_m \times C_{iw} - W_f \times C_{if}) / N$$

όπου  $i$  αντιστοιχεί στο N- $NH_4$ , N- $NO_3$ , K ή Ca,  $C_{iin}$  αρχική συγκέντρωση του στοιχείου  $i$  στο διάλυμα ( $g \cdot L^{-1}$ ),  $C_{iw}$  συγκέντρωση του στοιχείου  $i$  στο νερό ( $g \cdot L^{-1}$ ), και  $C_{if}$  τελική συγκέντρωση του στοιχείου  $i$  στο διάλυμα ( $g \cdot L^{-1}$ ). Εντέλει, οι ρυθμοί απορρόφησης των στοιχείων,  $Q_i$  ( $g \cdot d^{-1} \text{ plant}^{-1}$ ), υπολογιζόταν ως:

$$Q_i = U_i / t$$

Εκτίμηση των συγκεντρώσεων απορρόφησης ( $\Sigma A$ ) των θρεπτικών μπορεί να γίνει τόσο με βάση τις μετρήσεις των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα σε συνδυασμό με την κατανάλωση νερού από τα φυτά όπως έχει αναφερθεί πιο πάνω, όσο και με βάση την ανάκτηση των θρεπτικών στοιχείων από τη παραγόμενη ξηρή φυτομάζα σε συνδυασμό με την κατανάλωση νερού (Rouphael and Colla, 2005, Tzerakis et al., 2012, Neocleous and Savvas, 2015). Ο δεύτερος τρόπος

βασίζεται στη συλλογή όλης της παραγόμενης φυτομάζας συμπεριλαμβανόμενου και όλων των κλαδεμάτων (καρπών, φύλλων, βλαστών) και τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων και του ξηρού βάρους για να υπολογιστούν οι συγκεντρώσεις απορρόφησης όπως πιο κάτω:

$$UC_{xu} = (C_{xr} \times B_r + \sum C_{xsi} \times B_{si} + \sum C_{xli} \times B_{li} + \sum C_{xfi} \times B_{fi}) / T_r$$

όπου  $C_{xr}$ ,  $C_{xsi}$ ,  $C_{xli}$ , και  $C_{xfi}$  συμβολίζουν τις συγκεντρώσεις ( $\text{mmol g}^{-1}$ ) των μακροστοιχείων ( $x = K, Ca, Mg, N, P$ ) στη ρίζα, βλαστό, φύλλα και καρπό, αντίστοιχα,  $B_r$ ,  $B_{si}$ ,  $B_{li}$ , και  $B_{fi}$  συμβολίζουν το ξηρό βάρος ( $\text{g plant}^{-1}$ ) της ρίζας, βλαστού, φύλλων και καρπού, αντίστοιχα, και  $T_r$  συμβολίζει την απομάκρυνση του νερού από το σύστημα ( $\text{L plant}^{-1}$ ) κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Ο δείκτης  $i$  απεικονίζει τις διαδοχικές ημερομηνίες όπου γινόταν αφαίρεση φυτικού υλικού κατά τη διάρκεια του πειράματος.

## 2.11. Συσσώρευση αλάτων στα κλειστά υδροπονικά συστήματα

Όπως έχει αναφερθεί ο όρος υψηλή αλατότητα ενός υδατικού διαλύματος αναφέρεται στην ύπαρξη υψηλών συγκεντρώσεων διαλυτών ανόργανων ιόντων και εκφράζεται μέσω της μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του διαλύματος (electrical conductivity-EC,  $\text{dS m}^{-1}$ ). Τα ιόντα που βρίσκονται στα νερά και σχετίζονται με την αλατότητα είναι τα κατιόντα  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  και τα ανιόντα  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  από τα οποία τα ιόντα νατρίου ( $\text{Na}^+$ ) και το συνοδόν του ιόν του χλωρίου ( $\text{Cl}^-$ ) είναι τα περισσότερα απαντώμενα στα αρδευτικά νερά στην περιοχή της Μεσογείου (Bar-Yosef, 2008). Η προέλευση των αλάτων είναι: α) τα πετρώματα και ορυκτά από τα οποία περνάει το νερό και τροφοδοτεί τις επιφανειακές και υπόγειες υδατικές λεκάνες απορροής και β) το θαλασινό νερό που εισχωρεί στον υπόγειο υδροφορέα. Τα άλατα συνήθως εκπλύνονται από τα επιφανειακά νερά ή μεταφέρονται στα βαθύτερα στρώματα του εδάφους σε περιοχές που η βροχόπτωση είναι ικανοποιητική. Αντίθετα σε ξηρές και ημίξηρες περιοχές τα άλατα συγκεντρώνονται στα εδάφη και

αρδευτικά νερά και δημιουργούν προβλήματα στη γεωργία. Προφανώς, η αλατότητα είναι ένας σημαντικός παράγοντας στη μείωση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών και του κέρδους σε πολλές ξηρές και ημίξηρες περιοχές, παρά τις προηγμένες τεχνικές διαχείρισης που αναπτύχθηκαν κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Εκτιμάται ότι >20% της αρδευόμενης γης σε όλο το κόσμο έχει επηρεαστεί σοβαρά από την αλατότητα (Tester and Davenport, 2003, Edelstein et al., 2011). Οι προσπάθειες για την αύξηση της ανθεκτικότητας στην αλατότητα ευαίσθητων καλλιεργειών με γενετική βελτίωση δεν ήταν ιδιαίτερα επιτυχής λόγω της φυσιολογικής και γενετικής περιπλοκότητας των μηχανισμών ανοχής των φυτών στην αλατότητα (Flowers, 2004, Flowers et al., 2015). Επίσης, τις τελευταίες δεκαετίες, σημαντικές προσπάθειες επίλυσης του προβλήματος έχουν συμπεριλάβει τη δημιουργία διαγονιδιακών φυτών με νέα εισαχθέντα γονίδια ή με τροποποιημένο επίπεδο έκφρασης των υφιστάμενων γονιδίων (Yamaguchi and Blumwald, 2005). Ενώ οι προσπάθειες αυτές περιμένουν την πρακτική εφαρμογή τους, είναι σημαντικό να αναπτυχθούν στο εγγύς μέλλον περισσότερο συμβατικές μέθοδοι, οι οποίες θα διασφαλίζουν υψηλή παραγωγικότητα των καλλιεργειών χωρίς αρνητικές συνέπειες στην ποιότητα των προϊόντων κάτω από συνθήκες αλατότητας. Διάφοροι παράγοντες μπορεί να είναι υπεύθυνοι για την ευαισθησία στα άλατα. Ένας από αυτούς είναι η πρόσληψη και συσσώρευση των ιόντων άλατος στον φυτικό ιστό, η οποία μπορεί να έχει βλαπτική επίδραση στα φυτά με τη μορφή είτε ωσμωτικής (osmotic) είτε οξειδωτικής (oxidative) καταπόνησης, με συνέπεια να προκαλούνται δυσλειτουργίες στην αφομοίωση του άνθρακα και θρεπτικές ανισορροπίες μέσα στο φυτό (Munns, 2002, Orsini et al., 2013). Εντούτοις, όλα τα αποτελέσματα σχετικά με την αλατότητα δεν είναι αρνητικά καθώς μπορεί να έχει ευνοϊκή επίδραση π.χ. σε ορισμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά των καρπών, στον περιορισμό της εμφάνισης φυσιολογικών διαταραχών ή τον περιορισμό της βλαστικής ανάπτυξης σε βάρος της καρποφορίας (Shannon and Grieve, 1999, Rouphael et al., 2006, Σάββας, 2012).

Τα ιόντα  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$ , αυτά καθαυτά, σε υψηλές συγκεντρώσεις παρουσιάζουν τοξικότητα. Γενικώς προκαλούν δυσλειτουργίες στην περατότητα των μεμβρανών, την ενεργότητα ενζύμων και την φωτοσυνθετική λειτουργία, δυσχέρειες στην πρόσληψη και μεταφορά των απαραίτητων θρεπτικών στοιχείων (π.χ. ανταγωνισμός  $\text{Na}^+$  με  $\text{K}^+$  και  $\text{Ca}^{2+}$ ) αλλά και εμφάνιση οξειδωτικής καταπόνησης λόγω της δημιουργίας ενεργών μορφών οξυγόνου (Καραμπουρνιώτης, 2003). Το χλώριο ( $\text{Cl}^-$ ) είναι γνωστό ότι ως επί το πλείστον προσλαμβάνεται ελεύθερα με το νερό, και έτσι μπορεί να συσσωρεύεται στα φύλλα με το ρεύμα της διαπνοής, ενώ επίσης μπορεί να απαιτεί ενέργεια και είναι πιθανόν να καταλύεται από ένα  $\text{Cl}^-/\text{H}^+$  συµμεταφορέα (White and Broadley, 2001, Wahome, 2003). Η πρόσληψη  $\text{Na}^+$  από τα κύτταρα της ρίζας δεν έχει πλήρως διευκρινιστεί. Τα ιόντα  $\text{Na}^+$  μπορεί να απορροφούνται από το σύμπλεγµα των κυττάρων της ρίζας ή να φορτώνονται στο ξύλωµα µε παθητική διάχυση µέσω της λιπιδικής διπλοστοιβάδας ή µε διαµεµβρανική µεταφορά διαµέσου πρωτεϊνικών καναλιών το οποίο εξαρτάται από τη µεταβολική ενέργεια (Edelstein et al., 2011). Το  $\text{Na}^+$  µπορεί επίσης να εισέρχεται στα κύτταρα µέσω των µεταφορέων καλίου (KUP/HAK/KT) και να ανταγωνίζεται το κάλιο, αλλά και µέσω άλλων πρωτεϊνικών µεταφορέων (Edelstein et al., 2011). Η πρόσληψη  $\text{Na}^+$  από τη ρίζα του φυτού δεν εξασφαλίζει την περαιτέρω µεταφορά και διανοµή του στα υπέργεια φυτικά τµήµατα και ιδιαίτερα στα φωτοσυνθετικά ενεργά κύτταρα του µεσοφύλλου, αφού τα ιόντα  $\text{Na}^+$  µπορεί να παραµείνουν στις ρίζες ή στα χαμηλότερα µέρη του φυτού (Orsini et al., 2013). Η µεταφορά σε µεγάλες αποστάσεις του  $\text{Na}^+$  στο φυτό πραγµατοποιείται κυρίως µέσω των αγγείων του ξύλου παρόµοια µε άλλα µεταλλικά ιόντα, και ως εκ τούτου µπορεί να εξαρτάται από το ρυθµό διαπνοής (Tester and Davenport, 2003). Σε ανθεκτικά είδη (π.χ. αλόφυτα) τα ιόντα  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  µπορεί να συσσωρεύονται στο χυµοτόπιο ώστε να αποφεύγεται η υψηλή συγκέντρωση τους στο κυτόπλασµα µέσω ενός αντιµεταφορέα  $\text{Na}^+/\text{H}^+$  στον τονοπλάστη. Παράλληλα συντίθενται διάφορες οργανικές ενώσεις (π.χ. προλίνη) στο κυτόπλασµα, ώστε



αφενός να εξισοροπείται το ωσμωτικό δυναμικό του με αυτό του χυμοτοπίου για να μην αφυδατώνεται (ωσμωτική προσαρμογή) και αφετέρου να παρέχεται προστασία στα διάφορα οργανίδια του (ωσμωπροστατευτικές ουσίες: osmoprotectants). Όπως όμως αναφέρουν οι πιο πάνω ερευνητές, η ωσμωτική προσαρμογή γίνεται με δαπάνη προϊόντων της αφομοίωσης με συνέπεια να μειώνεται η διαθεσιμότητά τους για τις κορυφές αύξησης, τα αποθηκευτικά όργανα και τους καρπούς. Τα λιγότερο ανθεκτικά είδη φυτών στην αλατότητα, στην κατηγορία των οποίων ανήκουν και οι περισσότερες καλλιέργειες, η ανοχή στην αλατούχο καταπόνηση επιδιώκεται μέσω μηχανισμών αποκλεισμού της εισόδου των βλαπτικών ιόντων στο φυτό (Καραμπουρνιώτης, 2003, Κωνσταντινίδου, 2003).

Προφανώς, λανθασμένοι χειρισμοί θρέψης σε συνθήκες αλατότητας ενδεχομένως να οδηγήσουν σε απώλειες παραγωγής και ενδεχομένως στην εμφάνιση εκτεταμένων προβλημάτων στην καλλιέργεια, ειδικότερα στα κλειστά υδροπονικά συστήματα (Savvas, 2002a, b, Läuchli and Grattan, 2007). Για το λόγο αυτό, η αριστοποίηση της κατάστροφης θρεπτικών διαλυμάτων (παροχής θρεπτικών στοιχείων) σε συστήματα με ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος σε συνθήκες υψηλής αλατότητας εξακολουθεί να είναι στόχος ύψιστης προτεραιότητας για τον συγκεκριμένο παραγωγικό κλάδο, παρόλο που υπήρξε σημαντικό θέμα μελέτης και στο παρελθόν (Sonneveld et al., 1999, Sonneveld, 2002, Bar-Yosef, 2008, Massa et al., 2008, Sonneveld and Voogt, 2009, Σάββας, 2012). Όπως έχει αναφερθεί, η συσσώρευση του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  συνιστά το σοβαρότερο πρόβλημα των κλειστών συστημάτων καλλιέργειας εκτός εδάφους. Τα ιόντα  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  συσσωρεύονται βαθμιαία στο περιβάλλον της ρίζας κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας, με αποτέλεσμα να είναι αναγκαία η περιοδική απόρριψη μέρους ή ολόκληρου του κλάσματος απορροής όταν οι συγκεντρώσεις τους υπερβούν κάποια όρια (quality of salts, Raviv and Lieth, 2008, Katsoulas et al., 2015). Επίσης, έχει αναφερθεί ότι στην περιοχή της Μεσογείου, όχι σπάνια οι συγκεντρώσεις ορισμένων θρεπτικών στοιχείων στο αρδευτικό νερό ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ )

είναι υψηλότερες από τις συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) τους από τα φυτά. Επομένως, αυτά συσσωρεύονται στο κλειστό σύστημα με αποτέλεσμα η ηλεκτρική αγωγιμότητα να υπερβεί τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή (κατώφλι-αλατότητας) στο διάλυμα απορροής και να πρέπει να απορρίπτεται (quantity of salts, Ravin and Lieth, 2008). Επομένως, και στις δύο περιπτώσεις μειώνεται η αποτελεσματικότητα χρήσης νερού και λιπασμάτων ανεξάρτητα από το αν η ανύψωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητα (EC) οφείλεται στη συσσώρευση NaCl ή θρεπτικών ιόντων. Για το ζήτημα αυτό, τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί και αξιολογηθεί απλές μαθηματικές εξισώσεις για την προσομοίωση της συσσώρευσης αλάτων σε παραγωγικές καλλιέργειες σε κλειστά υδροπονικά συστήματα. Ειδικότερα η σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης απορρόφησης (ΣΑ, αναλογία απορρόφησης ιόντος προς νερό) του Na<sup>+</sup> ή του Cl<sup>-</sup> ( $C_{xu}$ ,  $x = \text{Na}^+, \text{Cl}^-$ ) και της συγκέντρωσης τους στο περιβάλλον της ρίζας ( $C_{xs}$ ), ( $x = \text{Na}^+, \text{Cl}^-$ ), έχει αποδειχτεί από πειράματα ότι μπορεί να περιγραφεί με μια από τις ακόλουθες μαθηματικές εξισώσεις, ανάλογα με το είδος του καλλιεργούμενου φυτού, σύμφωνα με τους Sonneveld et al. (1999) και Carmassi et al. (2005):

$$C_{xu} = \alpha C_{xs}^b \quad (1)$$

$$C_{xu} = m C_{xs} \quad (2)$$

Με βάση το ισοζύγιο μαζών αποδεικνύεται (Savvas et al., 2008) ότι σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα, η αύξηση της  $C_{xs}$  είναι ανάλογη της αύξησης της αθροιστικής κατανάλωσης νερού από τα φυτά ( $V_w$ ) και της διαφοράς μεταξύ του Na<sup>+</sup> ή του Cl<sup>-</sup> που εισέρχεται στο σύστημα ( $C_{xw}$ ) και του Na<sup>+</sup> ή του Cl<sup>-</sup> που απορροφάται από τα φυτά ( $C_{xu}$ ) και αντιστρόφως ανάλογη προς το συνολικό όγκο του θρεπτικού διαλύματος που περιέχεται στο σύστημα ( $V_s$ ). Μαθηματικά, η παραπάνω σχέση σύμφωνα με τους Savvas et al. (2005a) γράφεται ως εξής:

$$dC_{xs} = dV_w (C_{xw} - C_{xu}) / V_s \quad (3)$$

Ακολούθως, αν η  $C_{xu}$  στην εξίσωση (3) αντικατασταθεί από τις εξισώσεις (1) και (2) και γίνουν οι κατάλληλες πράξεις, προκύπτουν οι παρακάτω διαφορικές εξισώσεις με σκοπό την προσομοίωση της συγκέντρωσης του  $\text{Na}^+$  ή του  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον της ρίζας σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού (βλέπε επίσης Savvas et al., 2007):

$$dC_{xs}/dV_w = (C_{xw} - aC_{xs}^b) / V_s \quad (4)$$

$$dC_{xs}/dV_w = (C_{xw} - mC_x) / V_s \quad (5)$$

Οι πρότυπες αυτές μαθηματικές σχέσεις αξιολογήθηκαν σε αρκετά καλλιεργούμενα είδη θερμοκηπίου, όπως τομάτας, αγγουριού, φασολιού, πιπεριάς, τριαντάφυλλου, πεπονιάς και κολοκυθιάς και η σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον της ρίζας και της αναλογίας απορρόφησης  $\text{Na}^+$ /νερό ή  $\text{Cl}^-$ /νερό μπορούσαν να περιγραφούν καλύτερα μέσω της εκθετικής σχέσης (Baas et al., 1995, Savvas et al., 2005a, 2007, 2008, Massa et al., 2008, Varlagas et al., 2010, Katsoulas et al., 2015, Neocleous and Savvas, 2016, 2017). Εντούτοις, οι πιο πάνω ερευνητές συμπεραίνουν ότι η δυνατότητα του μαθηματικού προσομοιώματος (μοντέλου) να προβλέπει με αποδεκτή ακρίβεια τις συγκεντρώσεις του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  στο διάλυμα ριζοστρώματος πρέπει να βασίζεται στην παραμετροποίηση του (προσδιορισμός  $a$ ,  $b$ ,  $m$  τιμών) από αντίστοιχα πειράματα βαθμονόμησης, εξαρτώμενα τόσο από το καλλιεργούμενο είδος όσο και τις περιβαλλοντικές συνθήκες ανάπτυξης. Τα αποτελέσματα και οι πληροφορίες που προκύπτουν από την εφαρμογή των πιο πάνω προσομοιωμάτων μπορούν να ενσωματωθούν σε συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (decision support systems - DSS) για την προσομοίωση της συσσώρευσης των αλάτων σε παραγωγικές καλλιέργειες σε κλειστά υδροπονικά συστήματα και μπορεί να βοηθήσει για να προσδιορίζονται π.χ. 1) ποια είναι η μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση  $\text{NaCl}$  στο νερό άρδευσης για πλήρη και συνεχή ανακύκλωση των απορροών, 2) σε περίπτωση που η συγκέντρωση  $\text{NaCl}$  είναι μεγαλύτερη από την επιτρεπτή, πότε θα πρέπει να απορρίπτεται το διάλυμα απορροής με βάση την ανώτατη επιτρεπτή συγκέντρωση αλατότητας στο διάλυμα

ρίζοστρώματος και 3) ποιο μέρος της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) του θρεπτικού διαλύματος αντιστοιχεί στην αλατότητα NaCl και επομένως ποια πρέπει να είναι η τελική τιμή EC στόχος, ώστε να παρέχονται επαρκείς ποσότητες θρεπτικών στοιχείων στα φυτά.

## 2.12. Κολοκυνθοειδή (Πεπόνι, Κολοκύθι)

Το πεπόνι (*Cucumis melo* L.) ανήκει στο ίδιο γένος με το αγγούρι και στην οικογένεια *Cucurbitaceae* και οι καλλιεργούμενες σήμερα ποικιλίες και υβρίδια ανήκουν στις βοτανικές ποικιλίες var. *reticulatus* και *inodorus* (Ολύμπιος, 2001). Ο γεωγραφικός χώρος καταγωγής της πεπονιάς (αγγλικά: melon) πιστεύεται ότι είναι η τροπική Αφρική και οι Ινδίες. Δεν φαίνεται να ήταν γνωστό στους αρχαίους Έλληνες και Αιγύπτιους αλλά πιθανότερο καλλιεργήθηκε αργότερα (Ολύμπιος, 2001). Τα τελευταία χρόνια, κυριότερες χώρες παραγωγής παγκόσμια είναι η Κίνα, η Τουρκία, το Ιράν και η Αίγυπτος. Σε επίπεδο Ε.Ε., η Ισπανία, η Ιταλία και η Γαλλία είναι οι κυριότερες χώρες παραγωγής ενώ τις μεγαλύτερες εισαγωγές πραγματοποίησαν το Ηνωμένο Βασίλειο, Γαλλία και Ολλανδία και τις μεγαλύτερες εξαγωγές πραγματοποίησε η Ισπανία. Εντούτοις, η καλλιέργεια πεπονιού στο θερμοκήπιο είναι σχετικά περιορισμένη στην Ελλάδα και την Κύπρο και ιδιαίτερα σε συνθήκες υδροπονίας για εκτός εποχής παραγωγή. Ενδεχομένως αυτός είναι ένας από τους λόγους που οι εξαγωγές εμφανίζουν αρνητικό ισοζύγιο σε σχέση με τις εισαγωγές (FAOSTAT, 2014). Όπως αναφέρεται από τον Ολύμπιο (2001), η πεπονιά είναι φυτό ετήσιο, ποώδες, με κεντρικό βλαστό που έρπει ή αναρριχάται (το φυτό φέρει έλικες που το βοηθούν να αναρριχάται) ενώ από τις μασχάλες των φύλλων της βάσης εκπτύσσονται δευτερεύοντες βλαστοί και σχετικά μεγάλα φύλλα που φέρουν τρίχες, γωνιώδη, οδοντωτά ή με βαθύτερες εγκοπώσεις. Το φυτό φέρει χωριστά αρσενικά και θηλυκά ή ερμαφρόδιτα άνθη κίτρινου χρώματος. Τα θηλυκά ή ερμαφρόδιτα άνθη σχηματίζονται στη βάση πλάγιων καρποφόρων

βλαστών που εκπύσσονται από τον κεντρικό βλαστό και χαρακτηρίζονται από υποφυή ωοθήκη (υποτυπώδης καρπός).

Η καλλιέργεια της πεπονιάς (*Cucumis melo* L.) στο θερμοκήπιο γίνεται για την παραγωγή πρώιμων πεπονιών νωρίς την Άνοιξη (από Απρίλιο) είτε αργά το Φθινόπωρο με αρχές Χειμώνα (Οκτώβρης – Δεκέμβρης) δηλαδή τους μήνες που προηγούνται ή έπονται της παραγωγής από υπαίθριες καλλιέργειες. Οι κυριότερες ποικιλίες που καλλιεργούνται στο θερμοκήπιο στις Μεσογειακές χώρες είναι F<sub>1</sub> υβρίδια τύπου «Galia» (Rodriguez et al., 2006) και οι καλλιεργητές συχνά χρησιμοποιούν εμβολιασμένα σπορόφυτα σε υποκείμενα κολοκυθιάς, κυρίως *C. maxima* × *C. moschata* (Calatayud et al., 2013). Η υδροπονική καλλιέργεια πεπονιού γίνεται κυρίως σε υποστρώματα πετροβάμβακα ή σε κοκκώδη υποστρώματα (π.χ. περλίτης, ίνες καρύδας-coco soil). Η άριστη θερμοκρασία φυτρώματος ανέρχεται σε 24-27°C ενώ σε θερμοκρασία κάτω από 12°C δεν βλαστάνουν οι σπόροι (Σάββας, 2012). Όσον αφορά τη θερμοκρασία αέρος στο θερμοκήπιο, η πεπονιά σαν φυτό θερμής εποχής, έχει ανάγκη υψηλών θερμοκρασιών από 15-30°C για να αναπτυχθεί και να δώσει υψηλές αποδόσεις. Τα φυτά υφίστανται ζημιές από ψύχος όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από 10-12°C ιδιαίτερα στα πρώτα στάδια ανάπτυξης των φυτών. Η πυκνότητα φύτευσης της πεπονιάς κυμαίνεται μεταξύ 2-2,5 φυτά/m<sup>2</sup> υπάρχουν όμως και ποικιλίες που φθάνουν τα 3 φυτά/m<sup>2</sup>. Η διάταξη των φυτών στο θερμοκήπιο γίνεται σε απλές ή διπλές γραμμές και οι αποστάσεις μεταξύ των γραμμών και ο αριθμός των σάκων ανά μονάδα επιφάνειας ρυθμίζεται ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή πυκνότητα. Ο αριθμός των φυτών ανά σάκο ή τρέχοντος μέτρου καναλιού είναι 2 φυτά σε διπλή και 4 φυτά σε μονή γραμμή. Οι τεχνικές κλαδέματος και υποστύλωσης είναι ίδιες με αυτές που εφαρμόζονται σε καλλιέργειες εδάφους στο θερμοκήπιο (Ολύμπιος, 2001). Δηλαδή το φυτό υποστυλώνεται κατακόρυφα με σπάγκο που προσδένεται σε οριζόντιο σύρμα και αφήνονται καρποφόροι πλάγιοι βλαστοί πάνω από ορισμένο ύψος οι οποίοι κορυφολογούνται στα δύο φύλλα μετά

τον πρώτο καρπό. Σύμφωνα με τον ίδιο ερευνητή, η πεπονια έχει μέτρια αντοχή στα άλατα η οποία βρίσκεται μεταξύ της αγγουριάς και της τομάτας. Κατά τη διάρκεια του βλαστικού σταδίου ανάπτυξης των φυτών η ηλεκτρική αγωγιμότητα στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας διατηρείται στο  $2,3 \text{ dS m}^{-1}$  ενώ κατά το στάδιο καρποφορίας μειώνεται ελαφρώς στο  $2,2 \text{ dS m}^{-1}$  (Σάββας, 2012). Ο Pardossi et al. (2004) αναφέρει ότι ενώ στο βλαστικό στάδιο οι συγκεντρώσεις απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων είναι αυξημένες σε σύγκριση με το αναπαραγωγικό στάδιο, οι απόλυτες ποσότητες που απορροφώνται ανά ημέρα είναι πολύ χαμηλότερες. Η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο περιβάλλον των ριζών μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα των καρπών αλλά τιμές μεγαλύτερες από  $3,0\text{-}3,2 \text{ dS m}^{-1}$  μπορούν να μειώσουν την παραγωγή. Επίσης ο Bar-Yosef (2008), αναφέρει ότι αύξηση της EC στο ριζόστρωμα από  $2,1$  σε  $4,6 \text{ dS m}^{-1}$  σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα καλλιέργειας πεπονιας περιόρισε την απόδοση κατά  $19,6\%$  και ο Mavrogiannopoulos et al. (1999) αναφέρει ότι το μέσο βάρος του καρπού εμφανίζεται να είναι περισσότερο ευαίσθητο στην αύξηση της αλατότητας από το ποσοστό της καρπόδεσης. Η ικανοποιητική παροχή  $\text{Ca}^{2+}$  είναι σημαντική στην πεπονια ιδιαίτερα κατά τα πρώτα στάδια ανάπτυξης των καρπών δεδομένου ότι τότε μεταφέρεται και συσσωρεύεται το  $80\%$  του συνολικού ασβεστίου (Σάββας, 2012). Σύμφωνα με τον ίδιο ερευνητή, η αύξηση της συγκέντρωσης του αζώτου στο θρεπτικό διάλυμα από τα  $10$  στα  $15 \text{ mmol L}^{-1}$  δεν είναι τόσο σημαντική για την παραγωγή και την ποιότητα του καρπού όσο το κλάσμα του αμμωνιακού αζώτου στο σύνολο της παρεχόμενης ποσότητας αζώτου. Αύξηση του αμμωνιακού μέρους όμως πέραν του  $15\%$  δεν συνίσταται γιατί ανταγωνίζεται τα  $\text{K}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ , μειώνει το pH στην περιοχή της ρίζας πιο κάτω από το κανονικό με κίνδυνο εμφάνισης τοξικότητας μαγγανίου και επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα. Σημαντική επίσης είναι η ικανοποιητική τροφοδοσία με  $\text{P}$  και  $\text{K}$  για τη θετική επίπτωση τους στο ύψος της παραγωγής και στην ποιότητα. Αναλογίες μεταξύ των

θρεπτικών στοιχείων και συνθέσεις θρεπτικών διαλυμάτων για εκτός εδάφους καλλιέργεια πεπονιάς δίνονται περιληπτικά από τον Σάββα (2012) και Savvas et al. (2013).

Η κολοκυθιά (*Cucurbita pepo* L.) ανήκει στην ίδια οικογένεια με το πεπόνι (*Cucurbitaceae*) και έχει καταγωγή από την τροπική Αμερική από όπου και έγινε η εισαγωγή της στην Ευρώπη. Κυριότερες χώρες παραγωγής παγκόσμια είναι η Κίνα ενώ σε επίπεδο Ε.Ε., η Ιταλία και η Ισπανία. Τις μεγαλύτερες ποσότητες στην Ε.Ε. εισάγουν η Γαλλία, το Ηνωμένο Βασίλειο και η Γερμανία και τις μεγαλύτερες εξαγωγές πραγματοποίησε η Ισπανία (FAOSTAT, 2014). Η κολοκυθιά στο θερμοκήπιο καλλιεργείται για την παραγωγή μικρών ανώριμων καρπών (κολοκυθάκι) ενώ οι υψηλές τιμές που λαμβάνουν τα νωπά κολοκυθάκια κατά τους χειμερινούς μήνες υποδηλώνουν και την οικονομική σημασία που έχει η εκτός εποχής παραγωγή στην περιοχή της Μεσογείου (Rouphael and Colla, 2005). Σε αντίθεση με το πεπόνι, η καλλιέργεια του κολοκυθιού στο θερμοκήπιο δεν γίνεται μόνο για την παραγωγή τους μήνες που προηγούνται ή έπονται της παραγωγής από υπαίθριες καλλιέργειες αλλά και το χειμώνα. Οι ποικιλίες που καλλιεργούνται στο θερμοκήπιο έχουν θαμνώδη βλάστηση αλλά διαφέρουν ως προς το σχήμα, το μέγεθος και το χρώμα (λευκό - πράσινο) του καρπού. Όπως αναφέρεται από τον Ολύμπιο (2001), η κολοκυθιά είναι φυτό μονοετές, ποώδες, με μεγάλα φύλλα που φέρουν τρίχες, τρίλοβα ή πεντάλοβα με βαθιές εγκολπώσεις τα οποία φέρονται σε μεγάλους μίσχους κενούς εσωτερικά. Το φυτό φέρει χωριστά αρσενικά και θηλυκά άνθη έντονου κίτρινου χρώματος. Τα θηλυκά άνθη σχηματίζονται μετά τα πρώτα αρσενικά πάνω στο βλαστό και χαρακτηρίζονται από κοντό ποδίσκο και υποφυή ωοθήκη (υποτυπώδης καρπός). Η άριστη θερμοκρασία φυτρώματος ανέρχεται σε 20-30°C με ελάχιστη θερμοκρασία 13-14°C. Σε θερμοκρασία κάτω από 10°C δεν βλαστάνουν οι σπόροι. Η μεταφύτευση των σποροφύτων γίνεται συνήθως όταν το φυτό αποκτήσει 3-4 πραγματικά και οι άριστες θερμοκρασίες στο θερμοκήπιο είναι ημέρα 25-27°C (μέγιστη 30-32°C) και νύχτα 15-17°C (ελάχιστη βιολογική 10°C). Η σχετική υγρασία κυμαίνεται συνήθως μεταξύ

70-85%. Όταν το φυτό αποκτήσει το κατάλληλο μέγεθος (3-4 περίπου πραγματικά φύλλα) και καλό ριζικό σύστημα, περίπου 3 εβδομάδες μετά την σπορά και ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες, μεταφέρεται στη τελική του θέση. Στο στάδιο όπου το σπορόφυτο μεταφυτεύεται έχει εμφανίσει ριζίδια στο κάτω μέρος των κύβων υποστρώματος. Η καλλιέργεια εκτός εδάφους της κολοκυθιάς γίνεται κυρίως σε υποστρώματα πετροβάμβακα ή σε κοκκώδη υποστρώματα (π.χ. περλίτης, ίνες καρύδας-cocosoil) και υπάρχουν αναφορές ότι δίνει υψηλότερες αποδόσεις από την καλλιέργεια στο έδαφος (Rouphael et al., 2004). Προφανώς, λόγω του σύντομου καλλιεργητικού της κύκλου (διάρκεια συγκομιδής 2-3 μήνες) και του σχετικά μικρού μεγέθους της μπορεί να καλλιεργηθεί πιο εύκολα και σε συστήματα χωρίς υπόστρωμα όπως το NFT (Σάββας, 2012). Η πυκνότητα φύτευσης της κολοκυθιάς κυμαίνεται μεταξύ 1,5-2,2 φυτά/m<sup>2</sup>, συνήθως με 2 φυτά τοποθετημένα ανά σάκο υποστρώματος 1 m. Όσον αφορά την υποστύλωση και το κλάδεμα, όταν τα φυτά φθάσουν σε ένα ορισμένο ύψος, δένεται το κεντρικό στέλεχος με σπάγκο που στερεώνεται σε σύρμα πάνω από κάθε γραμμή φυτών. Στα φυτά της κολοκυθιάς δεν εφαρμόζεται κάποιο ιδιαίτερο κλάδεμα εκτός από την αφαίρεση παλιών γερασμένων φύλλων, ώστε να διευκολύνονται ο αερισμός, οι καλλιεργητικές εργασίες και η συγκομιδή των καρπών. Όσο αφορά τη θρέψη της κολοκυθιάς σε καλλιέργειες εκτός εδάφους έχουν δοθεί συστάσεις λίπανσης από διάφορους ερευνητές (De Kreij et al., 1999, Rouphael et al., 2006, Rouphael and Colla, 2009, Σάββας, 2012). Για την κολοκυθιά συστήνονται παρόμοιες τιμές EC στο διάλυμα τροφοδοσίας και ριζοστρώματος όπως στην αγγουριά (Sonneveld and Straver, 1994), όπου τιμές EC μεταξύ 1,4-3,0 dS m<sup>-1</sup> δεν φαίνεται να διαφοροποιούνται σημαντικά ως προς την επίδραση τους στην παραγωγή (Adams, 2002). Γενικά η κολοκυθιά θεωρείται μέτρια ανθεκτική στην αλατότητα (Rouphael et al., 2006) ενώ ο Savvas et al. (2009) αναφέρει ότι η ανύψωση της EC στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας από 2,1 σε 6,2 dS m<sup>-1</sup> αύξησε την EC στη ρίζα στα 8 dS m<sup>-1</sup> το οποίο μείωσε την παραγωγή κατά 65%. Εντούτοις, οι Rouphael et



al. (2006) και Bar-Yosef (2008) αναφέρουν τιμές-κατώφλι αλατότητας για το κολοκύθι και το αγγούρι (threshold EC values) γύρω στο  $4 \text{ dS m}^{-1}$  όταν ο χρόνος έκθεσης στην αλατότητα είναι σχετικά μικρός. Τέλος από τη γραμμομοριακή αναλογία K:Ca:Mg των φύλλων, βλαστών και καρπών φαίνεται ότι η κολοκυθιά κατά το βλαστικό στάδιο ανάπτυξης έχει μεγαλύτερες ανάγκες σε Ca και Mg και χαμηλότερες σε K σε σύγκριση με το στάδιο καρποφορίας. Αναλογίες μεταξύ των θρεπτικών στοιχείων και συνθέσεις θρεπτικών διαλυμάτων για εκτός εδάφους καλλιέργεια κολοκυθιάς δίνονται περιληπτικά από τον Σάββα (2012) και Savvas et al. (2013).



**Εικόνα 2.3.** Παραγωγική καλλιέργεια πεπονιάς σε σύστημα με ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος (Nutrient Film Technique-NFT).



**Εικόνα 2.4.** Αρχικό στάδιο καλλιέργειας κολοκυθιάς σε σύστημα με ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος (Nutrient Film Technique-NFT).

### 3. Γενική Μεθοδολογία

#### 3.1. Θερμοκήπιο

Τα πειράματα διεξήχθησαν στον πειραματικό σταθμό του Ινστιτούτου Γεωργικών Ερευνών της Κύπρου (γεωγραφικό πλάτος 34°44' Β/ γεωγραφικό μήκος 33°19' Α/ υψόμετρο 8 m) σε ένα πλαστικό πολλαπλό τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο με ύψος υδρορροής 3,3 m, κάτω από φυσικές συνθήκες φωτισμού. Ο σκελετός του θερμοκηπίου ήταν κατασκευασμένος από γαλβανισμένο σίδηρο, ενώ ως υλικό κάλυψης χρησιμοποιήθηκαν διαφανή φύλλα πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας (LDPE, αντισταγονικά, ανθεκτικά στην UV ακτινοβολία). Ο θάλαμος του θερμοκηπίου ήταν εξοπλισμένος με αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου του κλίματος. Διέθετε αερόθερμο για να διοχετεύει ζεστό αέρα με τη βοήθεια διάτρητων πλαστικών σωλήνων επί του εδάφους κατά μήκος του θερμοκηπίου και πλησίον των φυτών, ενώ παράλληλα διέθετε αυτόματο σύστημα δυναμικού αερισμού με τη χρήση ανεμιστήρων και φυσικού αερισμού με το αυτόματο άνοιγμα των παραθύρων οροφής και πλαϊνών. Όσον αφορά στο δροσισμό υπήρχε εγκατεστημένο σύστημα υγρής παρειάς. Το δάπεδο του θερμοκηπίου ήταν καλυμμένο από τσιμέντο. Ο προσανατολισμός του θερμοκηπίου ήταν Βορρά-Νότου. Σαν πειραματική μέθοδος για τους σκοπούς της διατριβής, στο χώρο του θερμοκηπίου (27 m μήκος × 21 m πλάτος) τοποθετήθηκαν 20 κανάλια ρηχού ρεύματος θρεπτικού διαλύματος (Nutrient Film Technique, NFT). Εκεί υπήρχαν 20 αντλίες παροχής θρεπτικού διαλύματος καθώς και δεξαμενές συλλογής/τροφοδοσίας (20) και συμπλήρωσης (20).



**Εικόνα 3.1.** Εξωτερικός και εσωτερικός χώρος πειραματικού θερμοκηπίου.

### 3.2. Τεχνική ανακύκλωσης θρεπτικού διαλύματος

Η τεχνική βασιζόταν σε μια προγραμματισμένη προσθήκη θρεπτικών στοιχείων (οι ποσότητες νερού και θρεπτικών στοιχείων που εισάγονται στο σύστημα είναι ίσες με αυτές που απορροφώνται από τα φυτά) αντί της προσθήκης τους με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος (Pardossi et al., 2002, Savvas 2002a, b). Μέσω της παραπάνω διαδικασίας εμπλουτιζόταν το θρεπτικό διάλυμα με θρεπτικά στοιχεία σε συγκεκριμένες δοσολογίες οι οποίες εκτιμάται ότι καλύπτουν επαρκώς τις ανάγκες των φυτών. Η κεφαλή υδρολίπανσης παρασκεύαζε με αυτό τον τρόπο θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης για κλειστό σύστημα (Nutrient Solution for Closed Systems) στο οποίο οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων ήταν ίσες με τις μέσες αναμενόμενες συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ, αναλογίες απορρόφησης μάζας θρεπτικού στοιχείου και όγκου νερού). Δηλαδή τα πυκνά διαλύματα των λιπασμάτων δεν προσθέτονταν στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας αλλά μέσω μιας κεφαλής υδρολίπανσης στο νερό άρδευσης και το θρεπτικό διάλυμα αποθηκευόταν στα δοχεία συμπλήρωσης. Από τα δοχεία συμπλήρωσης εισαγόταν με τη χρήση κατάλληλου εξοπλισμού αυτόματα στο δοχείο συλλογής-παροχής θρεπτικού διαλύματος αντί νερού και πυκνών διαλυμάτων, με στόχο την αναπλήρωση του νερού και των θρεπτικών στοιχείων που απορροφήθηκαν από τα φυτά. Κάθε δεξαμενή απορροής συνδεόταν με την αντίστοιχη δεξαμενή συμπλήρωσης. Αυτό γινόταν μέσω ενός πλωτήρα ώστε τελικά να διατηρείται σταθερός ο όγκος του θρεπτικού διαλύματος στο κλειστό σύστημα. Η ρύθμιση του pH (5,6) γινόταν μέσα στο δοχείο παροχής-συλλογής του θρεπτικού διαλύματος. Συνεπώς η ανάμειξη του διαλύματος συμπλήρωσης με το διάλυμα απορροής και η ρύθμιση του pH (προσθήκη  $\text{HNO}_3$  ή  $\text{KHCO}_3$ ) είχαν σαν αποτέλεσμα την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας το οποίο μεταφερόταν ξανά στην καλλιέργεια. Το σύστημα ήταν σε συνεχή λειτουργία όλο το εικοσιτετράωρο.



**Εικόνα 3.2.** Δοχεία συμπλήρωσης (άσπρα) και συλλογής-παροχής (μπλε) του θρεπτικού διαλύματος σε υδροπονική καλλιέργεια NFT.

### **3.3. Σύστημα καλλιέργειας σε ρηχό ρεύμα θρεπτικού διαλύματος (NFT)**

Με τη μέθοδο αυτή οι ρίζες των φυτών αναπτύσσονταν σε ένα ρηχό ρεύμα ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα παράλληλα τοποθετημένων μεταλλικών καναλιών (υδρορροών) από γαλβανισμένη λαμαρίνα (τύπου NFT) με κατεύθυνση B-N και κατά μήκος κλίση 1-2% στα οποία κυλούσε θρεπτικό διάλυμα με ρυθμό ροής περίπου 100-200 λίτρα ανά ώρα (2-4 λίτρα ανά λεπτό). Η λαμαρίνα επενδύθηκε με μονωτικό φύλλο πολυστερίνης, ενώ η τελική διαμόρφωση του καναλιού έγινε από μαλακό φύλλο PE, μαύρο εσωτερικά και λευκό εξωτερικά. Τα κανάλια τοποθετήθηκαν σε σιδερένιες βάσεις στο τσιμεντένιο δάπεδο του θερμοκηπίου. Το σχήμα των καναλιών ήταν ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με επίπεδο πυθμένα και οπές στην άνω επιφάνεια τους για ανάπτυξη των φυτών. Κάθε κανάλι (600 cm μήκος × 25 cm πλάτος × 10 cm ύψος) μπορούσε να φιλοξενήσει 12 φυτά σε κύβους πετροβάμβακα ακμής και οι αποστάσεις μεταξύ των καναλιών (διάδρομοι) ήταν 100 cm. Τα φυτά δημιουργούσαν ένα ριζικό πλέγμα στη βάση του καναλιού όπου στο κάτω μέρος περνούσε το ρεύμα του θρεπτικού διαλύματος ενώ το επάνω μέρος του, αν και υγρό, βρισκόταν περισσότερο στον αέρα. Συνεπώς, οι ρίζες ήταν σε θέση να προσλαμβάνουν τόσο νερό όσο θρεπτικά στοιχεία και οξυγόνο. Το κάθε κανάλι αποτελούσε μια ανεξάρτητη υδροπονική μονάδα όπου η συλλογή και συμπλήρωση του

θρεπτικού διαλύματος γινόταν με τη βοήθεια της βαρύτητας και η τροφοδοσία του με τη βοήθεια αντλιών. Ειδικότερα το θρεπτικό διάλυμα παρεχόταν στα φυτά με τη βοήθεια μιας αντλίας και ενός αγωγού μεταφοράς από μαλακό πολυαιθυλένιο 16 mm (Φ16) για να διατρέξει την υδρορροή από τη μια της άκρη μέχρι την άλλη. Το υπόλοιπο μέρος του διαλύματος, δηλαδή το θρεπτικό διάλυμα απορροής, επέστρεφε ξανά στο δοχείο τροφοδοσίας με τη δύναμη της βαρύτητας. Το δοχείο τροφοδοσίας ήταν ταυτόχρονα και δοχείο συλλογής χωρητικότητας 63 λίτρων (λειτουργικός όγκος 42 λίτρα). Το θρεπτικό διάλυμα που απορροφούσε η καλλιέργεια αναπληρωνόταν μέσω αυτόματης εισόδου (με τη βοήθεια πλωτήρων) θρεπτικού διαλύματος συμπλήρωσης από ένα δεύτερο δοχείο συμπλήρωσης χωρητικότητας 150 λίτρων (λειτουργικός όγκος 110 λίτρα), ώστε να διατηρείται η στάθμη του θρεπτικού διαλύματος στο δοχείο τροφοδοσίας σε ένα σταθερό ύψος (σταθερός όγκος θρεπτικού διαλύματος στο κλειστό σύστημα). Στις περιπτώσεις που τα θρεπτικά διαλύματα έναρξης (starter) και τα θρεπτικά διαλύματα συμπλήρωσης (replenishment) ήταν διαφορετικά, γέμιζαν τις δεξαμενές απορροής και συμπλήρωσης, αντίστοιχα.



**Εικόνα 3.3.** Παράλληλα τοποθετημένα μεταλλικά κανάλια (υδρορροές) τύπου NFT επενδυμένα από μαλακό φύλλο PE μαύρο εσωτερικά και λευκό εξωτερικά.

### 3.4. Φυτικό Υλικό - Συνθήκες ανάπτυξης

Για την υδροπονική καλλιέργεια της πεπονιάς (*Cucumis melo* L.) και της κολοκυθιάς (*Cucurbita pepo* L.) στο σύστημα NFT, τα φυτά σπάρθηκαν σε κύβους πετροβάμβακα (7.5×7.5 cm ή 5×5 cm) σε φυτώριο. Οι κύβοι ποτίστηκαν με θρεπτικό διάλυμα πριν τοποθετηθούν οι σπόροι και αργότερα ποτίζονταν τακτικά. Για το φύτευμα των σπόρων διατηρήθηκαν θερμοκρασίες φυτρώματος 25-30°C και το φύτευμα επιτυγχανόταν σε μερικές ημέρες. Ακολούθως η θερμοκρασία στο σπορείο διατηρήθηκε σε χαμηλότερα επίπεδα (20-24°C την ημέρα και 18-20°C την νύχτα και σχετική υγρασία 70-80%) και τα φυτά ήταν έτοιμα για μεταφύτευση στο στάδιο όπου το σπορόφυτο είχε εμφανίσει ριζίδια στο κάτω μέρος των κύβων (3-4 πραγματικά φύλλα). Γενικά η θερμοκρασία στο χώρο του θερμοκηπίου κυμαινόταν πάνω από 15°C και μέχρι τους 30°C και η σχετική υγρασία μεταξύ 60-80%. Η διάταξη των φυτών στο θερμοκήπιο έγινε σε απλές γραμμές και ο αριθμός των φυτών ανά τρέχον μέτρο καναλιού καθώς και το πλάτος των διαδρόμων μεταξύ των γραμμών ρυθμίστηκε κατάλληλα, ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή πυκνότητα φυτών. Η πυκνότητα φύτευσης κυμάνθηκε μεταξύ 2-2,5 φυτά/m<sup>2</sup>. Τα φυτά υποστυλώθηκαν κατακόρυφα με τη χρήση σπάγκου που στερεώθηκε σε οριζόντια σύρμα τοποθετημένο περίπου 2,0-2,2 m πάνω από δάπεδο του θερμοκηπίου. Ο σπάγκος προσδέθηκε στη βάση του φυτού και περιελισσόταν γύρω από τον κεντρικό βλαστό. Στην περίπτωση της πεπονιάς γινόταν συμπληρωματικό δέσιμο του βλαστού για να αποφευχθεί να γλιστρήσει ο βλαστός από τον σπάγκο λόγω του βάρους των καρπών. Το κλάδεμα σκοπό είχε την εξισορρόπηση της βλάστησης και της καρποφορίας, την αφαίρεση παλαιών γηρασμένων φύλλων και τη βελτίωση του αερισμού, φωτισμού και της ομοιογένειας των καρπών. Σε γενικές γραμμές οι τεχνικές κλαδέματος και υποστύλωσης είναι ίδιες με αυτές που εφαρμόζονται σε καλλιέργειες εδάφους στο θερμοκήπιο (Ολύμπιος, 2001). Για τη διευκόλυνση της γονιμοποίησης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της εισαγωγής εντόμων στο θερμοκήπιο, τα

οποία συμβάλλουν στη φυσική επικονίαση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η εισαγωγή «βομβίνων» (*Bombus terrestris*) στο θερμοκήπιο σε μορφή «αποικίας» μέσα σε ειδικές κυψέλες. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν φυτά πεπονιάς (*Cucumis melo* L.) τύπου «Galía» και φυτά «καλοκαιρινής» κολοκυθιάς (*Cucurbita pepo* L.) με καρπό ανοικτού πράσινου χρώματος. Η συγκομιδή των καρπών γινόταν στο στάδιο της εμπορικής ωριμότητας και ο έλεγχος των εχθρών (ακάρεα, αφίδες, αλευρώδης, θρίπας, φυλλορύκτες) και ασθενειών (οΐδιο, περονόσπορος, βοτρυτής) έγινε με βάση τις οδηγίες της ολοκληρωμένης φυτοπροστασίας και τις ορθές γεωργικές πρακτικές για θερμοκηπιακές καλλιέργειες κηπευτικών (FAO, 2013).



**Εικόνα 3.4.** Καλλιέργεια πεπονιάς και κολοκυθιάς σε κλειστό υδροπονικό σύστημα NFT.

### **3.5. Προσδιορισμός απορρόφησης θρεπτικών και μη-θρεπτικών στοιχείων με αναλύσεις θρεπτικών διαλυμάτων ή φυτικών ιστών**

Οι αναλογίες απορρόφησης των επιλεγμένων μακροθρεπτικών N, P, K, Ca και Mg όπως και του χλωρίου (Cl) και του νατρίου (Na) ως προς το νερό, οι οποίες αναφέρονται ως συγκεντρώσεις απορρόφησης – ΣΑ ( $UC$ ,  $\text{mmol L}^{-1}$ ), προσδιορίστηκαν με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος βασίστηκε στην απομάκρυνση των επιλεγμένων χημικών στοιχείων από το θρεπτικό διάλυμα σε συνδυασμό με την αντίστοιχη κατανάλωση νερού από τα φυτά. Οι μέσες ΣΑ ( $UC_x$ ,  $\text{mmol L}^{-1}$ ) των  $x$  θρεπτικών στοιχείων (δηλ.  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $H_2PO_4^-$ ), υπολογίστηκαν ακολουθώντας τον τύπο:



$$UC_x = [V_s \times (C_{xin} - C_{xf}) + V_w \times C_{xadd}] / V_w \quad (1)$$

όπου,  $V_s$  είναι ο όγκος του θρεπτικού διαλύματος που ανακυκλώνεται σε κάθε υδροπονική μονάδα (L),  $V_w$  είναι η αθροιστική κατανάλωση νερού από τα φυτά (L) για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Στο ίδιο χρονικό διάστημα  $C_{xin}$  και  $C_{xf}$  ( $\text{mmol L}^{-1}$ ) είναι η αρχική και η τελική συγκέντρωση του θρεπτικού στοιχείου  $x$  στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα, αντίστοιχα. Τέλος, με  $C_{xadd}$  συμβολίζεται η συγκέντρωση του θρεπτικού στοιχείου  $x$  στο θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης ( $\text{mmol L}^{-1}$ ).

Ο δεύτερος τρόπος βασίστηκε στην ανάκτηση των στοιχείων από τη ξηρή βιομάζα συμπεριλαμβανομένων και των κλαδεμάτων ανά μονάδα όγκου νερού που καταναλωνόταν. Ειδικότερα, οι μέσες ΣΑ των θρεπτικών στοιχείων ( $UC_{xu}$  σε  $\text{mmol L}^{-1}$ , όπου  $x = \text{K, Ca, Mg, N, P}$ ) υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$UC_{xu} = (C_{xr} \times B_r + \sum C_{xsi} \times B_{si} + \sum C_{xli} \times B_{li} + \sum C_{xfi} \times B_{fi}) / V_w \quad (2)$$

όπου  $C_{xr}$ ,  $C_{xsi}$ ,  $C_{xli}$ , και  $C_{xfi}$  συμβολίζουν τις συγκεντρώσεις ( $\text{mmol g}^{-1}$ ) των μακροστοιχείων ( $x = \text{K, Ca, Mg, N, P}$ ) στη ρίζα, βλαστό, φύλλα και καρπό, αντίστοιχα,  $B_r$ ,  $B_{si}$ ,  $B_{li}$ , και  $B_{fi}$  συμβολίζουν το ξηρό βάρος ( $\text{g plant}^{-1}$ ) της ρίζας, βλαστού, φύλλων και καρπού, αντίστοιχα, και  $V_w$  συμβολίζει την κατανάλωση νερού από τα φυτά ( $\text{L plant}^{-1}$ ) κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονοδιαστήματος. Ο δείκτης  $i$  απεικονίζει τις διαδοχικές ( $i = 1 \dots n$ ) ημερομηνίες αφαίρεσης φυτικού υλικού κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Για το σκοπό αυτό ολόκληρα φυτά και δείγματα (150-200 ml) από τα θρεπτικά διαλύματα από κάθε πειραματική μονάδα συλλέγονταν διαδοχικά σε συγκεκριμένες ημερομηνίες (ίσα χρονικά διαστήματα) κατά τη διάρκεια ολόκληρης της περιόδου καλλιέργειας των φυτών. Καθημερινά ή κάθε 2 μέρες γινόταν καταγραφή της κατανάλωσης του διαλύματος από τα βαθμονομημένα (με κατακόρυφη κλίμακα) δοχεία συμπλήρωσης ώστε να υπολογιστεί η κατανάλωση του θρεπτικού διαλύματος σε κάθε πειραματική μονάδα

ενώ παράλληλα καταγράφονταν η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), το pH και η θερμοκρασία του θρεπτικού διαλύματος (Multimeter MM40+, Crison Instruments, Spain).

Αντιπροσωπευτικά δείγματα των φυτικών ιστών ξηράθηκαν στους 72°C μέχρι απόκτησης σταθερού βάρους. Ακολούθως, τα ξηρά δείγματα αλέστηκαν σε μύλο ώστε να περνούν από κόσκινο 40 mesh. Η συγκέντρωση του οργανικού αζώτου στους φυτικούς ιστούς προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Kjeldahl (Mills and Jones, 1996) με τιτλοδότηση του δεσμευμένου NH<sub>4</sub>-N σε διάλυμα βορικού οξέος (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> στον αυτόματο αναλυτή Kjeltac 2400. Πριν τη διαδικασία των μετρήσεων, λήφθηκαν αντιπροσωπευτικά δείγματα από τους αλεσμένους φυτικούς ιστούς για τη διαδικασία της χώνευσης (πέψης) και την εκχύλιση των στοιχείων Ca, Mg, K, Na και P η οποία περιελάμβανε την υγρή οξείδωση της οργανικής ουσίας με τη χρήση υψηλών θερμοκρασιών και ισχυρών οξέων. Τα οξέα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν τη διαδικασία περιελάμβαναν το νιτρικό (HNO<sub>3</sub>), το θειικό (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), και υπερχλωρικό (HClO<sub>4</sub>) οξύ τα οποία χρησιμοποιήθηκαν μόνα τους ή σε συνδυασμό. Η χρησιμοποίηση του υπερχλωρικού (HClO<sub>4</sub>) ή του υπεροξειδίου του υδρογόνου (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) εφαρμόστηκε για την επιτάχυνση και ολοκλήρωση της διαδικασίας της χώνευσης (Kalra, 1998). Για τη μείωση του χρόνου της διαδικασίας της υγρής χώνευσης χρησιμοποιήθηκε επίσης ειδική συσκευή μικροκυμάτων (CEM microwave digestion). Μετά τη χώνευση ακολουθούσαν κατάλληλες αραιώσεις για τον προσδιορισμό των επιλεγμένων στοιχείων με τη μέθοδο της φασματοφωτομετρίας ατομικής απορρόφησης (Ca, Mg), με φλογοφωτομετρία (K, Na) και με τη μέθοδο του φωσφορομολυβδαινικού αμμωνίου (P) με βάση τις μεθόδους οι οποίες περιληπτικά αναφέρονται στις εκδόσεις των Plank (1992), Kalra (1998) και Estefan et al. (2013). Στα υδατικά διαλύματα και φυτικούς ιστούς οι συγκεντρώσεις ασβεστίου (Ca) και μαγνησίου (Mg) προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο φασματοφωτομετρίας ατομικής απορρόφησης (Solaar M Series, Thermo Elemental, Cambridge, UK). Ο φώσφορος (P) στους ιστούς και τα διαλύματα μετρήθηκε

χρωματομετρικά με τη μέθοδο του φωσφορομολυβδαινικού αμμωνίου στα 470 nm (yellow complex) και 680 nm (blue complex), αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας φασματοφωτόμετρο υπεριώδους-ορατού (UV/VIS, Lambda 35, Perkin Elmer, Waltham, MA, USA) και οι συγκεντρώσεις καλίου (K) και νατρίου (Na) μετρήθηκαν με τη βοήθεια φλογοφωτομέτρου τύπου Sherwood Model 420 (Sherwood Scientific, Cambridge, UK). Η συγκέντρωση του χλωρίου  $\text{Cl}^-$  στα θρεπτικά διαλύματα και τα υδατικά εκχυλίσματα των φυτικών ιστών (Savvas et al., 2011) προσδιορίστηκε με ογκομέτρηση με νιτρικό άργυρο ( $\text{AgNO}_3$ ) με παρουσία χρωμικού καλίου ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ , Eaton, 2005). Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ( $\text{NO}_3^-$ ), θειικών ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) και αμμωνιακών ( $\text{NH}_4^+$ ) ιόντων στα υδατικά διαλύματα προσδιορίστηκαν στο φασματοφωτόμετρο υπεριώδους - ορατού στα 220, 420 και 653 nm, αντίστοιχα. Ακολούθως, η συγκέντρωση των αμμωνιακών ( $\text{NH}_4^+$ ) προστέθηκε σε αυτήν των νιτρικών ιόντων ( $\text{NO}_3^-$ ) για να υπολογιστεί η συνολική συγκέντρωση απορρόφησης-ΣΑ (UC) του αζώτου (N).

### 3.6. Μεθοδολογίες εργαστηριακών μετρήσεων

Η παραγωγή βιομάζας ανά φυτό εκτιμήθηκε από μετρήσεις του νωπού και ξηρού βάρους ολόκληρων των φυτών συμπεριλαμβανομένου και των κλαδεμάτων. Επίσης μετρήσεις έγιναν σε φυσιολογικές παραμέτρους των φυτών στα πιο πρόσφατα πλήρως αναπτυγμένα φύλλα από την κορυφή. Για τον προσδιορισμό της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτών [δηλ. καθαρός ρυθμός φωτοσύνθεσης (A), στοματική αγωγιμότητα ( $g_s$ ), συγκέντρωση  $\text{CO}_2$  στους μεσοκυττάριους χώρους (Ci), και ρυθμός διαπνοής (E)], χρησιμοποιήθηκε η συσκευή μέτρησης φωτοσυνθετικών παραμέτρων Li-6400 (Li-Cor, Lincoln, NE, USA). Η συσκευή αποτελείται από τρία μέρη: το θαλαμίσκο του φύλλου, τον αναλυτή αερίων με τη χρήση υπερύθρων (Infrared Gas Analyzer-IRGA) και την κονσόλα ελέγχου. Ο αναλυτής συνδέεται με το θαλαμίσκο στον οποίο εισέρχεται το φύλλο

χωρίς να αποκοπεί και η αντλία κυκλοφορεί αέρα από τον θαλαμίσκο στον αναλυτή όπου η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O (υδρατμών) μετράται και επιστρέφει πίσω στον θαλαμίσκο. Έτσι οι ποσοτικές μεταβολές στις συγκεντρώσεις των αερίων συναρτήσει του χρόνου χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό και με άλλες μετρήσεις π.χ. θερμοκρασίας φύλλου, αέρα, έντασης του φωτός, ατμοσφαιρικής πίεσης, επιφάνειας φύλλου και κατανομής των στοματιών, από ειδικό υπολογιστικό πρόγραμμα της κονσόλας ελέγχου βασιζόμενο στις εξισώσεις των Von Caemmerer and Farquhar (1981) για τον υπολογισμό των παραμέτρων ανταλλαγής αερίων. Η αποτελεσματικότητα χρήσης νερού (Water Use Efficiency-WUE) αποτελούσε το λόγο της αφομοίωσης του CO<sub>2</sub> (A) προς τη διαπνοή (E). Επίσης στα ίδια φύλλα μετρήθηκαν φωτοχημικές παράμετροι του φύλλου όπως ο χημικός προσδιορισμός της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη χρησιμοποιώντας εκχυλιστικό ακετόνη (80% κ.ο.) και τη μέγιστη απορρόφηση κάθε χρωστικής στα 664 nm (Chla), 648 nm (Chlb) και 470 nm (Carotenoids) με βάση τις εξισώσεις του Lichtenthaler (1987) και ο οπτικός προσδιορισμός της χλωροφύλλης (τιμές SPAD, SPAD-502-Konica Minolta). Ο φθορισμός της χλωροφύλλης (φωτοχημική απόδοση του φωτοσυστήματος II - δείκτης Fv/Fm, Maxwell and Johnson, 2000) μετρήθηκε με το φθορισμόμετρο OS-30p (Opti-Sciences, Hudson, USA), και ο μέγιστος ρυθμός μεταφοράς ηλεκτρονίων (electron transport rate-ETR) που αφορούν το φωτοσύστημα II (μη κυκλική ροή ηλεκτρονίων, Baker, 2008) υπολογίστηκε με βάση τη φωτοσυνθετικά ενεργό ακτινοβολία, το δείκτη Fv/Fm ακολουθώντας την εξίσωση όπως αναφέρεται από τον Schreiber et al. (1994). Ακολούθως για την αξιολόγηση της υδατικής κατάστασης του φυτού προσδιορίστηκαν οι υδατικές σχέσεις του φυτού και ειδικότερα, το υδατικό δυναμικό των φύλλων ( $\Psi_w$ ) και το ωσμωτικό δυναμικό ( $\Psi_\pi$ ) χρησιμοποιώντας το θάλαμο πίεσης SKPM 1400 (Skye Instruments Ltd, Llandrindod, UK), τη συσκευή μέτρησης WP4-T (Decagon Devices, Pullman, WA, USA) και το ψυχρόμετρο HR-33T (Wescor Inc., Logan, UT, USA). Το δυναμικό σπαργής ( $\Psi_p$ ) υπολογίστηκε από τη διαφορά μεταξύ

ωσμωτικού και υδατικού δυναμικού ( $\Psi_{\pi}$  -  $\Psi_w$ , Koide et al., 1991) ενώ η σχετική περιεκτικότητα των φύλλων σε νερό (Relative Water Content-RWC) σε σχέση με τη μέγιστη ενυδάτωση τους (βαθμός ενυδατώσεως) υπολογίστηκε όπως αναφέρεται από τον Larcher (1980).



**Εικόνα 3.5.** Συσκευή μέτρησης φωτοσυνθετικών παραμέτρων (LI-COR 6400) των φυτών και όργανο μέτρησης της EC και του pH του θρεπτικού διαλύματος.

Οι καρποί συγκομίζονταν στο στάδιο της εμπορικής ωριμότητας και προσδιορίστηκε η καρπική απόδοση (ολική, εμπορεύσιμη και μέσο βάρος καρπού) και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά (διαλυτά στερεά, pH, ογκομετρούμενη οξύτητα, ξηρή ουσία, ασκορβικό οξύ, ολικές φαινολικές ουσίες, συνολική αντιοξειδωτική ικανότητα, αναγωγικά σάκχαρα, συγκέντρωση νιτρικών). Αρχικά προσδιορίστηκε η συνεκτικότητα σάρκας ( $\text{Nt cm}^{-2}$ , πενετρόμετρο τύπου FT-327 με ακίδα 8mm, Wagner Instruments, Italy) και ακολούθως ομογενοποιήθηκε ολόκληρο το εδάδιμο μέρος των καρπών και μετρήθηκαν τα διαλυτά στερεά ( $^{\circ}\text{Brix}$ , Atago PR-1, Tokyo, Japan), το pH (pH-μέτρο Mettler Toledo, Switzerland), η ογκομετρούμενη οξύτητα (τιτλοδότηση με διάλυμα καυστικού νατρίου έως pH 8.2, % citric acid) και ξηρή ουσία (%DM, ξήρανση στους  $70^{\circ}\text{C}$ ). Για τα υπόλοιπα ποιοτικά χαρακτηριστικά οι καρποί διατηρούνταν-καταψύχονταν μέχρι την ημερομηνία ανάλυσης. Ο ποσοτικός προσδιορισμός των φαινολικών ουσιών (φασματοφωτομετρικά στα 760 nm, UV-Vis Helios Zita, Thermo Fisher Scientific) πραγματοποιήθηκε σε εκχύλισμα πολτοποιημένου δείγματος (5 g) με διάλυμα ακετόνης (acetone/water/acetic acid 70:29.5:0.5, v:v:v) με τη

μέθοδο των Folin-Ciocalteu και τα αποτελέσματα εκφράστηκαν σε ισοδύναμα γαλλικού οξέος (mg GAE) ως πρότυπη φαινόλη ανά μονάδα (g) νωπού βάρους (Scalbert et al., 1989). Ποσότητα από το τελικό εκχύλισμα χρησιμοποιήθηκε επίσης για την εκτίμηση της συνολικής αντιοξειδωτικής ικανότητας των καρπών (φασματοφωτομετρικά στα 593 nm) με τη δοκιμή αντιοξειδωτικής ισχύος αναγωγής του τρισθενούς σιδήρου (ferric reducing antioxidant power-FRAP, Benzie and Strain, 1996, 1999). Ως πρότυπη αντιοξειδωτική ουσία χρησιμοποιήθηκε το ασκορβικό οξύ ( $\mu\text{M}$  AA) και τα αποτελέσματα ανάχθηκαν ανά μονάδα (g) νωπού βάρους. Όταν χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος εκτίμησης της αντιοξειδωτικής ικανότητας εκκαθάρισης ελευθέρων ριζών DPPH (Brand-Williams et al., 1995), η εκχύλιση των αντιοξειδωτικών από το δείγμα έγινε με μεθανόλη ενώ χρησιμοποιήθηκαν πρότυπα διαλύματα ασκορβικού οξέος, το αντιδραστήριο DPPH (diphenylpicrylhydrazyl) και η απορρόφηση μετρήθηκε στα 517 nm. Τα αποτελέσματα εκφράστηκαν σε ισοδύναμα ασκορβικού οξέος (AEAC, mg AA ανά 100g νωπού βάρους). Η περιεκτικότητα των καρπών σε ασκορβικό οξύ (mg AA ανά 100g νωπού βάρους) και τα αναγωγικά σάκχαρα (mg Glucose+Fructose ανά μονάδα (g) νωπού βάρους) προσδιορίστηκαν με ανακλασίμετρο Merck RQflex σύμφωνα με τα πρωτόκολλα της εταιρείας Merck (Darmstadt, Germany). Η περιεκτικότητα νιτρικών στους καρπούς [ $\text{mg NO}_3$  ανά μονάδα (kg) νωπού βάρους] προσδιορίστηκε με τη μέθοδο του σαλικυλικού οξέος (Cataldo et al., 1974). Η επίδραση των πειραματικών μεταχειρίσεων στην αύξηση των φυτών προσδιορίστηκε μετρώντας την παραγωγή νωπού και ξηρού βάρους σε δύο φυτά από κάθε πειραματική μονάδα στο τέλος των πειραμάτων, λαμβάνοντας υπόψη και όλα τα κλαδέματα μέχρι την ημερομηνία αυτή. Εμπορεύσιμοι θεωρήθηκαν οι καρποί με αποδεκτό χρώμα και ποιότητα κατά τη συγκομιδή και μη εμπορεύσιμοι οι ατελώς ή κακώς σχηματισμένοι.

Η μέση ημερήσια θερμοκρασία και σχετική υγρασία στο θερμοκήπιο διατηρήθηκε μεταξύ 15-30°C και 60-80%, αντίστοιχα, ενώ γενικά η συνολική ενέργεια που δεχόταν το

θερμοκήπιο ανά ημέρα μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας είχε μέση τιμή  $18.6 \text{ MJ m}^{-2}$ . Τα κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής κατά τη διάρκεια του έτους, όπως καταγράφηκαν από το τμήμα Μετεωρολογίας Κύπρου, παρατίθενται στον πιο κάτω πίνακα.

**Πίνακας 3.1.** Μέση ελάχιστη θερμοκρασία (ΜΕΘ), μέση μέγιστη θερμοκρασία (ΜΜΘ), μέση σχετική υγρασία (ΜΣΥ), ολική ηλιακή ακτινοβολία (ΟΗΑ) και μέση ημερήσια ηλιοφάνεια (ΜΗΗ) κατά μήνα σε όλη τη διάρκεια του έτους.

Μήνας	ΜΕΘ (°C)	ΜΜΘ (°C)	ΜΣΥ (%)	ΟΗΑ ( $\text{MJ m}^{-2}$ )	ΜΗΗ (ώρες)
Ιανουάριος	8,6	19,7	78	9,4	6,3
Φεβρουάριος	8,9	20,9	76	12,3	7,2
Μάρτιος	10,4	22,6	71	17,4	7,7
Απρίλιος	12,2	25,8	63	21,6	8,9
Μάιος	15,3	27,5	60	25,8	10,7
Ιούνιος	18,8	31,9	62	27,9	12,6
Ιούλιος	18,8	33,3	65	27,3	12,5
Αύγουστος	19,2	33,3	66	24,6	11,8
Σεπτέμβριος	17,2	28,8	59	20,9	10,4
Οκτώβριος	14,3	28,2	60	15,5	8,9
Νοέμβριος	13,5	25,3	70	11,5	7,2
Δεκέμβριος	9,0	19,7	79	8,7	5,8

#### **4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ I. «Επίδραση της αναλογίας των μακροκατιόντων (K:Ca:Mg) στην απορρόφηση θρεπτικών μακροστοιχείων και νερού από την πεπονιά (*Cucumis melo*) σε υδροπονικό σύστημα με συνεχή ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος»**

##### **4.1. Εισαγωγή**

Οι αναλογίες απορρόφησης νερού και θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά (συγκεντρώσεις απορρόφησης - ΣΑ) έχουν πολύ μεγάλη αξία στην ανάπτυξη προσομοιωμάτων για την απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων και την εκτίμηση των λιπαντικών αναγκών των φυτών (βλέπε υποενότητα 2.7). Εντούτοις, οι διαφορετικές κλιματικές συνθήκες, οι καλλιεργητικοί χειρισμοί και οι πρακτικές θέρμανσης των θερμοκηπίων μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στις αναλογίες απορρόφησης νερού και θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά (Adams, 2002, Papadopoulos and Hao, 2002). Για το σκοπό αυτό, ο προσδιορισμός μέσω ΣΑ για ένα φυτό με στόχο τη χρησιμοποίησή τους ως βάση για την κατάστρωση θρεπτικών διαλυμάτων με κατάλληλη σύσταση για κλειστά υδροπονικά συστήματα κάτω από Μεσογειακές συνθήκες, είναι αναγκαίος τόσο για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της ποιότητας των προϊόντων, όσο και για τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς που προκαλεί η απόρριψη του κλάσματος απορροής στο περιβάλλον.

Όπως αναφέρεται στην υποενότητα 2.11, η ανακύκλωση των θρεπτικών διαλυμάτων στην υδροπονία σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από ξηρό και ημίξηρο κλίμα συχνά παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης αλάτων στο φυσικό νερό άρδευσης και κατ' επέκταση στα θρεπτικά διαλύματα (Bar-Yosef, 2008). Επίσης αναφέρεται ότι για να αποφευχθεί ή τουλάχιστο να ελαχιστοποιηθεί η συσσώρευση NaCl στο διάλυμα ανακύκλωσης, κατάλληλα προσομοιώματα και στρατηγικές έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν (Baas et al., 1995, Sonneveld, 2002, Carmassi et al., 2003, Kempkes and



Stanghellini, 2003, Savvas et al., 2005a, 2007, Bar-Yosef, 2008). Ωστόσο, υπερβολικά υψηλές συγκεντρώσεις  $\text{Ca}^{2+}$  στο αρδευτικό νερό και ακολούθως στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας, οι οποίες υπερβαίνουν τις συγκεντρώσεις απορρόφησης βαθμιαία οδηγούν σε επίπεδα  $\text{Ca}^{2+}$  στο χώρο των ριζών που προκαλούν αλατούχο καταπόνηση. Η κατάσταση αυτή δεν έχει επαρκώς μελετηθεί και ειδικότερα σε καλλιέργεια πεπονιάς, παρόλο που το πρόβλημα αυτό δεν είναι σπάνιο στη Μεσογειακή λεκάνη λόγω της αυξημένης διαλυτοποίησης του εδαφικού Ca και αντίστοιχα υψηλών συγκεντρώσεων στα υπόγεια νερά (Neocleous and Savvas, 2013b). Αν δεν υπάρχει εναλλακτική πηγή άρδευσης, οι παραγωγοί περιοδικά απορρίπτουν μέρος ή ολόκληρο το ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα βασιζόμενοι στη μέτρηση ορισμένων χαρακτηριστικών του διαλύματος απορροής, μειώνοντας όμως έτσι την αποτελεσματικότητα χρήσης νερού και λιπασμάτων (Massa et al., 2008).

Επίσης στην υποενότητα 2.4 αναφέρεται ότι οι αναλογίες των μακροκατιόντων στα θρεπτικά διαλύματα επηρεάζουν σημαντικά την απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων και τις αποδόσεις των εκτός εδάφους καλλιεργειών (Grattan and Grieve, 1999, Adams, 2002, Sonneveld, 2002, San Bautista et al., 2009). Έτσι το ερώτημα που φυσιολογικά τίθεται είναι, σε τι βαθμό επηρεάζουν οι αυξημένες συγκεντρώσεις  $\text{Ca}^{2+}$  στο χρησιμοποιούμενο αρδευτικό νερό και της συνεπακόλουθης αύξησης του  $\text{Ca}^{2+}$  στα θρεπτικά διαλύματα, τις συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) των υπόλοιπων θρεπτικών μακροστοιχείων από τα φυτά στα κλειστά συστήματα. Ένα δεύτερο ερώτημα είναι κατά πόσον η υπερβολική συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας των φυτών είναι περισσότερο βλαπτική όταν: (1) οι συγκεντρώσεις  $\text{K}^+$  και  $\text{Mg}^{2+}$  αυξάνονται ανάλογα ώστε να διατηρηθεί η συνιστώμενη αναλογία  $\text{K}^+ : \text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$  στόχος ή (2) οι συγκεντρώσεις  $\text{K}^+$  και  $\text{Mg}^{2+}$  δεν αυξάνονται και έτσι η σχετική αναλογία  $\text{K}^+ : \text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα διαφοροποιείται από την επιθυμητή λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης  $\text{Ca}^{2+}$ . Τα ερωτήματα αυτά είναι πρακτικής σημασίας σε συστήματα υποστήριξης λήψης αποφάσεων (decision support systems-DSS) τα

οποία χρησιμοποιούνται για την αυτόματη παροχή θρεπτικών στοιχείων στις καλλιέργειες ενώ ταυτόχρονα λαμβάνονται υπόψη οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί.

Η καλλιέργεια της πεπονιάς (*Cucumis melo* L.) είναι ευρύτατα διαδεδομένη στην περιοχή της Μεσογείου, όπου χαμηλότερης ποιότητας νερά συχνά χρησιμοποιούνται ως πηγή άρδευσης στις καλλιέργειες (Bar-Yosef, 2008). Η πεπονιά είναι λιγότερο ευαίσθητη σε σύγκριση με τα περισσότερα καρποδοτικά λαχανικά θερμοκηπίου και η ελεγχόμενη αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) στο περιβάλλον των ριζών σε ελαφρώς υψηλότερα επίπεδα από τα επιθυμητά για βέλτιστη αύξηση και ανάπτυξη, μπορεί να επιφέρει σημαντική βελτίωση στην ποιότητα των καρπών (Colla et al., 2006). Για τους λόγους αυτούς, η καλλιέργεια πεπονιάς τύπου 'Galia' (muskmelons) σε υδροπονικά συστήματα με συνεχή ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος, μπορεί να αποτελέσει εναλλακτική επιλογή για τους καλλιεργητές θερμοκηπίου υπό το πρίσμα της υιοθέτησης πολιτικών πλήρους επαναχρησιμοποίησης των απορροών αλλά και του αυξημένου κόστους λίπανσης στις υδροπονικές καλλιέργειες.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω δεδομένα, οι αναλογίες απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων και νερού (συγκεντρώσεις απορρόφησης - ΣΑ) για πέντε θρεπτικά μακροστοιχεία (N, P, K, Ca και Mg) προσδιορίστηκαν σε εκτός εποχής (χειμερινή) καλλιέργεια πεπονιάς με συνεχή ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος (καλλιέργεια σε ρηχό ρεύμα θρεπτικού διαλύματος, Nutrient Film Technique - NFT, βλέπε Savvas et al., 2013). Επιπρόσθετα με το τυπικό θρεπτικό διάλυμα (μάρτυρας) το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την καλλιέργεια της πεπονιάς σε κλειστό υδροπονικό σύστημα, δύο άλλα θρεπτικά διαλύματα (τα οποία διέφεραν στη συγκέντρωση  $Ca^{2+}$  από το μάρτυρα και κατ'επέκταση είτε στην γραμμομοριακή αναλογία  $K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+}$  ή στις συγκεντρώσεις  $K^+$  και  $Mg^{2+}$ ) είχαν χρησιμοποιηθεί ως πειραματικές επεμβάσεις. Εκτός από τις ΣΑ των θρεπτικών μακροστοιχείων, προσδιορίστηκε η κατανάλωση νερού, οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών μακροστοιχείων στο περιβάλλον της

ρίζας και στους φυτικούς ιστούς, φωτοσυνθετικές παράμετροι και επίπεδα χλωροφύλλης στα φύλλα καθώς και η απόδοση σε καρπό όπως και ορισμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά των καρπών.

## **4.2. Υλικά και Μέθοδοι**

### **4.2.1. Πειραματική εγκατάσταση και φυτικό υλικό**

Η πειραματική εργασία πραγματοποιήθηκε σε θερμοκήπιο όπως περιγράφεται στην υποενότητα 3.1. Σπορόφυτα πεπονιάς (*Cucumis melo* L.) τύπου ‘Galia’ (cv. Dikti F<sub>1</sub>, Rijk Zwaan), τα οποία εμφανίζουν δικτύωση στην επιφάνεια του καρπού, εμβολιάστηκαν στο υποκείμενο κολοκυθιάς ‘RS 841’ (*C. maxima* × *C. moschata*), όπως συχνά συνηθίζεται από τους ντόπιους παραγωγούς. Σε ένα σύγχρονο εμπορικό φυτώριο της Κύπρου (Solomou Nurseries Ltd., Cyprus), έγινε σπορά του εμβολίου και του υποκειμένου στις 26 Σεπτεμβρίου, 2012 σε ειδικούς κύβους πετροβάμβακα για παραγωγή σποροφύτων (50 mm × 40 mm). Ο εμβολιασμός έγινε στις 16 Οκτωβρίου, 2012 σύμφωνα με την τεχνική εμβολιασμού δια προσεγγίσεως (πλάγιος εμβολιασμός), όπου στο εμβόλιο και στο υποκείμενο γίνεται ανάλογη λοξή τομή και στη συνέχεια συνενώνονται τα δύο φυτάρια ώστε τα χείλη των τομών να ενωθούν μεταξύ τους (‘tongue approach grafting’, βλέπε Lee, 1994) με ειδικό μανταλάκι. Στη συνέχεια ακολούθησε αφαίρεση του μέρους του υποκειμένου και του εμβολίου πάνω και κάτω από το σημείο της ένωσης, αντίστοιχα, σε χρονικό διάστημα 15 ημερών από τον εμβολιασμό. Ακολούθως, τα εμβολιασμένα σπορόφυτα μεταφέρθηκαν στο στάδιο των τεσσάρων πραγματικών φύλλων σε εννέα κανάλια ρηχού ρεύματος θρεπτικού διαλύματος (κλειστές υδροπονικές μονάδες τύπου NFT) με συνεχή ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος στις 11 Νοεμβρίου 2012. Σε κάθε κανάλι (βλέπε υποενότητα 3.3) μεταφέρθηκαν δώδεκα φυτά πεπονιάς. Οι υδροπονικές μονάδες τοποθετήθηκαν σε αποστάσεις 1 m μεταξύ τους, ώστε τελικά να προκύπτει πυκνότητα φύτευσης 2,0 φυτά/m<sup>2</sup>.

Οι εξωτερικές γραμμές φύτευσης χρησιμοποιήθηκαν για τον αποκλεισμό τυχόν παράπλευρης επίδρασης στις πειραματικές επεμβάσεις. Τα φυτά υποστυλώθηκαν κατακόρυφα με τη χρήση σπάγκου και στερεώθηκαν σε οριζόντιο σύρμα 2,0 m πάνω από τη γραμμή φύτευσης (βλέπε υποενότητα 3.4). Όλοι οι πλάγιοι βλαστοί και τα άνθη αφαιρούνταν μέχρι του ύψους 60 cm ενώ ο κεντρικός βλαστός κορυφολογήθηκε όταν πέρασε το οριζόντιο σύρμα κατά δύο φύλλα με δέσιμο της κορυφής επί του οριζοντίου σύρματος. Έτσι αναπτύχθηκε ένα μονοστέλεχο σύστημα με καρποφόρους βλαστούς πάνω από το ύψος των 60 εκατοστών με καλό αερισμό και είσοδο του φωτός στη φυλλική περιοχή. Η επικονίαση των φυτών γινόταν με βομβίνους ενώ αφήθηκαν να ωριμάσουν μόνο δύο καρποί ανά φυτό. Στα φυτά έγινε επέμβαση με το μυκητοκτόνο σκεύασμα Bayfidan (Triadimenol, Bayer CropScience, Monheim, Germany) τη 2<sup>η</sup> και 4<sup>η</sup> εβδομάδα μετά τη μεταφύτευση για τον έλεγχο του ωιδίου και με το μυκητοκτόνο Aliette (Fosetyl-Al, Bayer CropScience) την 6<sup>η</sup>, 8<sup>η</sup>, και 12<sup>η</sup> εβδομάδα από τη μεταφύτευση για τον έλεγχο του περονοσπόρου (*Peronospora cubensis*). Οι προσβολές από έντομα περιορίστηκαν με δύο ψεκασμούς χρησιμοποιώντας το εντομοκτόνο σκεύασμα Confidor (Imidacloprid, Bayer CropScience).

Στο πείραμα εφαρμόστηκαν τρεις επεμβάσεις οι οποίες αντιστοιχούσαν σε τρία διαφορετικά θρεπτικά διαλύματα συμπλήρωσης για κλειστό σύστημα (ΘΔΣ). Οι τρεις επεμβάσεις κατανεμήθηκαν σε τυχαιοποιημένο σχέδιο πλήρων ομάδων με τρεις επαναλήψεις για κάθε μεταχείριση. Η κάθε επανάληψη περιελάμβανε μια ανεξάρτητη κλειστού τύπου υδροπονική μονάδα (κανάλι ρηχού ρεύματος θρεπτικού διαλύματος - NFT). Η παροχή του θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας γινόταν με ρυθμούς ροής 0,1 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> σε κάθε κανάλι με συνεχή ανακύκλωση όλο το 24ωρο και ο όγκος του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος (ΑΚΘΔ) ανά φυτό αντιστοιχούσε σε 3 L σε όλες τις πειραματικές επεμβάσεις. Η τεχνική της ανακύκλωσης και το σύστημα καλλιέργειας περιγράφονται αναλυτικά στις υποενότητες 3.2 και 3.3. Η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος εκκίνησης (ΘΔΕ, Πίνακας 4.1), δηλαδή του

θρεπτικού διαλύματος που αρχικά είχε εισαχθεί στο σύστημα παροχής-συλλογής αλλά και μετά από κάθε απόρριψη θρεπτικού διαλύματος κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας, ήταν ίδια σε όλες τις επεμβάσεις. Οι επεμβάσεις αντιστοιχούσαν σε διαφορετικές συγκεντρώσεις των θρεπτικών μακροκατιόντων στο θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης (ΘΔΣ, Πίνακας 4.1). Η μεταχείριση Α αντιστοιχούσε σε ένα τυπικό θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης κατάλληλο για την πεπονιά με βάση τις συστάσεις των Sonneveld and Straver (1994), το οποίο περιελάμβανε 6,5 mM  $K^+$ , 2,8 mM  $Ca^{2+}$ , και 1,0 mM  $Mg^{2+}$  (αναλογία  $K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+}$  ίση με 0,63: 0,27: 0,10 σε γραμμομοριακή βάση) και είχε ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) 1,74 dS  $m^{-1}$ . Η μεταχείριση Β αντιστοιχούσε σε θρεπτικό διάλυμα με αυξημένη συγκέντρωση  $Ca^{2+}$  (4,2 mM) και τις ίδιες συγκεντρώσεις  $K^+$  και  $Mg^{2+}$  όπως στη μεταχείριση Α (μάρτυρα), με τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) ίση με 2,0 dS  $m^{-1}$ . Επομένως, η γραμμομοριακή αναλογία  $K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+}$  μεταβλήθηκε σε 0,55: 0,36: 0,09. Η μεταχείριση C αντιστοιχούσε σε θρεπτικό διάλυμα όπου η αυξημένη συγκέντρωση  $Ca^{2+}$  (4,2 mM) συνοδεύτηκε με ανάλογη αύξηση στις συγκεντρώσεις  $K^+$  και  $Mg^{2+}$  ώστε να διατηρηθεί η ίδια γραμμομοριακή αναλογία  $K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+}$  όπως στη μεταχείριση Α. Λόγω της αύξησης της συγκέντρωσης όλων των μεταλλικών μακροκατιόντων, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) ανήλθε σε 2,45 dS  $m^{-1}$ . Στη μεταχείριση Β, η ηλεκτροχημική ισορροπία του θρεπτικού διαλύματος διατηρήθηκε με ισοδύναμη αύξηση των θεικών ιόντων ( $SO_4^{2-}$ ) και στη μεταχείριση C με ισοδύναμη αύξηση των θεικών ( $SO_4^{2-}$ ) και νιτρικών ιόντων ( $NO_3^-$ ). Η συγκέντρωση των φωσφορικών ( $H_2PO_4^-$ ) και των ιχνοστοιχείων ήταν ίδια σε όλες τις μεταχειρίσεις (Πίνακας 4.1). Το νερό το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή όλων των θρεπτικών διαλυμάτων ήταν αφαλατωμένο, και το pH του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος ρυθμιζόταν καθημερινά στο 5,6-5,7 με τη χρήση κατάλληλων ποσοτήτων 1 N διαλύματος  $HNO_3$ .

**Πίνακας 4.1.** Σύνθεση των διαφορετικών μεταχειρίσεων των θρεπτικών διαλυμάτων στο πείραμα.

Παράμετρος	ΘΔΕ	A <sup>1</sup>	B <sup>2</sup>	C <sup>3</sup>
EC (dS m <sup>-1</sup> )*	2,50	1,74	2,02	2,45
K <sup>+</sup> (mM)	5,79	6,50	6,50	9,75
Ca <sup>2+</sup> (mM)	5,79	2,80	4,20	4,20
Mg <sup>2+</sup> (mM)	2,07	1,00	1,00	1,50
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mM)	15,43	11,75	11,75	18,10
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mM)	1,10	1,00	1,00	1,00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mM)	2,97	0,85	2,25	1,20
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mM)	0,80	1,25	1,25	1,25

Η συγκέντρωση των μικροστοιχείων, δηλ. Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo ήταν 25, 5, 7, 1, 50, 0,5 μM, αντίστοιχα, στο θρεπτικό διάλυμα εκκίνησης (ΘΔΕ) και 15, 8, 4, 0,75, 25, 0,5 μM, αντίστοιχα, στις υπόλοιπες μεταχειρίσεις θρεπτικών διαλυμάτων στο πείραμα (ίδια συγκέντρωση σε όλες τις μεταχειρίσεις).

\*EC, ηλεκτρική αγωγιμότητα (electrical conductivity).

<sup>1</sup>Μεταχείριση A: τυπικό θρεπτικό διάλυμα για πεπόνι, <sup>2</sup>Μεταχείριση B: αυξημένη συγκέντρωση Ca<sup>2+</sup>, θεωρώντας ότι είναι αναπόφευκτη λόγω της σύστασης του αρδευτικού νερού, <sup>3</sup>Μεταχείριση C: αυξημένη συγκέντρωση Ca<sup>2+</sup> όπως στη μεταχείριση B, συνοδευόμενη από ισοδύναμες αυξήσεις στα επίπεδα K<sup>+</sup> και Mg<sup>2+</sup> ώστε να διατηρηθεί η μοριακή αναλογία K<sup>+</sup>: Ca<sup>2+</sup>: Mg<sup>2+</sup> όπως στο τυπικό θρεπτικό διάλυμα.

Για την αποφυγή θρεπτικών ανισορροπιών, το ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα (ΑΚΘΔ) σε κάθε υδροπονική μονάδα απορρίφθηκε και αντικαταστάθηκε από νέο θρεπτικό διάλυμα εκκίνησης (ΘΔΕ) στις 12 Δεκεμβρίου, 2012 και 12 Ιανουαρίου, 2013. Το πείραμα τερματίστηκε στις 12 Φεβρουαρίου, 2013. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η μέση ημερήσια θερμοκρασία στο θερμοκήπιο κυμάνθηκε από 17,5°C έως 29,3°C, η σχετική υγρασία από 55,6% έως 77,5% και η ένταση της φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας είχε

μέση τιμή  $935 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Η ολική ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία που έφθανε στο θερμοκήπιο είχε μέση τιμή  $10,6 \text{ MJ m}^{-2}$ .



**Εικόνα 4.1.** Εμβολιασμένα φυτάρια πεπονιάς σε κύβους πετροβάμβακα και αρχικά στάδια ανάπτυξης του ριζικού συστήματος σε ρηχό ρεύμα θρεπτικού διαλύματος.

#### 4.2.2. Χειρισμός δεδομένων

Η αναλογία απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων και νερού οι οποίες αναφέρονται ως συγκεντρώσεις απορρόφησης – ΣΑ ( $\text{UC, mmol L}^{-1}$ ) για N, P, K, Ca και Mg υπολογίστηκαν για τρεις διαδοχικές χρονικές περιόδους (0-30, 30-60 και 60-90 ημέρες μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων, HMEM) χρησιμοποιώντας δύο ανεξάρτητες μεθόδους υπολογισμού, δηλαδή (1) μετρώντας τις μεταβολές στη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα και την αντίστοιχη κατανάλωση του από τα φυτά και (2) μετρώντας την ανάκτηση των θρεπτικών στοιχείων από τη ξηρή βιομάζα ανά μονάδα όγκου νερού που καταναλωνόταν. Οι αντίστοιχες μεθοδολογίες περιγράφονται αναλυτικά στην υποενότητα 3.5, λαμβάνοντας επίσης υπόψη τις συστάσεις των Bar-Tal et al. (2001a, b), Pardossi et al. (2004) και Tzerakis et al. (2012). Οι απώλειες νερού από το σύστημα - NFT ήταν αμελητέες. Συνεπώς ο όγκος νερού που απομακρύνθηκε από το σύστημα αντιστοιχεί στις ποσότητες νερού που απορροφήθηκαν από τα φυτά ( $U_w, \text{L}$ ). Ο υπολογισμός του βασίστηκε στην παρακάτω εξίσωση:

$$U_w = (W_{in} + W_{add} - W_f) \quad (1)$$

όπου,  $W_{in}$  ήταν η αρχική ποσότητα νερού σε κάθε υδροπονική μονάδα (L),  $W_{add}$  ήταν ο συνολικός όγκος νερού που είχε προστεθεί από το δοχείο συμπλήρωσης στο σύστημα (L),  $W_f$  ήταν ο τελικός όγκος νερού σε κάθε υδροπονική μονάδα (L) στο τέλος του εκάστοτε χρονικού διαστήματος.

Ο συνολικός όγκος νερού που απορροφήθηκε για τις ανάγκες της διαπνοής από κάθε φυτό,  $T_r$  (L plant<sup>-1</sup>), υπολογίστηκε ως ακολούθως:

$$T_r = U_w / N \quad (2)$$

όπου,  $N$  ήταν ο αριθμός των φυτών σε κάθε υδροπονική μονάδα.

#### 4.2.3. Μετρήσεις και αναλύσεις

Ολόκληρα φυτά και υδατικά διαλύματα συγκομίστηκαν από κάθε υδροπονική μονάδα στην αρχή και στο τέλος κάθε χρονικής περιόδου, δηλ., 0-30, 30-60 και 60-90 ημέρες μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων (HMEM). Τα φυτά διαχωρίστηκαν σε φύλλα, ρίζες, βλαστούς και καρπούς και ακολούθως προσδιορίστηκαν οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών μακροστοιχείων N, P, K, Ca, και Mg, στο καθένα από αυτά. Επίσης τα πιο πρόσφατα πλήρη αναπτυγμένα φύλλα από την κορυφή (υγιή, ίδιου μεγέθους με έκθεση προς τον ήλιο) σε τέσσερα φυτά για κάθε επανάληψη χρησιμοποιήθηκαν την 30, 60 και 90 ημέρα από την έναρξη των μεταχειρίσεων μεταξύ των ωρών 07:00 – 09:00 π.μ. για να μετρηθούν: (1) η ανταλλαγή αερίων κατά τη φωτοσύνθεση, δηλ., καθαρός ρυθμός φωτοσύνθεσης (A), στοματική αγωγιμότητα ( $g_s$ ), συγκέντρωση CO<sub>2</sub> στους μεσοκυττάριους χώρους (Ci), και ρυθμός διαπνοής (E), και (2) η αποτελεσματικότητα χρήσης νερού (water use efficiency-WUE). Ακολούθως, τα ίδια φύλλα σημάνθηκαν για να μετρηθούν: (1) χημικός ποσοτικός προσδιορισμός χλωροφύλλης, (2) φθορισμός της χλωροφύλλης (δείκτης Fv/Fm), (3) ρυθμός μεταφοράς ηλεκτρονίων (electron transport rate-ETR) και (4) οπτικός ποσοτικός



προσδιορισμός χλωροφύλλης (τιμές SPAD). Οι αντίστοιχες μεθοδολογίες περιγράφονται στην υποενότητα 3.6 (Μεθοδολογίες εργαστηριακών μετρήσεων).

Καρποί στο στάδιο της πλήρους ωρίμανσης συγκομίσθηκαν στο διάστημα από 3 μέχρι 18 Φεβρουαρίου, 2013, μετρήθηκαν, ζυγίστηκαν και προσδιορίστηκε το μέσο βάρος καρπού σε κάθε πειραματική μονάδα. Ακολούθως δύο αντιπροσωπευτικοί καρποί από κάθε υδροπονική μονάδα χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της συνεκτικότητας σάρκας, όπως περιγράφουν οι Colla et al. (2006). Ακολούθως, ο φλοιός του καρπού (επιδερμικός ιστός) αφαιρέθηκε και το μεσοκάρπιο πολτοποιήθηκε για να διατηρηθεί στους  $-30^{\circ}\text{C}$  μέχρι την ημερομηνία των αναλύσεων. Διαλυτά στερεά, pH, ογκομετρούμενη οξύτητα, ξηρή ουσία, ασκορβικό οξύ, ολικές φαινολικές ουσίες και αντιοξειδωτική ικανότητα (ferric reducing antioxidant power, FRAP assay) προσδιορίστηκαν στο μεσοκάρπιο (Neocleous and Vasilakakis, 2012) όπως περιγράφεται στη γενική μεθοδολογία στην υποενότητα 3.6. Η παραγωγή ξηρής βιομάζας ανά φυτό προσδιορίστηκε σε έξι φυτά για κάθε μεταχείριση στο τέλος της καλλιέργειας.

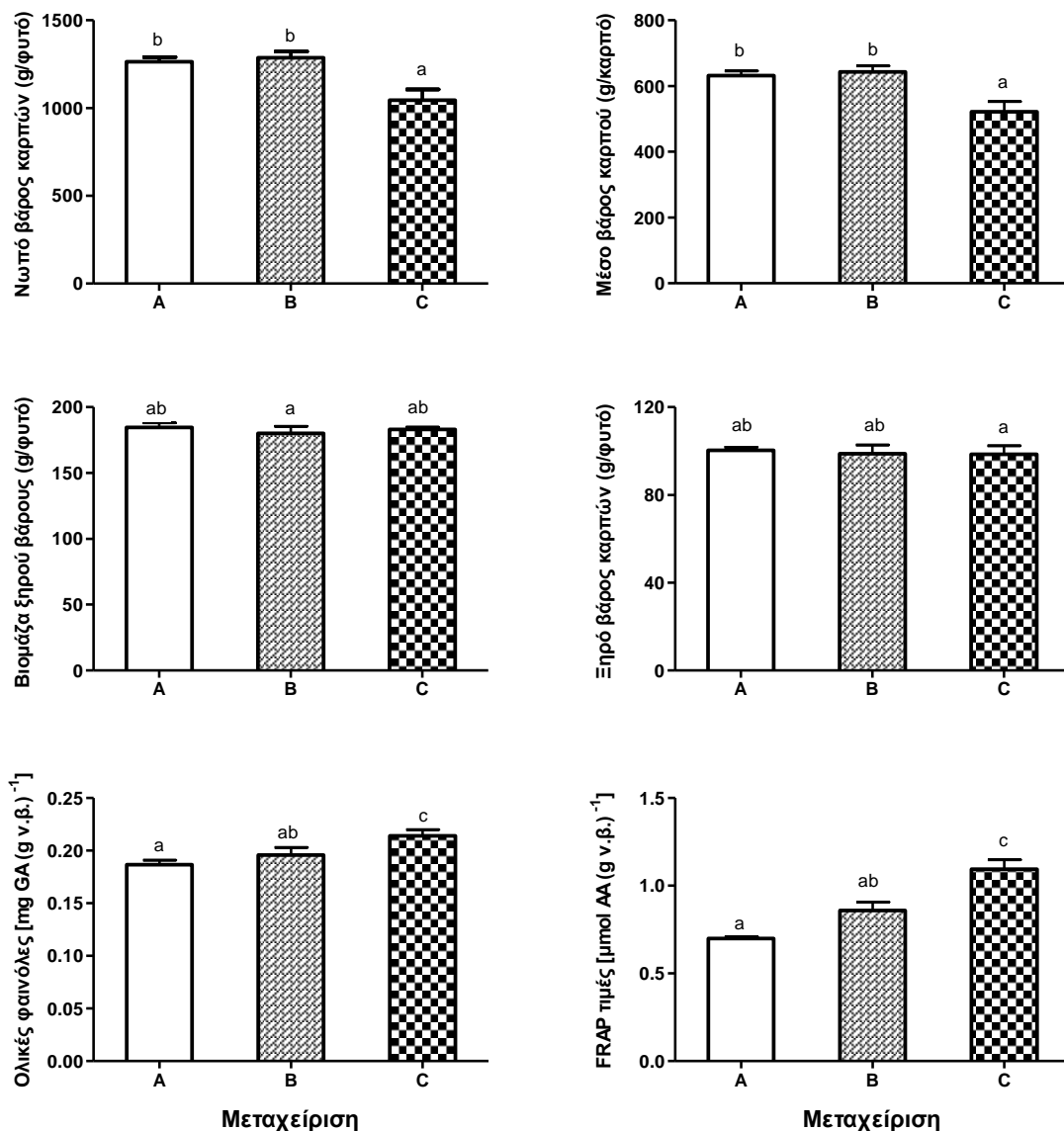
#### **4.2.4. Στατιστική επεξεργασία**

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων έγινε με το στατιστικό πακέτο SAS (Version 9.2, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). Η ανάλυση των δεδομένων έγινε με τη μέθοδο της ανάλυσης διασποράς (ANOVA) και η σύγκριση των μέσων όρων έγινε με το κριτήριο Duncan's Multiple-Range Test. Με το T-test, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της απορρόφησης μακροστοιχείων ανάμεσα στις δύο μεθόδους υπολογισμού. Το επίπεδο σημαντικότητας όλων των στατιστικών ελέγχων ήταν  $P \leq 5\%$ . Τα γραφήματα σχεδιάστηκαν με τη βοήθεια του πακέτου GraphPad Prism (Version 5.0, GraphPad Software, San Diego California, USA). Η στατιστική ανάλυση έδειξε μικρό αριθμό αλληλεπιδράσεων μεταξύ των

μεταχειρίσεων και των ημερομηνιών δειγματοληψίας για ορισμένα από τα χαρακτηρισμένα που μετρήθηκαν.

### 4.3. Αποτελέσματα

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, η αυξημένη συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της παραγωγής στην περίπτωση που αυξήθηκαν ανάλογα και οι συγκεντρώσεις του  $\text{K}^+$  και  $\text{Mg}^{2+}$  (μεταχείριση C) ώστε να διατηρηθεί η ίδια αναλογία των συγκεντρώσεων των μακροκατιόντων  $\text{K}^+ : \text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$  όπως και στο θρεπτικό διάλυμα μάρτυρα. Η μείωση στο συνολικό βάρος καρπών ανά φυτό πεπονιάς στη μεταχείριση C ήταν αποτέλεσμα της μείωσης του μέσου βάρους του καρπού, καθώς στο κάθε φυτό αφέθηκε να ωριμάσει ο ίδιος αριθμός καρπών σε όλες τις μεταχειρίσεις. Εντούτοις, η παραγωγή ξηρής βιομάζας και το ξηρό βάρος των καρπών ανά φυτό δεν επηρεάστηκαν από τις πειραματικές επεμβάσεις (Σχήμα 4.1). Επιπρόσθετα, ο προσδιορισμός των ποιοτικών χαρακτηριστικών του καρπού έδειξε ότι οι διαφορές στη σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε μεταχείριση δεν επηρέασαν σημαντικά τα γευστικά ποιοτικά χαρακτηριστικά του καρπού, ειδικότερα τη συνεκτικότητα σάρκας (μ.ο.  $39,6 \text{ Nt cm}^{-2}$ ), τα διαλυτά στερεά συστατικά (μ.ο.  $12,4 \text{ }^\circ\text{Brix}$ ), pH (μ.ο. 6,53), την ογκομετρούμενη οξύτητα (μ.ο. 0,11% citric acid), την ξηρή ουσία (μ.ο. 11,1%), και το ασκορβικό οξύ (AA, μ.ο.  $4,10 \text{ mg AA [100g v.β.]}^{-1}$ , λεπτομερή στοιχεία δεν παρουσιάζονται). Σημαντικό όμως ήταν, ότι η περιεκτικότητα των καρπών σε φαινολικές ουσίες και η αντιοξειδωτική ικανότητα των καρπών (δείκτης FRAP) επηρεάστηκαν θετικά στη μεταχείριση με αυξημένη ηλεκτρική αγωγιμότητα (μεταχείριση C, Σχήμα 4.1).



**Σχήμα 4.1.** Νωπό βάρος καρπών ανά φυτό, μέσο βάρος καρπού, ολική παραγωγή βιομάζας ξηρού βάρους ανά φυτό, ξηρό βάρος καρπών ανά φυτό, ολικές φαινόλες και αντιοξειδωτική ικανότητα (δείκτης FRAP) των καρπών, σε υδροπονικό σύστημα-NFT καλλιέργειας πεπονιού, όπως επηρεάζονται από τις διαφορετικές μεταχειρίσεις θρεπτικών διαλυμάτων (A, B, C, βλέπε Πίνακα 4.1). Διαφορετικά γράμματα πάνω από τις στήλες των δεδομένων δείχνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μέσων τιμών ( $n = 3$ ) σε επίπεδο σημαντικότητας  $P \leq 5\%$  σύμφωνα με το κριτήριο Duncan. Οι κατακόρυφες μπάρες υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα του μέσου.

Η μέθοδος υπολογισμού που βασίστηκε στη χημική ανάλυση των θρεπτικών διαλυμάτων, έδειξε ότι η συγκέντρωση απορρόφησης (ΣΑ) του  $K^+$  ήταν σημαντικά μεγαλύτερη στη μεταχείριση C (αυξημένη συγκέντρωση  $Ca^{2+}$  που συνοδεύτηκε με ισοδύναμη αύξηση των συγκεντρώσεων  $K^+$  και  $Mg^{2+}$  ώστε να διατηρηθεί η συνιστώμενη γραμμομοριακή αναλογία  $K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας) από ότι στις δύο άλλες μεταχειρίσεις (Πίνακας 4.2). Αναφορικά με τις χρονικές διακυμάνσεις, η ΣΑ του  $K^+$  μειώθηκε με την πάροδο του χρόνου. Η ΣΑ του  $Ca^{2+}$  (Πίνακας 4.2), παρουσίασε παρόμοια συμπεριφορά με το  $K^+$ , αντικατοπτρίζοντας τη συγκέντρωση  $Ca^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης στην κάθε μεταχείριση (Πίνακας 4.1), και προοδευτικά μειώθηκε με το χρόνο. Η ΣΑ του  $Mg^{2+}$  δεν επηρεάστηκε από τις μεταχειρίσεις θρεπτικού διαλύματος στο συγκεκριμένο πείραμα (Πίνακας 4.2), παρόλο που η συγκέντρωση  $Mg^{2+}$  ήταν αυξημένη στο θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης στη μεταχείριση C (Πίνακας 4.1). Οι ΣΑ του  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  και  $Mg^{2+}$ , όπως υπολογίστηκαν από την ανάκτηση των θρεπτικών στοιχείων από τη ξηρή βιομάζα (BM) και την κατανάλωση νερού, έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα ΣΑ με βάση την απομάκρυνση τους από το θρεπτικό διάλυμα (ΘΔ), αλλά τυχόν διαφορές ανάμεσα στις μεταχειρίσεις δεν ήταν πάντοτε διακριτές και με τις δύο μεθόδους (Πίνακας 4.2). Επιπρόσθετα, τα δεδομένα από τη χημική ανάλυση του ΘΔ έδειξαν ότι η ΣΑ του αζώτου ( $N$ ,  $NO_3^- + NH_4^+$ ) από τα φυτά ήταν μεγαλύτερη στη μεταχείριση C από ότι στις δύο άλλες μεταχειρίσεις σε όλη τη διάρκεια του πειράματος (Πίνακας 4.2). Η ΣΑ του  $N$  μειώθηκε με την πάροδο του χρόνου με παρόμοιο τρόπο όπως και η ΣΑ του  $K^+$  (γενική αναλογία απορρόφησης  $N:K \approx 2,75$  σε γραμμομοριακή βάση, Πίνακας 4.2). Η ΣΑ του  $N$  όπως υπολογίστηκε από τα δεδομένα της BM κυμάνθηκε στα ίδια περίπου επίπεδα, με τα δεδομένα του ΘΔ. Εντούτοις, ομοίως με τα θρεπτικά μακροκατιόντα ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ , και  $Mg^{2+}$ ), διαφορές στις ΣΑ του  $N$  οφειλόμενες στις διαφορετικές μεταχειρίσεις θρεπτικών διαλυμάτων δεν ήταν διακριτές και με τις δύο μεθόδους υπολογισμού (Πίνακας 4.2). Αν και τα επίπεδα

φωσφόρου (P) στο θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης (Πίνακας 4.1) ήταν πανομοιότυπα σε όλες τις μεταχειρίσεις, η μεταχείριση B παρουσίασε αυξημένες ΣΑ του P συγκρινόμενη με τις δύο άλλες μεταχειρίσεις. Όσον αφορά τη χρονική διακύμανση της ΣΑ, οι υπολογισμοί με βάση τη χημική ανάλυση του ΘΔ έδειξαν ότι η ΣΑ του P μειώθηκε από τη δεύτερη ημερομηνία δειγματοληψίας (Πίνακας 4.2). Εντούτοις, ο υπολογισμός της ΣΑ του P στη βάση της ΒΜ δεν έδωσε διαφορές είτε ανάμεσα στις πειραματικές επεμβάσεις είτε ανάμεσα στις φάσεις ανάπτυξης της καλλιέργειας. Γενικά, οι μέσες τιμές ΣΑ του N, K και Ca όπως υπολογίστηκαν με τα δεδομένα του ΘΔ, δεν διέφεραν ουσιαστικά από τις αντίστοιχες τιμές στη βάση της ΒΜ, παρόλο που με τη δεύτερη μέθοδο υπολογισμού σημειώθηκαν ελαφρά χαμηλότερες τιμές στις περισσότερες περιπτώσεις (Πίνακας 4.2). Αντίθετα, η ΣΑ του P και Mg όπως υπολογίστηκε με βάση τη ΒΜ, κυμάνθηκε σε ελαφρώς υψηλότερα επίπεδα από εκείνα που προέκυψαν από τα δεδομένα ανάλυσης του ΘΔ (Πίνακας 4.2).

**Πίνακας 4.2.** Συγκεντρώσεις απορρόφησης μακροστοιχείων ( $\text{mmol L}^{-1}$ ) σε υδροπονικό σύστημα - NFT καλλιέργειας πεπονιού, όπως επηρεάζεται από τις διαφορετικές μεταχειρίσεις (Μεταχ.) θρεπτικών διαλυμάτων (Α, Β και C, βλέπε Πίνακα 4.1, οι τιμές είναι μέσοι που υπολογίστηκαν για όλες τις χρονικές περιόδους) και ii) βλαστικά στάδια του φυτού (ημέρες μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων, ΗΜΕΜ: οι τιμές είναι μέσοι που υπολογίστηκαν για όλες τις μεταχειρίσεις θρεπτικών διαλυμάτων). Οι μέθοδοι υπολογισμού βασίστηκαν είτε στη χημική ανάλυση των θρεπτικών διαλυμάτων (ΘΔ) είτε στην ξηρή βιομάζα (ΒΜ).

Μεταχ.	ΘΔ					ΒΜ				
	N†	P	K	Ca	Mg	N††	P	K	Ca	Mg
A	14,7b	1,16b	5,40b	3,31b	0,94a	14,2a	1,40a	5,05a	3,50a	1,11a
B	15,0b	1,27a	5,21b	4,08a	0,88a	14,9a	1,47a	5,01a	3,62a	1,07a
C	17,9a	1,15b	6,69a	4,30a	1,00a	15,5a	1,43a	5,51a	3,89a	1,14a
ΗΜΕΜ										
0-30	19,6a	1,43a	7,11a	5,22a	1,09a	17,7a	1,47a	5,38a	5,20a	1,47a
30-60	15,1b	1,09b	5,49b	3,50b	0,91ab	14,5b	1,47a	5,24a	3,06b	0,98b
60-90	12,9c	1,07b	4,69c	2,96c	0,81b	12,4c	1,36a	4,94a	2,74b	0,87b
M.O.	15,9A	1,20B	5,76A	3,90A	0,94B	14,9A	1,43A	5,19B	3,67A	1,10A
Σημαντικότητα										
Μεταχ.	***	**	***	***	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ
ΗΜΕΜ	***	***	***	***	*	***	ΜΣ	ΜΣ	***	***
M × H	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	*	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ

Για κάθε μέθοδο υπολογισμού, οι μέσοι των διαφορετικών μεταχειρίσεων ή της φάσης ανάπτυξης του φυτού ( $n = 3$ ), για κάθε χαρακτηριστικό, συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα έχουν στατιστικά σημαντική διαφορά σύμφωνα με το κριτήριο Duncan ( $P \leq 5\%$ ). Η σύγκριση των γενικών μέσων όρων (M.O.), η οποία συμβολίζεται με κεφαλαία γράμματα, ανάμεσα στις δύο μεθόδους υπολογισμού για κάθε χαρακτηριστικό, έγινε με το T-test ( $P \leq 5\%$ ). ΜΣ, \*, \*\* και \*\*\* δείχνουν μη σημαντικές ή σημαντικές διαφορές σε επίπεδο  $P \leq 5\%$ , 1% και 0,1%, αντίστοιχα. † $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ , ††Οργανικός δεσμευμένο.

Ο υπολογισμός των μέσων ΣΑ με βάση τη χημική σύσταση του ΘΔ (Πίνακας 4.2), έδωσε ουσιαστικά διαφορετική μοριακή αναλογία απορρόφησης των μακροκατιόντων  $\text{K}^+$ :  $\text{Ca}^{2+}$ :  $\text{Mg}^{2+}$  για τη μεταχείριση Β (μ.ο. 0,51: 0,40: 0,09) από ότι στις τις δύο άλλες

μεταχειρίσεις (μ.ο. K: Ca: Mg = 0,56: 0,35: 0,09). Εντούτοις, όταν οι μέσες ΣΑ υπολογίστηκαν με βάση την ανάλυση της ξηρής φυτικής βιομάζας, η μοριακή K: Ca: Mg αναλογία απορρόφησης διαφοροποιήθηκε ελάχιστα ανάμεσα στις μεταχειρίσεις A, B και C (μ.ο. K: Ca: Mg = 0,52: 0,37: 0,11). Με βάση το στάδιο ανάπτυξης του φυτού, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα και από τις δύο μεθόδους υπολογισμού, η μοριακή K: Ca: Mg αναλογία κατά τη διάρκεια του σταδίου καρποφορίας ήταν σχετικά σταθερή και κυμάνθηκε: 0,55-0,58 (K): 0,32-0,35 (Ca): 0,10 (Mg). Αντίθετα, στα αρχικά στάδια ανάπτυξης του φυτού, μεγαλύτερες μεταβολές προσδιορίστηκαν και οι τιμές κυμάνθηκαν: 0,45-0,53 (K): 0,39-0,43 (Ca): 0,08-0,12 (Mg).

Ο προσδιορισμός των ημερήσιων ρυθμών απορρόφησης (daily uptake rates-UR, μάζα του θρεπτικού στοιχείου που απορροφάται στη μονάδα του χρόνου) χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των συγκεντρώσεων στο ΘΔ (Πίνακας 4.3) ανέδειξε μειωμένο  $K^+$  και αυξημένο  $Ca^{2+}$  ρυθμό απορρόφησης σε σχέση με τη μεταχείριση A και (ii) μεγαλύτερη αύξηση του ρυθμού απορρόφησης των μακροστοιχείων κατά τη διάρκεια της δεύτερης χρονικής περιόδου ακολουθούμενη από την τρίτη περίοδο σε σύγκριση με την πρώτη περίοδο ανάπτυξης. Το πιο πάνω αποτέλεσμα επιβεβαιώθηκε και από τα δεδομένα της ανάλυσης της ξηρής βιομάζας του φυτού (BM). Παρόλα αυτά, η επίδραση των μεταχειρίσεων στους ρυθμούς απορρόφησης των μακροστοιχείων δεν ήταν πάντοτε σημαντικά εμφανής και με τους δύο τρόπους υπολογισμού.

**Πίνακας 4.3.** Ρυθμοί απορρόφησης μακροστοιχείων ( $\text{mmol plant}^{-1} \text{d}^{-1}$ ) σε υδροπονικό σύστημα - NFT καλλιέργειας πεπονιού, όπως επηρεάζονται από τις διαφορετικές μεταχειρίσεις (Μεταχ.) θρεπτικών διαλυμάτων (Α, Β και C, βλέπε Πίνακα 4.1, οι τιμές είναι μέσοι που υπολογίστηκαν για όλες τις χρονικές περιόδους) και ii) βλαστικά στάδια του φυτού (ημέρες μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων, ΗΜΕΜ: οι τιμές είναι μέσοι που υπολογίστηκαν για όλες τις μεταχειρίσεις θρεπτικών διαλυμάτων). Οι μέθοδοι υπολογισμού βασίστηκαν είτε στη χημική ανάλυση των θρεπτικών διαλυμάτων (ΘΔ) είτε στην ξηρή βιομάζα (ΒΜ).

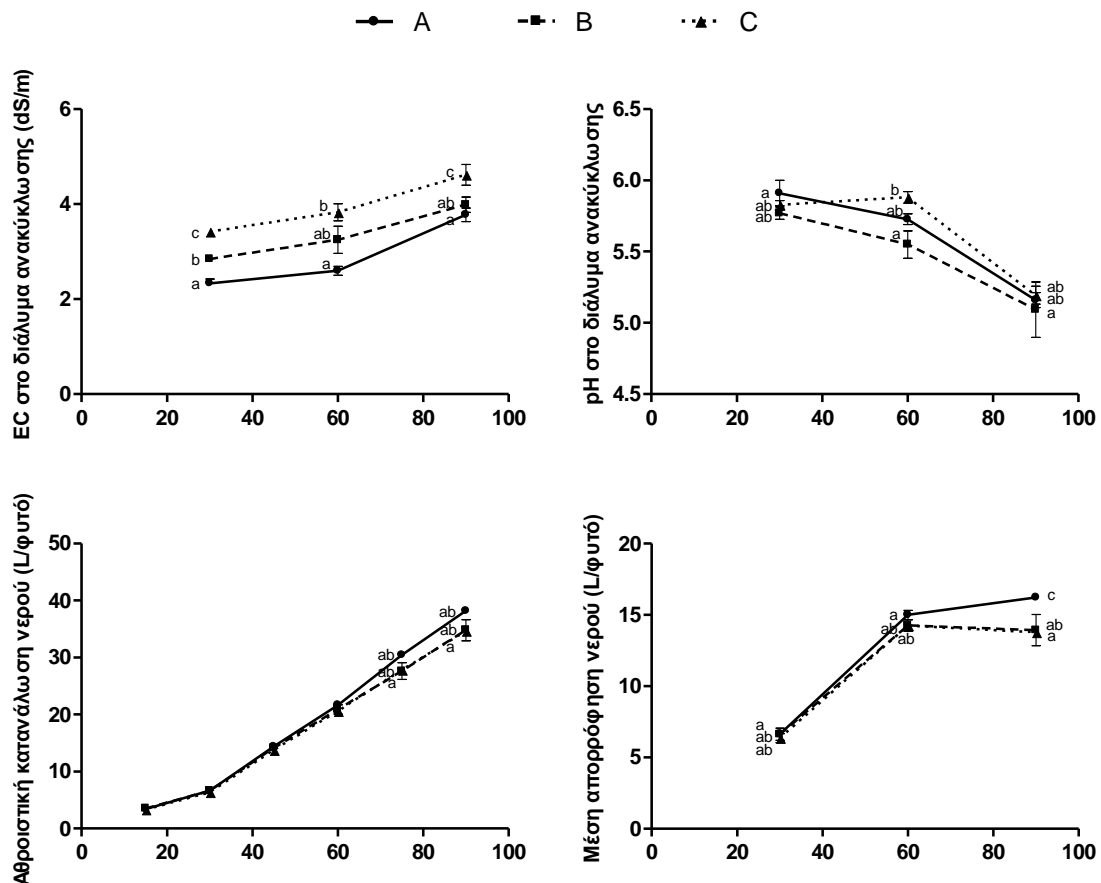
Μεταχ.	ΘΔ					ΒΜ				
	N†	P	K	Ca	Mg	N††	P	K	Ca	Mg
A	5,73b	0,46ab	2,13b	1,23b	0,38a	5,86a	0,59a	2,14a	1,35a	0,44a
B	5,49b	0,48a	1,89c	1,46a	0,32a	5,87a	0,59a	2,04a	1,33a	0,40a
C	6,51a	0,42b	2,45a	1,55a	0,37a	5,74a	0,55a	2,14a	1,29a	0,41a
ΗΜΕΜ										
0-30	4,27c	0,31b	1,55c	1,14c	0,24b	3,85b	0,32b	1,14b	1,13b	0,32b
30-60	7,27a	0,53a	2,65a	1,69a	0,44a	7,00a	0,71a	2,59a	1,47a	0,47a
60-90	6,24b	0,52a	2,26b	1,42b	0,39a	6,62a	0,71a	2,59a	1,36a	0,45a
M.O.	5,93A	0,45B	2,15A	1,41A	0,36B	5,82A	0,58A	2,11A	1,32A	0,41A
Σημαντικότητα										
Μεταχ.	***	*	***	***	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ
ΗΜΕΜ	***	***	***	***	***	***	***	***	*	***
M × H	*	ΜΣ	*	*	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ

Για κάθε μέθοδο υπολογισμού, οι μέσοι των διαφορετικών μεταχειρίσεων ή της φάσης ανάπτυξης του φυτού ( $n = 3$ ), για κάθε χαρακτηριστικό, συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα έχουν στατιστικά σημαντική διαφορά σύμφωνα με το κριτήριο Duncan ( $P \leq 5\%$ ). Η σύγκριση των γενικών μέσων όρων (M.O.), η οποία συμβολίζεται με κεφαλαία γράμματα, ανάμεσα στις δύο μεθόδους υπολογισμού για κάθε χαρακτηριστικό, έγινε με το T-test ( $P \leq 5\%$ ). ΜΣ, \*, \*\* και \*\*\* δείχνουν μη σημαντικές ή σημαντικές διαφορές σε επίπεδο  $P \leq 5\%$ , 1% και 0,1%, αντίστοιχα. † $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ , ††Οργανικώς δεσμευμένο.

Η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) ήταν αυξημένη στη μεταχείριση C συγκρινόμενη με τη μεταχείριση A σε όλη τη διάρκεια του πειράματος (Σχήμα 4.2). Η τιμή της EC στη μεταχείριση B ήταν μεταξύ των δύο άλλων μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της



πρώτης δειγματοληψίας αλλά οι διαφορές ανάμεσα στις μεταχειρίσεις A και B έτειναν να μηδενιστούν με την πάροδο του χρόνου. Η τιμή της EC στη μεταχείριση C προοδευτικά αυξήθηκε (Σχήμα 4.2) μέχρι να φθάσει περίπου  $4,6 \text{ dS m}^{-1}$  στην τελευταία δειγματοληψία. Οι τιμές EC στις μεταχειρίσεις A και B ήταν σημαντικά μικρότερες σε σύγκριση με τη μεταχείριση C σε όλη τη διάρκεια του πειράματος (Σχήμα 4.2). Κατά τη διάρκεια της πρώτης χρονικής περιόδου (από τη μεταφύτευση μέχρι τη 30<sup>η</sup> ημέρα), η τιμή του pH στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα ήταν παρόμοια σε όλες τις μεταχειρίσεις. Κατά τη δεύτερη χρονική περίοδο, η τιμή του pH στη μεταχείριση B ήταν χαμηλότερη συγκρινόμενη με τη μεταχείριση C αλλά οι διαφορές αυτές ελαχιστοποιήθηκαν την τελευταία χρονική περίοδο (Σχήμα 4.2). Τα φυτά στη μεταχείριση A, δηλ. στη μεταχείριση θρεπτικού διαλύματος χαμηλής συγκέντρωσης  $\text{Ca}^{2+}$ , κατανάλωσαν σημαντικά περισσότερο νερό (Σχήμα 4.2) σε σύγκριση με τα φυτά στις δύο άλλες μεταχειρίσεις. Οι μεταχειρίσεις B και C, στις οποίες η συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  και η τιμή της EC ήταν υψηλότερες συγκρινόμενες με τη μεταχείριση A, έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα ( $P \leq 5\%$ ) τόσο σε σχέση με την πορεία όσο και την ποσότητα κατανάλωσης νερού κατά τη διάρκεια του πειράματος.

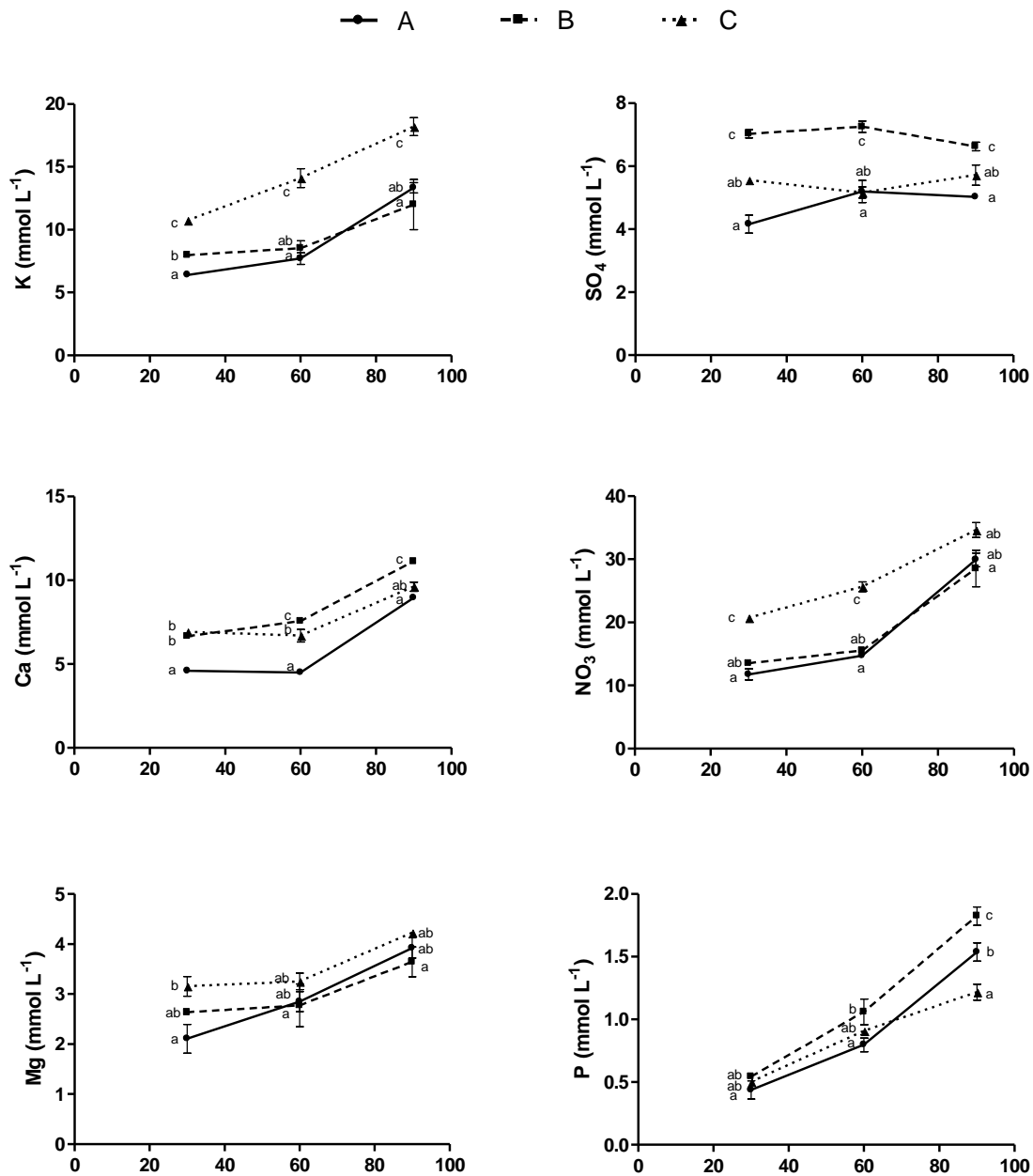


Χρόνος (ημέρες) μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων

**Σχήμα 4.2.** Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και pH στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα, αθροιστική κατανάλωση νερού και μέση απορρόφηση νερού ανά φυτό, σε υδροπονικό σύστημα - NFT καλλιέργειας πεπονιού, όπως επηρεάζονται από τις διαφορετικές μεταχειρίσεις θρεπτικών διαλυμάτων (A, B, C, βλέπε Πίνακα 4.1) σε διαφορετικό χρόνο (ημέρες) μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων. Μέσες τιμές ( $n = 3$ ) με διαφορετικά γράμματα (στην ίδια ημερομηνία δειγματοληψίας) διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο  $P \leq 5\%$  σύμφωνα με το κριτήριο Duncan. Οι κατακόρυφες μπάρες υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα του μέσου.

Η συγκέντρωση  $K^+$  στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα (ΑΚΘΔ) ήταν σημαντικά υψηλότερη στη μεταχείριση C συγκρινόμενη με τις δύο άλλες μεταχειρίσεις σε όλη τη διάρκεια του πειράματος (Σχήμα 4.3). Τα επίπεδα  $K^+$  στο ΑΚΘΔ της μεταχείρισης B ήταν υψηλότερα από αυτά στο ΑΚΘΔ της μεταχείρισης A κατά την πρώτη δειγματοληψία, αλλά

οι διαφορές αυτές στη συνέχεια στατιστικά εκμηδενίστηκαν. Η συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  στο ΑΚΘΔ ήταν σημαντικά χαμηλότερη στη μεταχείριση Α από ότι στις δύο άλλες μεταχειρίσεις κατά τη διάρκεια της πρώτης και δεύτερης δειγματοληψίας, αλλά οι διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων Α και C στατιστικά μηδενίστηκαν την τελευταία ημερομηνία δειγματοληψίας (Σχήμα 4.3). Η συγκέντρωση  $\text{Mg}^{2+}$  στο ΑΚΘΔ επηρεάστηκε από τις πειραματικές επεμβάσεις των θρεπτικών διαλυμάτων, με στατιστικές διαφορές όμως μόνο κατά την πρώτη ημερομηνία δειγματοληψίας (Σχήμα 4.3). Η συγκέντρωση των θεικών ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) στο ΑΚΘΔ ήταν υψηλότερη στη μεταχείριση Β συγκρινόμενη με τις δύο άλλες μεταχειρίσεις σε όλη τη διάρκεια του πειράματος (Σχήμα 4.3). Την πρώτη ημερομηνία δειγματοληψίας, η συγκέντρωση των  $\text{SO}_4^{2-}$  στο ΑΚΘΔ στη μεταχείριση C ήταν μεγαλύτερη από ότι στη μεταχείριση Α ενώ ακολούθως οι τιμές ανάμεσα στις δύο μεταχειρίσεις είχαν χαμηλότερη απόκλιση. Το επίπεδο των νιτρικών ( $\text{NO}_3^-$ ) στο ΑΚΘΔ ήταν υψηλότερο στη μεταχείριση C κατά τη διάρκεια της πρώτης και δεύτερης ημερομηνίας δειγματοληψίας σε σχέση με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις (Σχήμα 4.3). Εντούτοις, οι διαφορές αυτές δεν ήταν στατιστικά σημαντικές την τελευταία ημερομηνία δειγματοληψίας. Τέλος, η συγκέντρωση του φωσφόρου (P) στο ΑΚΘΔ επηρεάστηκε από τις πειραματικές μεταχειρίσεις αλλά σημαντικές διαφορές προσδιορίστηκαν μόνο κατά τη δεύτερη και τρίτη ημερομηνία δειγματοληψίας (Σχήμα 4.3). Η μεταχείριση Β έδειξε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις P στο ΑΚΘΔ από ότι η μεταχείριση Α τη δεύτερη ημερομηνία δειγματοληψίας, και μεγαλύτερη συγκέντρωση και από τις δύο μεταχειρίσεις Α και C την τελευταία ημερομηνία (Σχήμα 4.3).



### Χρόνος (ημέρες) μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων

**Σχήμα 4.3.** Συγκεντρώσεις K, Ca, Mg, P, NO<sub>3</sub> και SO<sub>4</sub> στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα σε υδροπονικό σύστημα - NFT καλλιέργειας πεπονιού, όπως επηρεάζεται από τις διαφορετικές μεταχειρίσεις θρεπτικών διαλυμάτων (A, B, C, βλέπε Πίνακα 4.1) σε διαφορετικό χρόνο (ημέρες) μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων. Μέσες τιμές (n = 3) με διαφορετικά γράμματα (στην ίδια ημερομηνία δειγματοληψίας) διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο P ≤ 5% σύμφωνα με το κριτήριο Duncan. Οι κατακόρυφες μπάρες υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα του μέσου.

Η χημική ανάλυση των φυτικών ιστών έδειξε ότι η μεταχείριση Β μείωσε την περιεκτικότητα Κ στα φύλλα ενώ, οι μεταχειρίσεις C και A αύξησαν τη συγκέντρωση Κ στη ρίζα και Mg στο βλαστό, αντίστοιχα (Πίνακας 4.4). Επιπρόσθετα, οι συγκεντρώσεις ορισμένων θρεπτικών μακροστοιχείων έτειναν να μειωθούν στα φύλλα (N, P, K), το βλαστό (P, Mg), τον καρπό (N, P, Ca, Mg) και τη ρίζα (K), ενώ το Ca έτεινε να αυξηθεί στα φύλλα, βλαστό και ρίζα, όπως και ο P στη ρίζα (Πίνακας 4.4) με την πρόοδο της καλλιέργειας. Ως μέσοι όροι όλων των μεταχειρίσεων, οι συγκεντρώσεις του K, Ca και του Mg ανήλθαν σε 35,8, 68,4 και 8,6 mg (g ξ.β.)<sup>-1</sup> στα φύλλα, και 43,4, 8,2 και 3,6 mg (g ξ.β.)<sup>-1</sup> στον καρπό, αντίστοιχα. Με βάση το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας, η μοριακή αναλογία K: Ca: Mg στα φύλλα ήταν 0,34: 0,53: 0,13 κατά τη διάρκεια της βλαστικής αύξησης του φυτού, η οποία διαφοροποιήθηκε σε 0,27: 0,62: 0,11, αντίστοιχα, μετά την έναρξη της καρπόδεσης. Η μοριακή αναλογία K: Ca: Mg είχε μέση τιμή 0,76: 0,16: 0,08 στο βλαστό και 0,81: 0,09: 0,09, αντίστοιχα, στον καρπό της πεπονιαίας.

**Πίνακας 4.4.** Συγκέντρωση μακροστοιχείων σε g (100 g)<sup>-1</sup> ξηρού βάρους στα φύλλα (Φ), βλαστούς (Β), καρπούς (Κ) και ρίζες (Ρ) σε υδροπονικό σύστημα - NFT καλλιέργειας πεπονιού, όπως επηρεάζονται από τις διαφορετικές μεταχειρίσεις (Μεταχ.) θρεπτικών διαλυμάτων (Α, Β και C, βλέπε Πίνακα 4.1, οι τιμές είναι μέσοι που υπολογίστηκαν για όλες τις χρονικές περιόδους) και ii) βλαστικά στάδια του φυτού (ημέρες μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων, ΗΜΕΜ: οι τιμές είναι μέσοι που υπολογίστηκαν για όλες τις μεταχειρίσεις θρεπτικών διαλυμάτων).

Μεταχ.	N†				P				K				Ca				Mg			
	Φ	Β	Κ	Ρ	Φ	Β	Κ	Ρ	Φ	Β	Κ	Ρ	Φ	Β	Κ	Ρ	Φ	Β	Κ	Ρ
A	4,82a	3,14a	4,64a	3,93a	0,71a	0,79a	1,05a	1,24a	3,69a	5,01a	4,48a	2,95b	6,78a	1,00a	0,82a	1,23a	0,89a	0,31a	0,37a	0,61a
B	4,83a	3,12a	4,81a	3,84a	0,72a	0,79a	1,03a	1,39a	3,42b	4,75a	4,21a	3,48ab	7,04a	1,01a	0,85a	1,25a	0,84a	0,27b	0,34a	0,60a
C	4,81a	3,05a	4,61a	4,02a	0,68a	0,81a	1,00a	1,29a	3,65a	4,77a	4,33a	3,83a	6,71a	0,96a	0,80a	1,10a	0,84a	0,26b	0,36a	0,58a
ΗΜΕΜ																				
0-30	5,56a	3,22a	5,92a	3,78b	0,76a	0,98a	1,20a	1,27b	3,71a	4,90a	4,35a	3,94a	5,99b	0,82b	1,54a	1,00b	0,85a	0,35a	0,46a	0,60a
30-60	4,65b	2,87b	4,04b	4,18a	0,70ab	0,81b	0,93b	1,21b	3,61ab	4,37b	4,22a	3,91a	6,50b	0,82b	0,43b	1,04b	0,85a	0,24b	0,28c	0,52a
60-90	4,24c	3,22a	4,10b	3,84b	0,64b	0,60c	0,95b	1,45a	3,44b	5,27a	4,45a	2,40b	8,04a	1,33a	0,49b	1,53a	0,87a	0,25b	0,33b	0,68a
Σημαντικότητα																				
Μεταχ.	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	*	ΜΣ	ΜΣ	*	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	*	ΜΣ	ΜΣ
ΗΜΕΜ	***	**	***	*	*	***	***	*	*	**	ΜΣ	***	***	***	***	*	ΜΣ	***	***	ΜΣ
M × H	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	*	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ

Σε κάθε στήλη δεδομένων, οι μέσοι των διαφορετικών μεταχειρίσεων ή της φάσης ανάπτυξης του φυτού (n = 3), συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα έχουν στατιστικά σημαντική διαφορά σύμφωνα με το κριτήριο Duncan (P ≤ 5%). ΜΣ, \*, \*\* και \*\*\* δείχνουν μη σημαντικές ή σημαντικές διαφορές σε επίπεδο P ≤ 5%, 1% και 0,1%, αντίστοιχα. †Οργανικός δεσμευμένο.

Η ανταλλαγή αερίων κατά τη φωτοσύνθεση στο παρόν πείραμα δεν έδειξε σημαντικές διαφορές σε σχέση με τις πειραματικές επεμβάσεις αλλά και κατά τη διάρκεια των διαφορετικών ημερομηνιών μέτρησης οι διαφορές ήταν επίσης μικρές και στατιστικά μη σημαντικές σε επίπεδο σημαντικότητας  $P \leq 5\%$  (τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται). Ο καθαρός ρυθμός φωτοσύνθεσης (A) είχε μέση τιμή  $14,2 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , η στοματική αγωγιμότητα ( $g_s$ )  $0,373 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , η συγκέντρωση  $\text{CO}_2$  στους μεσοκυττάριους χώρους (Ci)  $300 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ , ο ρυθμός διαπνοής (E)  $3,24 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  και η αποτελεσματικότητα χρήσης νερού (WUE, A/E)  $4,50 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ . Τα δεδομένα αυτά, συμφωνούν με τα αποτελέσματα προσδιορισμού διαφόρων παραμέτρων της χλωροφύλλης, όπως το δείκτη του φθορισμού Fv/Fm (μ.ο. 0,79), το ρυθμό μεταφοράς ηλεκτρονίων (ETR, μ.ο.  $167 \mu\text{mol e}^- \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) το χημικό προσδιορισμό της ολικής συγκέντρωσης της χλωροφύλλης (chl, μ.ο.  $1,31 \text{ mg [g v.β.]}^{-1}$ ) αλλά και τον οπτικό προσδιορισμό της χλωροφύλλης (τιμές SPAD, μ.ο. 45,2), τα οποία ουσιαστικά δεν έδειξαν ότι επηρεάστηκαν από τις πειραματικές επεμβάσεις (λεπτομερή στοιχεία δεν παρουσιάζονται).

#### 4.4. Συζήτηση

Αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) σε τιμές υψηλότερες από  $3,0 - 3,2 \text{ dS m}^{-1}$  στο περιβάλλον των ριζών θα πρέπει να αποφεύγεται στην πεπονιά, γιατί η αλατότητα σε επίπεδα που υπερβαίνουν τα όρια αυτά μπορεί να μειώσει την απόδοση σε καρπό (Colla et al., 2006). Σε συμφωνία με τη διαπίστωση αυτή, ο Bar-Yosef (2008) αναφέρει ότι, σε καλλιέργεια πεπονιάς σε κλειστό υδροπονικό σύστημα, αυξάνοντας τις τιμές EC - κατώφλι αλατότητας από 2,2 σε 3,4 και 4,6  $\text{dS m}^{-1}$  προκάλεσε ανάλογη μείωση στους εμπορεύσιμους καρπούς. Στο παρόν πείραμα, η στρατηγική που ακολουθήθηκε στη μεταχείριση C (διατηρώντας την επιθυμητή μοριακή αναλογία συγκέντρωσης  $\text{K}^+ : \text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$  στο διάλυμα

συμπλήρωσης ΘΔΣ, αυξάνοντας τη συγκέντρωση  $K^+$  και  $Mg^{2+}$  ανάλογα με τα επίπεδα της αυξημένης συγκέντρωσης  $Ca^{2+}$  λόγω της χημικής σύστασης του αρδευτικού νερού), αύξησε την EC στο θρεπτικό διάλυμα σε επίπεδα υψηλότερα από την τιμή EC - κατώφλι αλατότητας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ως αποτέλεσμα, η μεταχείριση C μείωσε το μέσο βάρος των καρπών και συνεπώς τη συνολική απόδοση σε καρπό (Σχήμα 4.1), σε συμφωνία με τα ευρήματα του Bar-Yosef (2008), ο οποίος βρήκε ότι αύξηση της EC στο ριζόστρωμα από 2,1 σε  $4,6 \text{ dS m}^{-1}$  σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα καλλιέργειας πεπονιάς περιόρισε την απόδοση κατά 19,6%. Η μείωση στην απόδοση λόγω περιορισμού του μέσου βάρους του καρπού παρατηρήθηκε επίσης και σε άλλες θερμοκηπιακές καλλιέργειες όπως η πιπεριά, αποτέλεσμα άμεσα συνυφασμένο με την υπέρβαση της ανώτατης τιμής EC στο διάλυμα ανακύκλωσης σε κλειστό σύστημα (Bar-Yosef, 2008) όπως και στη μελιτζάνα (Savvas and Lenz, 2000). Η αύξηση της EC στη μεταχείριση C σε τιμές μέχρι  $4,62 \text{ dS m}^{-1}$  οφειλόταν κατά κύριο λόγο σε αυξημένη συγκέντρωση των θρεπτικών ιόντων  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $NO_3^-$  και  $SO_4^{2-}$  στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα - ΑΚΘΔ (Σχήμα 4.3), η οποία ουσιαστικά αντανακλούσε και τη σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας - ΘΔΣ (Πίνακας 4.1). Επιπρόσθετα, ο ρυθμός συσσώρευσης των στοιχείων στο ΑΚΘΔ της μεταχείρισης C ήταν πιο έντονος με την πρόοδο της καλλιέργειας (Σχήμα 4.3). Από τα πιο πάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι η ευαισθησία στην αύξηση της EC πέρα από τα ανώτατα επιτρεπτά όρια στην πεπονιά μπορεί να οφείλεται είτε στην αυξημένη συγκέντρωση NaCl στο διάλυμα, όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία από τους Colla et al. (2006), είτε στην αυξημένη συγκέντρωση μακροστοιχείων όπως δείχνει η παρούσα εργασία. Εντούτοις, παρά τις πολύ υψηλές συγκεντρώσεις των  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $NO_3^-$  και  $SO_4^{2-}$  στο περιβάλλον των ριζών των φυτών της μεταχείρισης C, οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις στα φύλλα βρίσκονταν μέσα στα συνιστώμενα επίπεδα για την καλλιέργεια όπως αναφέρουν οι Marschner (1995) και Mills and Jones (1996). Επομένως, προκύπτει ότι η αλατότητα οφειλόμενη σε υπερβολικές συγκεντρώσεις



θρεπτικών στοιχείων δεν φαίνεται να προκάλεσε κάποια ειδική τοξικότητα ιόντος στο πείραμα αυτό, με αποτέλεσμα η μειωμένη απόδοση στη μεταχείριση C να αποδίδεται σε ωσμωτική αλατούχο καταπόνηση.

Η επίδραση που προκάλεσε η αύξηση της EC στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα στο ποσοστό καρπόδεσης δεν αξιολογήθηκε στο παρόν πείραμα καθώς αφέθηκε να ωριμάσει ο ίδιος αριθμός καρπών σε κάθε φυτό πεπονιάς, ακολουθώντας εν μέρει την πρακτική σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες πεπονιού τύπου “Galía” για πρόωμη παραγωγή (Rodriguez et al., 2006). Σε μία προηγούμενη εργασία όμως, οι Manrogiannopoulos et al. (1999) αναφέρουν ότι μια μέτριο βαθμού αύξηση της αλατότητας σε φυτά πεπονιάς δεν επηρέασε σημαντικά τον αριθμό των καρπών σε κάθε φυτό, αλλά μόνο το μέσο βάρος του καρπού.

Η απουσία δυσμενών επιπτώσεων της αύξησης της EC στο διάλυμα ανακύκλωσης, στην αύξηση, ανάπτυξη και καρποφορία των φυτών στη μεταχείριση B (δηλ. το θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης - ΘΔΣ με αυξημένη συγκέντρωση  $Ca^{2+}$ ) συγκρινόμενη με τη μεταχείριση μάρτυρα, μπορεί να αποδοθεί στους εξής λόγους: (1) τη μικρότερη αύξηση της EC σε σχέση με τη μεταχείριση C στο διάλυμα ανακύκλωσης σε συνδυασμό με τη δυνατότητα του εμβολιασμού από μόνου του να προσδίδει ως ένα βαθμό αύξηση της αντοχής στην αλατότητα, όπως αναφέρεται από πολλούς ερευνητές (π.χ. Schwarz et al., 2010) και (2) την εμφάνιση υψηλών τιμών EC, οι οποίες αποτελούν και ένδειξη αλατούχου καταπόνησης, αργότερα μέσα στο βλαστικό κύκλο και όχι στα αρχικά στάδια της βλαστικής αύξησης όπου τα φυτά θεωρούνται περισσότερο ευαίσθητα στην αλατότητα σε σχέση με το αναπαραγωγικό τους στάδιο (Läuchli and Grattan 2007, Bar-Yosef, 2008). Η αύξηση της EC στο διάλυμα ανακύκλωσης μείωσε την κατανάλωση νερού από τα φυτά (Σχήμα 4.2), χωρίς όμως να επηρεάσει δυσμενώς την παραγωγή ξηρής βιομάζας. Αυτό είναι λογικό, δεδομένου ότι η στοματική αγωγιμότητα και ο καθαρός φωτοσυνθετικός ρυθμός δεν επηρεάστηκαν αρνητικά από τις πειραματικές επεμβάσεις στην παρούσα εργασία (λεπτομερή αποτελέσματα δεν

παρουσιάζονται). Εξάλλου, ο Bar-Yosef (2008) ανέφερε ότι μια μέτρια ανύψωση της EC σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα μείωσε την εξατμισοδιαπνοή χωρίς να επηρεάσει την παράγωγη ξηρής ουσίας και την απορρόφηση αζώτου από τα φυτά.

Οι Silber και Bar-Tal (2008) βρήκαν ότι μια μέτρια αύξηση της αλατότητας στο πεπόνι βελτιώνει τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του καρπού. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που αντιλαμβάνεται ο καταναλωτής (η γευστική ποιότητα) δεν επηρεάστηκαν από την ανύψωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC στο διάλυμα ανακύκλωσης, ενώ η περιεκτικότητα σε φαινολικές ουσίες και η αντιοξειδωτική ικανότητα των καρπών (δείκτης FRAP), βελτιώθηκαν σημαντικά με την ανύψωση της EC στη μεταχείριση C (Σχήμα 4.1). Αυτό το εύρημα έχει ιδιαίτερη σημασία για μια διαίτα πλούσια σε αντιοξειδωτικές ουσίες (Neocleous et al., 2014).

Τα αποτελέσματα στον Πίνακα 4.2 δείχνουν ότι ο προσδιορισμός των μέσων συγκεντρώσεων απορρόφησης (ΣΑ) είτε με βάση τις μετρήσεις στο θρεπτικό διάλυμα (ΘΔ) είτε με βάση τις μετρήσεις στην ξηρή βιομάζα (BM) δίνουν συγκρίσιμα και αξιόπιστα αποτελέσματα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό ώστε να αξιολογηθεί πληρέστερα η απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων από την πεπονιά σε κλειστό υδροπονικό σύστημα. Επίσης, τα δεδομένα του ίδιου Πίνακα δείχνουν ότι μέρος του χορηγούμενου N, K και Ca δεν χρησιμοποιήθηκε από τα φυτά λόγω απωλειών από το σύστημα (π.χ. δημιουργία δυσδιάλυτων ενώσεων), όπως άλλωστε παρατηρήθηκε και από άλλους ερευνητές (Adams, 2002, Bar-Yosef, 2008). Ως εκ τούτου, η επαρκής τροφοδοσία των φυτών με θρεπτικά στοιχεία σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα, προϋποθέτει ότι οι ποσότητες των θρεπτικών στοιχείων που παρέχονται στα φυτά δεν βασίζονται μόνο στις απόλυτες ανάγκες των φυτών αλλά λαμβάνει υπόψη και τυχόν απώλειες από το σύστημα (φαινόμενη ΣΑ). Σχετικά με τη ΣΑ του Mg και P, αν και οι διαφορές μεταξύ των δύο

μεθόδων υπολογισμού ήταν στατιστικά σημαντικές, μπορεί να θεωρηθούν μικρής πρακτικής σημασίας.

Τα νεαρά φυτά έχουν αυξημένες απαιτήσεις σε θρεπτικά στοιχεία λόγω του έντονου ρυθμού αύξησης τους, ενώ ταυτόχρονα οι υδατικές τους ανάγκες είναι ακόμα περιορισμένες λόγω του μικρού τους μεγέθους (δεν φέρουν μεγάλα φύλλα με έντονους ρυθμούς διαπνοής χωρίς ουσιαστικά να συμβάλλουν στη φωτοσύνθεση). Το γεγονός αυτό, δικαιολογεί τις μεγαλύτερες τιμές των ΣΑ κατά τη διάρκεια των πρώτων 30 ημερών από την έναρξη της καλλιέργειας σε σύγκριση με αυτές που προσδιορίστηκαν τα επόμενα χρονικά διαστήματα. Αυτή η ερμηνεία συμφωνεί και με προηγούμενα ευρήματα από τους Pardossi et al. (2004). Οι ρυθμοί απορρόφησης ( $\text{mmol plant}^{-1} \text{d}^{-1}$ ), οι οποίοι ήταν υψηλότεροι τη δεύτερη ακολουθούμενη από την τρίτη χρονική περίοδο, ουσιαστικά ήταν συνυφασμένοι με τους ρυθμούς αύξησης της ξηρής βιομάζας, σε ταύτιση απόψεων με τους Pardossi et al. (2004) όπως και τους Silber and Bar-Tal (2008). Συνεπώς, όπως προκύπτει από τα πιο πάνω αποτελέσματα, ενδείκνυται η κατάστρωση ενός σχήματος θρέψης το οποίο περιλαμβάνει διαφορετική σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος σε μακροστοιχεία, τουλάχιστο σε τρεις περιπτώσεις κατά τη διάρκεια της περιόδου καλλιέργειας της πεπονιάς σε κλειστά υδροπονικά συστήματα με συνεχή ανακύκλωση, ώστε να επιτευχθεί υψηλή παραγωγικότητα χωρίς να υποβαθμίζονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά και η διατροφική αξία των καρπών.

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της χημικής ανάλυσης των φυτικών ιστών και της παραγωγής ξηρής βιομάζας (BM), βρέθηκε ότι οι συνολικές ποσότητες των μακροστοιχείων που ανακτήθηκαν από τη φυτομάζα δεν επηρεάστηκαν από τις πειραματικές επεμβάσεις των θρεπτικών διαλυμάτων (ΘΔ) (μ.ο. N, 7,37, P, 1,61, K, 7,41, Ca, 4,77 και Mg, 0,90 g/φυτό). Από τη διαπίστωση αυτή προκύπτει ότι: (1) η απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων δεν περιορίστηκε λόγω της αύξησης της αλατότητας στο θρεπτικό διάλυμα και (2) μικρές διαφορές στις αναλογίες των θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα (ΘΔ) αντανακλούν

αντίστοιχα μικρές διαφορές στις συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στους φυτικούς ιστούς. Επομένως, η μείωση της απόδοσης σε καρπό στη μεταχείριση C δεν μπορεί να αποδοθεί ουσιαστικά ούτε σε διαταραχή της θρέψης του φυτού αλλά ούτε και σε κάποια ειδική τοξικότητα ιόντος. Μια λογική εξήγηση είναι, ότι η μείωση της απόδοσης είναι αποτέλεσμα ωσμωτικής καταπόνησης. Σύμφωνα με την Munns (2002), η μείωση στην απόδοση από την ανύψωση της EC στο περιβάλλον των ριζών πάνω από ένα επιτρεπτό επίπεδο είναι συνυφασμένη με ωσμωτικά φαινόμενα αν τυχόν τοξικότητα ιόντος ή ελλείψεις δεν υφίστανται.

Η παρόμοια συγκέντρωση Mg στα φύλλα των φυτών σε όλες τις μεταχειρίσεις, παρά τις διαφορετικές συγκεντρώσεις  $Mg^{2+}$  και  $Ca^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης - ΘΔΣ, δείχνει ότι τα φυτά πεπονιάς διατηρούν την ικανότητα τους να διατηρούν τους ρυθμούς απορρόφησης του  $Mg^{2+}$  μέσα σε ένα ευρύ φάσμα συγκεντρώσεων  $Ca^{2+}$  στο περιβάλλον των ριζών. Αντίθετα, η αυξημένη συγκέντρωση  $Ca^{2+}$  στο ΘΔΣ στη μεταχείριση B ήταν συνυφασμένη με μια σχετική μείωση των επιπέδων του K στα φύλλα, υποδηλώνοντας έτσι ότι ο ρυθμός μεταφοράς του  $K^+$  στα φύλλα έχει άμεση συσχέτιση με την αναλογία συγκεντρώσεων  $K^+ : Ca^{2+}$  στο ριζόστρωμα. Η αντίδραση αυτή αποκαλύπτει ότι η αναλογία  $K^+ : Ca^{2+}$  είναι περισσότερο σημαντική για τη μεταφορά του  $K^+$  στα φύλλα της πεπονιάς καλλιεργούμενης στο κλειστό σύστημα - NFT από ότι η απόλυτη συγκέντρωση  $K^+$  στο ΘΔΣ. Αυτό το εύρημα συμφωνεί με τις διαπιστώσεις προηγούμενων αναφορών για άλλες καλλιέργειες όπως η φράουλα (Lieten, 2006, San Bautista et al., 2009). Στην ίδια γραμμή, η υψηλότερη συγκέντρωση των μακροκατιόντων (δηλ.  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  και  $Mg^{2+}$ ) στο ΘΔΣ της μεταχείρισης C δεν έδειξε ότι συνδέεται άμεσα με κάποια αύξηση των επιπέδων του K, Ca ή Mg στα διάφορα φυτικά μέρη, υποδηλώνοντας ότι οι σχετικές αναλογίες των κατιόντων στο θρεπτικό διάλυμα είναι περισσότερο σημαντικές από ότι οι επιμέρους συγκεντρώσεις τους για την απορρόφηση και μεταφορά τους μέσα στο φυτό. Οι συγκεντρώσεις των

μακροστοιχείων στα φύλλα της πεπονιάς στο παρόν πείραμα ήταν υψηλότερες από αυτές που αναφέρονται από τους Ruiz et al. (1997) σε καλλιέργεια πεπονιού εκτός εδάφους σε γλάστρες, ενώ παρόμοιες συγκεντρώσεις έχουν αναφερθεί από τον Bar-Yosef (2008) σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα.

Η διαφορετική γραμμομοριακή αναλογία (mol/mol) απορρόφησης των μακροκατιόντων  $K^+$ :  $Ca^{2+}$ :  $Mg^{2+}$  ανάμεσα στη μεταχείριση Β και τις δύο άλλες μεταχειρίσεις προέκυψε κυρίως από τη διαφορά στη σχετική μοριακή αναλογία  $K^+$ :  $Ca^{2+}$ :  $Mg^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης - ΘΔΣ κάθε μεταχείρισης. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι ακόμα και μικρές διαφορές στη σχετική αναλογία συγκεντρώσεων  $K^+$ :  $Ca^{2+}$ :  $Mg^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα επηρεάζουν την μοριακή αναλογία απορρόφησης  $K^+$ :  $Ca^{2+}$ :  $Mg^{2+}$ , όπως επίσης έχει προταθεί και από τους Sonneveld and Voogt (1985). Με βάση τα διαφορετικά στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας πεπονιού εκτός εδάφους στις Μεσογειακές κλιματικές συνθήκες, ο Σάββας (2012) προτείνει μοριακή αναλογία απορρόφησης  $K^+$ :  $Ca^{2+}$ :  $Mg^{2+}$ , ίση με 0,53: 0,35: 0,12 κατά τη διάρκεια του βλαστικού σταδίου και 0,59: 0,30: 0,11 στο στάδιο καρποφορίας, αντίστοιχα. Η αναλογία απορρόφησης  $K^+$ :  $Ca^{2+}$ :  $Mg^{2+}$  η οποία προτείνεται από τον Σάββα (2012) για το στάδιο καρποφορίας είναι περίπου παρόμοια με αυτή που προσδιορίστηκε στη παρούσα εργασία. Εντούτοις, στα αρχικά στάδια ανάπτυξης (βλαστικό στάδιο), η αναλογία απορρόφησης  $K^+$ :  $Ca^{2+}$  η οποία προσδιορίστηκε στο παρόν ήταν γενικά χαμηλότερη από αυτή που αναφέρθηκε από τον Σάββα (2012), κυρίως λόγω της χαμηλής αναλογίας  $K^+$ :  $Ca^{2+}$  (1 : 1) στο θρεπτικό διάλυμα εκκίνησης (ΘΔΕ). Τόσο η συγκέντρωση απορρόφησης του  $Ca^{2+}$  όσο και η αναλογία απορρόφησης  $K^+$ :  $Ca^{2+}$  όπως προσδιορίστηκαν στην παρούσα εργασία δείχνουν καθαρά ότι τα φυτά πεπονιάς στα αρχικά στάδια ανάπτυξης προσλαμβάνουν μεγαλύτερες ποσότητες (έχουν μεγαλύτερες ανάγκες) ασβεστίου  $Ca^{2+}$  κάτω από τις Μεσογειακές κλιματικές συνθήκες. Αργότερα στη διάρκεια του βλαστικού κύκλου, και ειδικότερα στο στάδιο της καρποφορίας, οι ανάγκες σε  $K^+$  αυξάνονται, οι ανάγκες σε

$\text{Ca}^{2+}$  μειώνονται και οι ανάγκες σε  $\text{Mg}^{2+}$  δεν μεταβάλλονται όπως συμπεραίνεται από τα δεδομένα της εργασίας αυτής. Τα δεδομένα της ανάλυσης των φυτικών ιστών επιβεβαιώνουν τη διαπίστωση αυτή, δηλαδή ότι τα φυτά πεπονιάς στο βλαστικό στάδιο έχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις σε ασβέστιο ( $\text{Ca}^{2+}$ ) και χαμηλότερες σε κάλιο ( $\text{K}^+$ ) από ότι αντίστοιχα στο αναπαραγωγικό στάδιο, σε συμφωνία με τους Bernadac et al. (1996), ενώ ταυτόχρονα οι απαιτήσεις σε μαγνήσιο  $\text{Mg}^{2+}$  φαίνεται ότι δεν μεταβάλλονται ή ότι οριακά μειώνονται με την πρόοδο της καλλιέργειας.

#### 4.5. Συμπεράσματα

Οι διαφορετικές στρατηγικές θρέψης, οι οποίες ακολουθήθηκαν στην παρούσα εργασία με στόχο να ελαχιστοποιηθούν οι θρεπτικές ανισορροπίες σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια πεπονιάς, όταν η συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  στο νερό άρδευσης υπερβαίνει τα συνιστώμενα για την καλλιέργεια επίπεδα, είχαν τα ακόλουθα μειονεκτήματα: (1) Η στρατηγική I (μεταχείριση B) διαφοροποίησε τη μοριακή αναλογία  $\text{K}^+ : \text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα σε σχέση με την βέλτιστη για την καλλιέργεια (τιμή-στόχο), (2) Η στρατηγική II (μεταχείριση C) αύξησε υπερβολικά τη συνολική συγκέντρωση ιόντων των θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα. Εντούτοις, μόνο η στρατηγική II μείωσε την απόδοση σε καρπό, καθώς το πεπόνι καθίσταται ευάλωτο στην υπερβολική αύξηση της αλατότητας (συνολικής συγκέντρωσης αλάτων). Επομένως, η αύξηση του  $\text{K}^+$  και  $\text{Mg}^{2+}$  σε επίπεδα ανάλογα με την αύξηση του  $\text{Ca}^{2+}$  με στόχο να διατηρηθεί η συνιστώμενη (επιθυμητή) αναλογία  $\text{K}^+ : \text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$  δεν συνιστάται στην καλλιέργεια πεπονιάς, καθώς στην παρούσα εργασία αύξησε την EC στο ριζόστρωμα σε επιβλαβή επίπεδα ( $4,62 \text{ dS m}^{-1}$ ) για την καλλιέργεια, με αποτέλεσμα να μειωθεί η απόδοση σε καρπό κατά 20% λόγω ωσμωτικής καταπόνησης.

Τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής δείχνουν ότι οι αμοιβαίες αναλογίες των μακροκατιόντων είναι περισσότερο σημαντικές για την απορρόφηση και μεταφορά των θρεπτικών ιόντων μέσα στο φυτό από ότι οι απόλυτες συγκεντρώσεις τους στο θρεπτικό διάλυμα. Ειδικότερα, η αναλογία  $K^+ : Ca^{2+}$  αποδείχτηκε περισσότερο σημαντική για τη μεταφορά του  $K^+$  στα φύλλα πεπονιάς καλλιεργούμενης σε σύστημα – NFT από την απόλυτη συγκέντρωση  $K^+$  στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας. Διαφορές στις μέσες συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) των μακροστοιχείων και τη μοριακή αναλογία απορρόφησης  $K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+}$ , διαπιστώθηκαν με την πρόοδο της καλλιέργειας. Η μέση ΣΑ των μακροστοιχείων μειώθηκε με την αύξηση της ηλικίας του φυτού, παρόλο που ο μέσος ρυθμός απορρόφησης (μάζα στοιχείου που απορροφάται στη μονάδα του χρόνου) αυξήθηκε αργότερα μέσα στην πορεία της καλλιέργειας σε σχέση με την πρώτη περίοδο ανάπτυξης. Προφανώς, προσαρμόζοντας τουλάχιστο τρεις φορές τη σχετική αναλογία  $K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας, διασφαλίζονται οι αναγκαίες ποσότητες τροφοδοσίας και ελαχιστοποιούνται προβλήματα προοδευτικής συσσώρευσης των μακροκατιόντων στο περιβάλλον των ριζών, όταν η πεπονιά καλλιεργείται σε κλειστά υδροπονικά συστήματα στις Μεσογειακές κλιματικές συνθήκες.



**Εικόνα 4.2.** Πειραματική καλλιέργεια πεπονιάς σε σύστημα NFT.

## **5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ II. «Συσσωρευση NaCl και απορρόφηση θρεπτικών μακροστοιχείων σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια πεπονιάς σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού»**

### **5.1. Εισαγωγή**

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, η υδροπονική καλλιέργεια των κηπευτικών σε κλειστά υδροπονικά συστήματα, συνιστά έναν τρόπο σημαντικής εξοικονόμησης νερού και λιπασμάτων στα θερμοκήπια ενώ ταυτόχρονα παρέχει καλύτερες δυνατότητες προστασίας του περιβάλλοντος (βλέπε υποενότητα 2.8). Εντούτοις, αν και η ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος είναι γνωστό ότι δεν μειώνει τις αποδόσεις και τη διατροφική αξία του προϊόντος (Raviv et al., 1998, Savvas and Gizas, 2002), ένας σημαντικός περιοριστικός παράγοντας είναι η βαθμιαία συσσωρευση ανόργανων αλάτων στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα. Η παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων NaCl στα αρδευτικά νερά, η οποία δεν είναι ένα σπάνιο φαινόμενο στην περιοχή της Μεσογείου (βλέπε υποενότητα 2.11), μπορεί να οδηγήσει σε συσσωρευση  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον της ρίζας, με δυσμενείς επιπτώσεις στην αύξηση και την παραγωγή (Sonneveld, 2000). Η αλατότητα μπορεί να έχει βλαπτική επίδραση στα φυτά με τη μορφή οσμωτικής καταπόνησης, από τις τοξικές επιδράσεις των αλάτων τα οποία μεταφέρονται στα φωτοσυνθετικά-ενεργά φύλλα, αλλά και θρεπτικές ανισορροπίες μέσα στο φυτό (Munns, 2002). Ενώ τις τελευταίες δεκαετίες οι πρώτοι δύο παράγοντες αλατότητας που προκαλούν δυσλειτουργίες στα φυτά έχουν μελετηθεί επαρκώς, πρόσφατα ερευνητικά δεδομένα υποδηλώνουν ότι η ικανότητα του φυτού να αντιδρά στην αλατότητα καθορίζεται εν μέρει από την ικανότητα του να διατηρεί τις θρεπτικές του ισορροπίες (Orsini et al., 2013). Για το λόγο αυτό, η αριστοποίηση της θρέψης των φυτών υπό συνθήκες αλατότητας εξακολουθεί να είναι πρωταρχικής σημασίας, ειδικότερα σε καλλιέργειες που αναπτύσσονται σε κλειστά υδροπονικά συστήματα (βλέπε επίσης υποενότητα 2.11).



Σε ένα πλήρως κλειστό σύστημα, συσσώρευση ενός στοιχείου παρατηρείται όταν η συγκέντρωση απορρόφησης του (ΣΑ, αναλογία απορρόφησης στοιχείου προς νερό) είναι μικρότερη από τη συγκέντρωση του στο χρησιμοποιούμενο νερό άρδευσης (Savvas et al., 2013). Για το ζήτημα αυτό, τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί απλές μαθηματικές εξισώσεις για την προσομοίωση της συσσώρευσης αλάτων σε παραγωγικές καλλιέργειες σε κλειστά υδροπονικά συστήματα (μοντέλα), οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στην υποενότητα 2.11. Εν ολίγοις, η σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  ή του  $\text{Cl}^-$  και της αντίστοιχης συγκέντρωσης τους στο περιβάλλον της ρίζας μπορεί να περιγραφεί με εκθετικές ή γραμμικές εξισώσεις, ανάλογα με το καλλιεργούμενο είδος, στις οποίες πρέπει να γίνεται κατάλληλη παραμετροποίηση από αντίστοιχα πειράματα βαθμονόμησης (Sonneveld et al., 1999, Carmassi et al., 2005).

Η πεπονιά είναι λιγότερο ευαίσθητη από τα περισσότερα καρποδοτικά λαχανικά θερμοκηπίου στην αλατότητα και η παραγωγή πεπονιών τύπου 'Galia' σε συστήματα με πλήρη και συνεχή ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος και σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από χαμηλότερης ποιότητας νερά μπορεί να αποτελέσει εναλλακτική επιλογή για τους καλλιεργητές θερμοκηπίου με στόχο τη διατήρηση της γεωργικής παραγωγικότητας και βιωσιμότητας στη γεωργία (Cohen et al., 2005). Προφανώς, για την εφαρμογή της προοπτικής αυτής, είναι ουσιώδης η κατανόηση του φαινομένου της συσσώρευσης των αλάτων  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον των ριζών της πεπονιάς όταν καλλιεργείται σε κλειστά συστήματα. Επιπρόσθετα, είναι θεμελιώδους σημασίας να λαμβάνεται υπόψη πως μεταβάλλονται οι συνθήκες θρέψης των φυτών σε συνθήκες αλατότητας (Grattan and Grieve, 1999, Parida and Das, 2005) με στόχο να διασφαλίζεται ένα άριστο επίπεδο παροχής θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα (Sonneveld, 2002). Ο προσδιορισμός των μέσων συγκεντρώσεων απορρόφησης (ΣΑ), μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια καλή βάση για την παρασκευή θρεπτικών διαλυμάτων για την πεπονιά όταν

καλλιεργείται σε κλειστά υδροπονικά συστήματα (De Kreij et al., 1999, Pardossi et al., 2004, Bar-Yosef, 2008, Neocleous and Savvas, 2015). Εντούτοις, για την πεπονιά δεν υπάρχουν επαρκή ερευνητικά δεδομένα σχετικά με τον τρόπο μεταβολής της απορρόφησης θρεπτικών και μη-θρεπτικών ιόντων συναρτήσει της εξωτερικής συγκέντρωσης  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  ή/και του σταδίου ανάπτυξης του φυτού και της εποχής καλλιέργειας (Thompson et al., 2013).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, και τη μη ύπαρξη ερευνητικών δεδομένων στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με το ρυθμό συσσώρευσης των αλάτων σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα πεπονιάς και τις σχέσεις που το διέπουν, στην εργασία αυτή γίνεται προσπάθεια ανάπτυξης μαθηματικής σχέσης μεταξύ των αναλογιών απορρόφησης  $\text{Na}^+$ /νερό και  $\text{Cl}^-$ /νερό και της συγκέντρωσης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$ , αντίστοιχα, στο περιβάλλον των ριζών πεπονιάς σε πλήρως κλειστό υδροπονικό σύστημα, εφαρμόζοντας διαφορετικές συγκεντρώσεις  $\text{NaCl}$  στο αρδευτικό νερό. Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του μοντέλου, πρότυπες μαθηματικές σχέσεις (βλέπε Sonneveld et al., 1999 και Savvas et al., 2005a, 2007) χρησιμοποιήθηκαν για την ενσωμάτωση των πειραματικών δεδομένων. Για να δοκιμασθεί η αξιοπιστία του προσομοιώματος (μοντέλου), οι σταθερές του μοντέλου εφαρμόστηκαν σε άλλη καλλιέργεια που αναπτύχθηκε σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Ο δεύτερος κύριος στόχος της εργασίας ήταν να προσδιορισθούν οι μέσες ΣΑ των μακροθρεπτικών (δηλ. N, P, K, Ca και Mg) σε καλλιέργεια πεπονιάς σε κλειστό υδροπονικό σύστημα σε συνθήκες βαθμιαίας αύξησης της αλατότητας στο διάλυμα ριζοστρώματος, σε διαφορετικά στάδια ανάπτυξης και εποχή καλλιέργειας και να μελετηθεί πως επηρεάζονται.

## **5.2. Υλικά και Μέθοδοι**

### **5.2.1. Πειραματική εγκατάσταση και φυτικό υλικό**

Δύο πειράματα πραγματοποιήθηκαν στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις που αναφέρονται στην υποενότητα 3.1. Το ένα από τα πειράματα διεξήχθη την περίοδο μέσα-

Δεκεμβρίου 2013 με αρχές-Απριλίου 2014 (Χειμώνα-Άνοιξη, στο εξής αναφέρεται ως X-A) και το άλλο αρχές-Μαΐου έως μέσα-Ιουλίου 2014 (Άνοιξη-Καλοκαίρι, στο εξής αναφέρεται ως A-K). Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε μία ποικιλία πεπονιάς (*Cucumis melo* L.) τύπου 'Galia' (Cory F<sub>1</sub>, Seminis, Netherlands) η οποία καλλιεργήθηκε σύμφωνα με τις πρακτικές των ντόπιων καλλιεργητών θερμοκηπίου. Η σπορά έγινε σε ειδικούς κύβους πετροβάμβακα για παραγωγή σποροφύτων (7,5× 7,5× 6 cm) και δώδεκα νεαρά φυτάρια μεταφέρθηκαν στο στάδιο των δύο-τριών πραγματικών φύλλων σε κανάλια ρηχού ρεύματος θρεπτικού διαλύματος με πλήρη και συνεχή ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος (βλέπε υποενότητα 3.3). Οι υδροπονικές μονάδες τοποθετήθηκαν σε αποστάσεις 1 m μεταξύ τους, ώστε τελικά να προκύπτει πυκνότητα φύτευσης 2,0 φυτά/m<sup>2</sup>. Οι εξωτερικές γραμμές φύτευσης χρησιμοποιήθηκαν για τον αποκλεισμό τυχόν παράπλευρης επίδρασης στις πειραματικές επεμβάσεις. Τα φυτά υποστυλώθηκαν κατακόρυφα με τη χρήση σπάγκου και στερεώθηκαν σε οριζόντιο σύρμα (2,20 m πάνω από τη γραμμή φύτευσης). Όλοι οι πλάγιοι βλαστοί και τα άνθη αφαιρούνταν μέχρι του ύψους 60 cm ενώ ο κεντρικός βλαστός κορυφολογήθηκε όταν πέρασε το οριζόντιο σύρμα κατά τρία-τέσσερα φύλλα με δέσιμο της κορυφής επί του οριζοντίου σύρματος (βλέπε επίσης υποενότητα 3.4). Η επικονίαση των φυτών γινόταν με βομβίνους και ο έλεγχος των εχθρών και ασθενειών γινόταν σύμφωνα με τις αρχές της ορθής γεωργικής πρακτικής στα θερμοκήπια. Εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl στο θρεπτικό διάλυμα (0,7, 2,5 και 5,0 mM) με το οποίο γινόταν η αναπλήρωση της απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων και νερού στο κλειστό σύστημα, οι οποίες αποτελούσαν τις τρεις επεμβάσεις του πειράματος. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε νερό με συγκέντρωση NaCl 0,7 mM, στο οποίο προσθέτονταν οι κατάλληλες ποσότητες NaCl ώστε η συγκέντρωση του να αυξηθεί στα παραπάνω επίπεδα αλατότητας (δηλαδή 2,5 και 5,0 mM). Η μόνη πηγή ιόντων Na<sup>+</sup> και Cl<sup>-</sup> στο κλειστό σύστημα ήταν το αρδευτικό νερό, καθώς χρησιμοποιήθηκαν υψηλής καθαρότητας λιπάσματα. Οι επεμβάσεις αλατότητας

κατανεμήθηκαν σε τυχαιοποιημένο σχέδιο πλήρων ομάδων, με τρεις επαναλήψεις για κάθε μεταχείριση. Η κάθε επανάληψη περιελάμβανε μια ανεξάρτητη κλειστού τύπου υδροπονική μονάδα (κανάλι ρηχού ρεύματος θρεπτικού διαλύματος - NFT). Η τεχνική της ανακύκλωσης του θρεπτικού διαλύματος περιγράφεται στην υποενότητα 3.2. Η παροχή του θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας γινόταν με ρυθμούς ροής  $0,1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  σε κάθε κανάλι και ο όγκος του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος (ΑΚΘΔ) ανά φυτό αντιστοιχούσε σε 3 L σε όλες τις πειραματικές επεμβάσεις. Η έναρξη των μεταχειρίσεων έγινε αμέσως μετά τη μεταφύτευση των σποροφύτων στα κανάλια υδροπονίας.

Και στα δύο πειράματα, οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας για τη συμπλήρωση θρεπτικών στοιχείων και νερού στο σύστημα ήταν ίδιες για όλες τις μεταχειρίσεις, και η σύνθεση του ήταν:  $7,40 \text{ mM K}^+$ ,  $5,30 \text{ mM Ca}^{2+}$ ,  $1,20 \text{ mM Mg}^{2+}$ ,  $1,10 \text{ mM NH}_4^+$ ,  $17,00 \text{ mM NO}_3^-$ ,  $1,40 \text{ mM H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $1,21 \text{ mM SO}_4^{2-}$ ,  $18 \text{ }\mu\text{M Fe}$ ,  $10 \text{ }\mu\text{M Mn}$ ,  $6 \text{ }\mu\text{M Zn}$ ,  $0,8 \text{ }\mu\text{M Cu}$ ,  $30 \text{ }\mu\text{M B}$ , and  $0,5 \text{ }\mu\text{M Mo}$ . Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και το pH του θρεπτικού διαλύματος ήταν  $2,4 \text{ dS m}^{-1}$  και  $5,6$ , αντίστοιχα. Η ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος σε όλες τις μεταχειρίσεις ήταν συνεχής και πλήρης (με μηδέν απορροές) για όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας. Απώλειες θρεπτικού διαλύματος από το σύστημα ήταν πρακτικά αμελητέες. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η μέση ημερήσια θερμοκρασία και η μέση σχετική υγρασία στο θερμοκήπιο ήταν  $21,5^\circ\text{C}$  και  $69,7\%$ , αντίστοιχα, στο X-A πείραμα, και  $28,7^\circ\text{C}$  και  $69,1\%$ , αντίστοιχα, στο A-K πείραμα. Η ποσότητα της ημερήσιας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που έφθανε στο θερμοκήπιο είχε μέση τιμή  $14,4 \text{ MJ m}^{-2}$  και  $26,5 \text{ MJ m}^{-2}$ , στο X-A και το A-K πείραμα αντίστοιχα.

### **5.2.2. Χειρισμός δεδομένων και χημικές αναλύσεις**

Η αναλογία απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων και νερού (συγκεντρώσεις απορρόφησης, ΣΑ) για N, P, K, Ca και Mg υπολογίστηκαν με δύο ανεξάρτητες μεθόδους

υπολογισμού, δηλ. με βάση την απομάκρυνση των θρεπτικών στοιχείων από το θρεπτικό διάλυμα και με βάση την ανάκτηση των θρεπτικών στοιχείων από τους φυτικούς ιστούς (βλέπε υποενότητα 3.5). Από τα δεδομένα προκύπτει ότι και οι δύο μέθοδοι υπολογισμού είναι αξιόπιστες και δεδομένου ότι έδωσαν συγκρίσιμα αποτελέσματα περαιτέρω αναλύσεις έγιναν ανασυνθέτοντας τα αποτελέσματα από τις δύο μεθόδους (Pardossi et al., 2004, Neocleous and Savvas, 2015). Ολόκληρα φυτά και υδατικά διαλύματα συγκομίζονταν από κάθε υδροπονική μονάδα στην αρχή και στο τέλος κάθε χρονικής περιόδου, δηλ., 0-30, 30-60, 60-90 και 90-110 ημέρες μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων (HMEM), στο πείραμα X-A, και 0-25, 25-50 και 50-75 HMEM, στο πείραμα A-K. Τα φυτά διαχωρίστηκαν σε φύλλα, ρίζες, βλαστούς και καρπούς, στα οποία φυτικά μέρη ακολούθως προσδιορίστηκαν οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών μακροστοιχείων. Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στη ξηρή βιομάζα των κλαδεμάτων λήφθηκε υπόψη στους υπολογισμούς. Ο προσδιορισμός των επιλεγμένων μακροθρεπτικών N, P, K, Ca και Mg όπως και του χλωρίου (Cl<sup>-</sup>) και του νατρίου (Na<sup>+</sup>) σε φυτικούς ιστούς και υδατικά διαλύματα έγιναν όπως περιγράφεται αναλυτικά στην υποενότητα 3.5. Ακολούθως, τα δεδομένα των ΣΑ των μακροστοιχείων (εκφραζόμενα σε mmol L<sup>-1</sup>) τα οποία προσδιορίστηκαν για τις διαδοχικές χρονικές περιόδους, αναλύθηκαν ξανά για τον υπολογισμό των ΣΑ με βάση τρία στάδια ανάπτυξης της πεπονιάς (Στάδιο I = βλαστικό στάδιο – δέσιμο καρπών, Στάδιο II = δέσιμο καρπών – έναρξη δικτύωσης, Στάδιο III = έναρξη δικτύωσης – συγκομιδή).



**Εικόνα 5.1.** Στάδιο ανάπτυξης πεπονιάς δέσιμο καρπών - έναρξη δικτύωσης.

### 5.2.3. Περιγραφή μαθηματικού προσομοιώματος

Τα δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων επέτρεψαν την ανάπτυξη μαθηματικής σχέσης μεταξύ των παραμέτρων που εξετάστηκαν δηλ. τη συγκέντρωση του  $\text{Na}^+$  ή του  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον των ριζών σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού. Εφόσον το υδροπονικό σύστημα είναι τελείως κλειστό, ο όγκος του αρδευτικού νερού που εισέρχεται σε αυτό όταν παρασκευάζεται νέο θρεπτικό διάλυμα είναι ίσος με τον όγκο νερού που απορροφούν τα φυτά (διαπνευστικές απώλειες), ενώ από τις ποσότητες  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  που εισέρχονται στο σύστημα με το νερό άρδευσης ένα μέρος απορροφάται από τα φυτά και ένα μέρος παραμένει και συσσωρεύεται στο περιβάλλον των ριζών. Όπως αναφέρεται στην υποενότητα 2.11, σε αυτές τις συνθήκες, η σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης απορρόφησης (αναλογία απορρόφησης ιόντος προς νερό) του  $\text{Na}^+$  ή του  $\text{Cl}^-$  ( $C_{xu}$ ,  $x = \text{Na}^+, \text{Cl}^-$ ) και της συγκέντρωσης τους στο περιβάλλον της ρίζας ( $C_{xs}$ ), ( $x = \text{Na}^+, \text{Cl}^-$ ), μπορεί να περιγραφεί με μια από τις ακόλουθες δύο μαθηματικές εξισώσεις (ανάλογα με το είδος του καλλιεργούμενου φυτού) σύμφωνα με τους Sonneveld et al. (1999):

$$C_{xu} = \alpha C_{xs}^b \quad (1)$$

$$C_{xu} = m C_{xs} \quad (2)$$

Στις σχέσεις (1) και (2) γίνεται αποδεκτό ότι η τομή της εξίσωσης (intercept) είναι μηδέν, καθώς όταν η συγκέντρωση του  $\text{Na}^+$  ή του  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον της ρίζας είναι μηδενική, είναι λογικό ότι και η συγκέντρωση απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  ή του  $\text{Cl}^-$  είναι μηδενική. Με βάση το ισοζύγιο μαζών αποδεικνύεται ότι, σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα, η αύξηση της  $C_{xs}$  είναι ανάλογη της αύξησης της αθροιστικής κατανάλωσης νερού από τα φυτά ( $V_w$ ) και της διαφοράς μεταξύ του  $\text{Na}^+$  ή του  $\text{Cl}^-$  που εισέρχεται στο σύστημα ( $C_{xw}$ ) και του  $\text{Na}^+$  ή του  $\text{Cl}^-$  που απορροφάται από τα φυτά ( $C_{xu}$ ) και αντιστρόφως ανάλογη προς το συνολικό όγκο του θρεπτικού διαλύματος που περιέχεται στο σύστημα ( $V_s$ ). Μαθηματικά, η παραπάνω σχέση σύμφωνα με τους Savvas et al. (2005a, b) γράφεται ως εξής:

$$dC_{xs} = dV_w (C_{xw} - C_{xu}) / V_s \quad (3)$$

Αν η  $C_{xu}$  στην εξίσωση (3) αντικατασταθεί από τις εξισώσεις (1) και (2) και γίνουν οι κατάλληλες πράξεις, προκύπτουν οι παρακάτω διαφορικές εξισώσεις (βλέπε επίσης Sannas et al., 2007):

$$dC_{xs} / dV_w = (C_{xw} - aC_{xs}^b) / V_s \quad (4)$$

$$dC_{xs} / dV_w = (C_{xw} - mC_x) / V_s \quad (5)$$

Οι τιμές  $a$ ,  $b$  και  $m$  είναι σταθερές εξαρτώμενες από το είδος του καλλιεργούμενου φυτού και τις συνθήκες ανάπτυξης, οι οποίες υπολογίσθηκαν με μη γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης των πειραματικών δεδομένων τα οποία λήφθηκαν από όλη την περίοδο καλλιέργειας του πεπονιού και όλες τις μεταχειρίσεις αλατότητας, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (1) (Sannas et al., 2005a, b) και (2) (Carmassi et al., 2005), αντίστοιχα. Ακολούθως, οι εξισώσεις (4) και (5) χρησιμοποιήθηκαν σαν μοντέλα για να υπολογισθούν οι συγκεντρώσεις του  $\text{Na}^+$  ή  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον των ριζών ( $C_{xs}$ ) σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού ( $V_w$ ) από τα φυτά πεπονιάς, χρησιμοποιώντας την κλασική μέθοδο των Runge-Kutta τέταρτης τάξης (Butcher, 1987) σύμφωνα με τους Sannas et al. (2007). Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου (προσδιορισμός  $a$ ,  $b$  και  $m$ ) χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα της καλλιέργειας Άνοιξης-Καλοκαιριού (Α-Κ). Η αξιοπιστία του μοντέλου (προβλεπόμενες σε σύγκριση με μετρούμενες τιμές) δοκιμάστηκε σε καλλιέργεια πεπονιάς κάτω από διαφορετικές κλιματικές συνθήκες (καλλιέργεια Χειμώνα-Άνοιξης, Χ-Α).



**Εικόνα 5.2.** Ανάπτυξη ριζικού συστήματος πεπονιάς σε κανάλια NFT.

#### **5.2.4. Στατιστική επεξεργασία**

Το πειραματικό σχέδιο που εφαρμόστηκε και στα δύο πειράματα θερμοκηπίου ήταν το τυχαιοποιημένο σχέδιο πλήρων ομάδων. Εφαρμόστηκαν τρεις μεταχειρίσεις αλατότητας οι οποίες αντιστοιχούσαν σε τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl στο νερό άρδευσης (0,7, 2,5 και 5 mM), με τρεις επαναλήψεις για κάθε μεταχείριση (τυχαία τοποθετημένες σε τρεις ομάδες). Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων έγινε με το στατιστικό πακέτο SAS (Version 9.2, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). Η ανάλυση των δεδομένων έγινε με τη μέθοδο της ανάλυσης διασποράς (ANOVA), και τα γραφήματα σχεδιάστηκαν με τη βοήθεια του πακέτου GraphPad Prism (Version 5.0, GraphPad Software, San Diego California, USA).

### **5.3. Αποτελέσματα**

#### **5.3.1. Κατανάλωση νερού και συγκέντρωση αλάτων στο ριζόστρωμα**

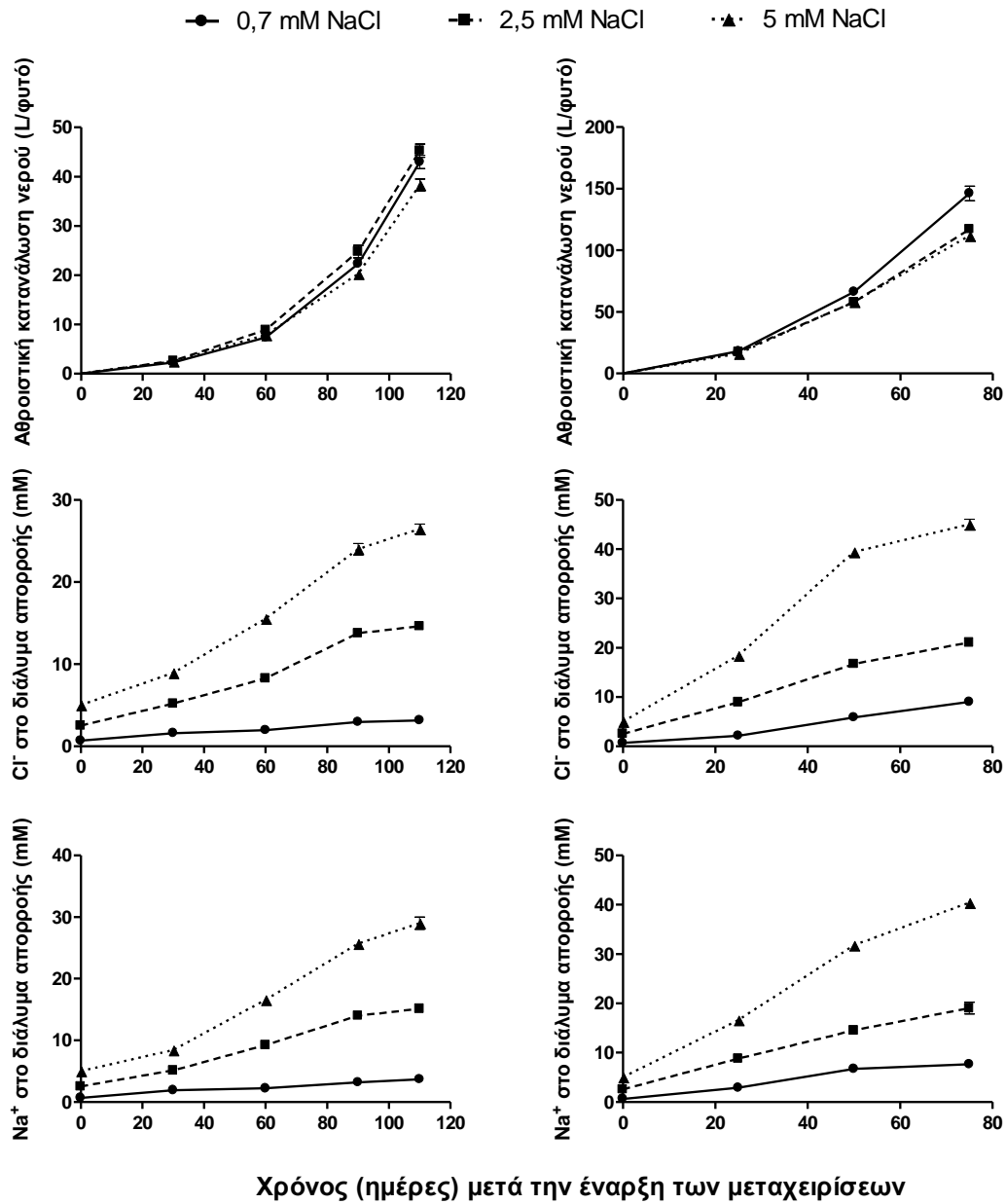
Η συνεχής ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος με την υψηλότερη συγκέντρωση αλατότητας (5 mM NaCl) μείωσε την αθροιστική κατανάλωση νερού από τα φυτά πεπονιάς κατά περίπου 11%, 110 ημέρες μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων (HMEM) στην καλλιέργεια Χειμώνα-Άνοιξης (X-A) και περίπου κατά 24%, 75 HMEM στην καλλιέργεια Άνοιξης-Καλοκαιριού (A-K), συγκρινόμενη με τη μεταχείριση χαμηλής συγκέντρωσης άλατος στο νερό άρδευσης (0,7 mM NaCl). Εντούτοις, τα φυτά στη μεταχείριση με περιεκτικότητα 2,5 mM NaCl στο φρέσκο θρεπτικό διάλυμα είχαν παρόμοια κατανάλωση νερού με τα φυτά στη μεταχείριση 5 mM NaCl, στην καλλιέργεια A-K (Σχήμα 5.1). Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα από όλες τις μεταχειρίσεις αλατότητας, η αθροιστική κατανάλωση νερού είχε μέση τιμή 125 L/φυτό στο πείραμα A-K και 42 L/φυτό στο πείραμα X-A. Η σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων του Cl<sup>-</sup> και Na<sup>+</sup> στο διάλυμα απορροής σε συνάρτηση με το χρόνο, εκφραζόμενου ως ημέρες μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1. Η σχέση αυτή ακολούθησε σιγμοειδή πορεία μεταβολής,



ειδικότερα για τα δύο υψηλότερα επίπεδα αλατότητας (δηλ. 2,5 και 5 mM NaCl), οδηγώντας σε τελικές συγκεντρώσεις Cl<sup>-</sup> στο διάλυμα απορροής μεταξύ 21 - 45 mM στην καλλιέργεια A-K και 15 - 26 mM στην καλλιέργεια X-A. Αντίστοιχα, οι συγκεντρώσεις Na<sup>+</sup> στο διάλυμα απορροής ανήλθαν σε επίπεδα 19 - 40 mM στην καλλιέργεια A-K και 15 - 29 mM στην καλλιέργεια X-A. Στη μεταχείριση χαμηλότερης συγκέντρωσης αλατότητας (0,7 mM NaCl) και τα δύο ιόντα του άλατος δεν υπερέβησαν στο διάλυμα απορροής τις συγκεντρώσεις 10 mM στο A-K πείραμα και 5 mM στο X-A πείραμα.

Χειμώνα-Άνοιξης καλλιέργεια

Άνοιξης-Καλοκαιριού καλλιέργεια



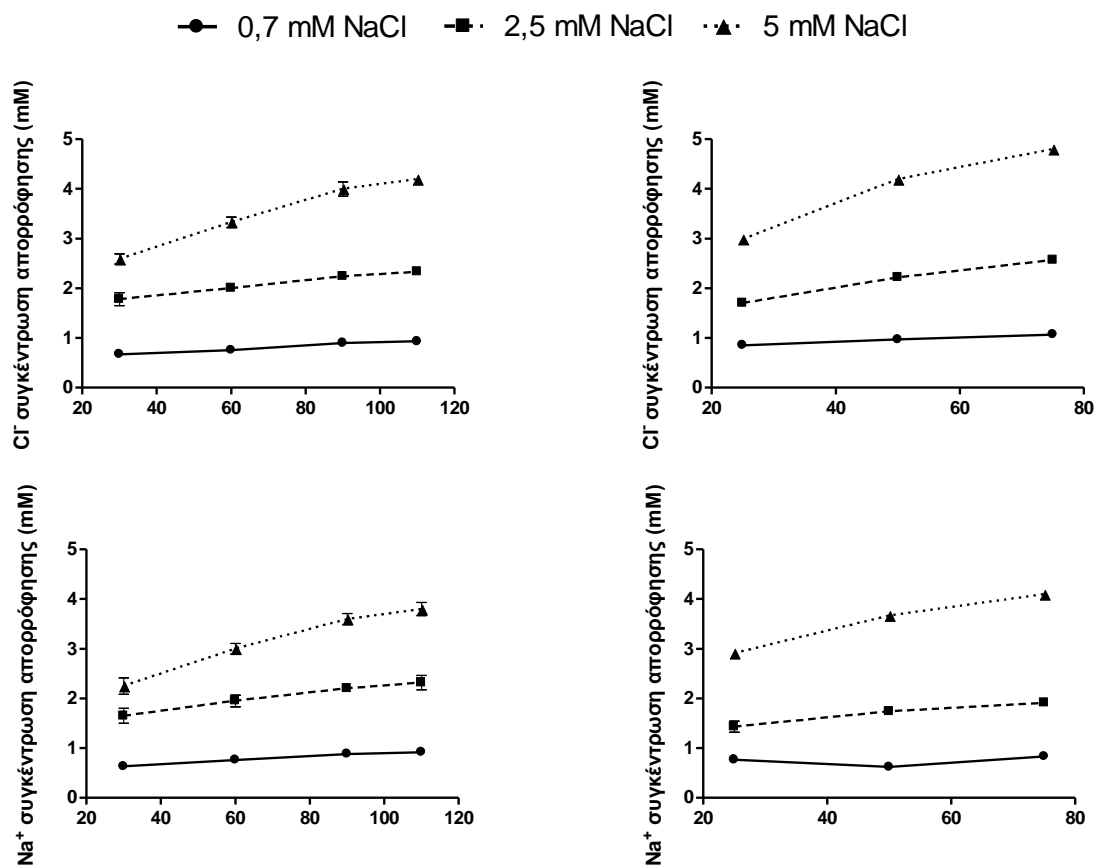
**Σχήμα 5.1.** Πορεία μεταβολής της αθροιστικής κατανάλωσης νερού, της συγκέντρωσης  $\text{Cl}^-$  και  $\text{Na}^+$  στο διάλυμα απορροής σε συνάρτηση με το χρόνο (ημέρες μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων) σε πεπόνι καλλιεργούμενο σε τελείως κλειστό υδροπονικό σύστημα – NFT, όπως επηρεάστηκε από τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις  $\text{NaCl}$  στο αρδευτικό νερό (0,7, 2,5 και 5 mM  $\text{NaCl}$ ) που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος σε δύο διαφορετικές εποχές καλλιέργειας (Χειμώνα-Άνοιξης και Άνοιξης-Καλοκαιριού). Τα σύμβολα απεικονίζουν μέσες μετρημένες τιμές ( $n = 3$ ) για το  $\text{Cl}^-$  και το  $\text{Na}^+$ . Οι κατακόρυφες μπάρες υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα του μέσου και μπορεί να είναι μικρότερες από τα σύμβολα.

### 5.3.2. Συγκεντρώσεις απορρόφησης του $\text{Na}^+$ και του $\text{Cl}^-$

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2, οι συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  βαθμιαία αυξήθηκαν με την πάροδο του χρόνου από την ημέρα έναρξης των μεταχειρίσεων, ακολουθώντας την αύξηση των συγκεντρώσεων του  $\text{Cl}^-$  και του  $\text{Na}^+$  στο διάλυμα απορροής. Στην ίδια μεταχείριση αλατότητας, ο ρυθμός αύξησης της συγκέντρωσης απορρόφησης (αύξηση στη μονάδα του χρόνου) ήταν εντονότερος στο εαρινό-θερινό (A-K) από το χειμερινό-εαρινό πείραμα (X-A) και για τα δύο ιόντα του άλατος. Επιπλέον, με την αύξηση της συγκέντρωσης του άλατος στις μεταχειρίσεις, παρατηρήθηκε επιτάχυνση του ρυθμού αύξησης των συγκεντρώσεων απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  στη μονάδα του χρόνου. Οι συγκεντρώσεις απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  παρουσίασαν παρόμοια πορεία μεταβολής για τις πλείστες μεταχειρίσεις αλατότητας και για όλη την καλλιεργητική περίοδο του πεπονιού ανεξάρτητα από την εποχή καλλιέργειας.

### Χειμώνα-Άνοιξης καλλιέργεια

### Άνοιξης-Καλοκαιριού καλλιέργεια



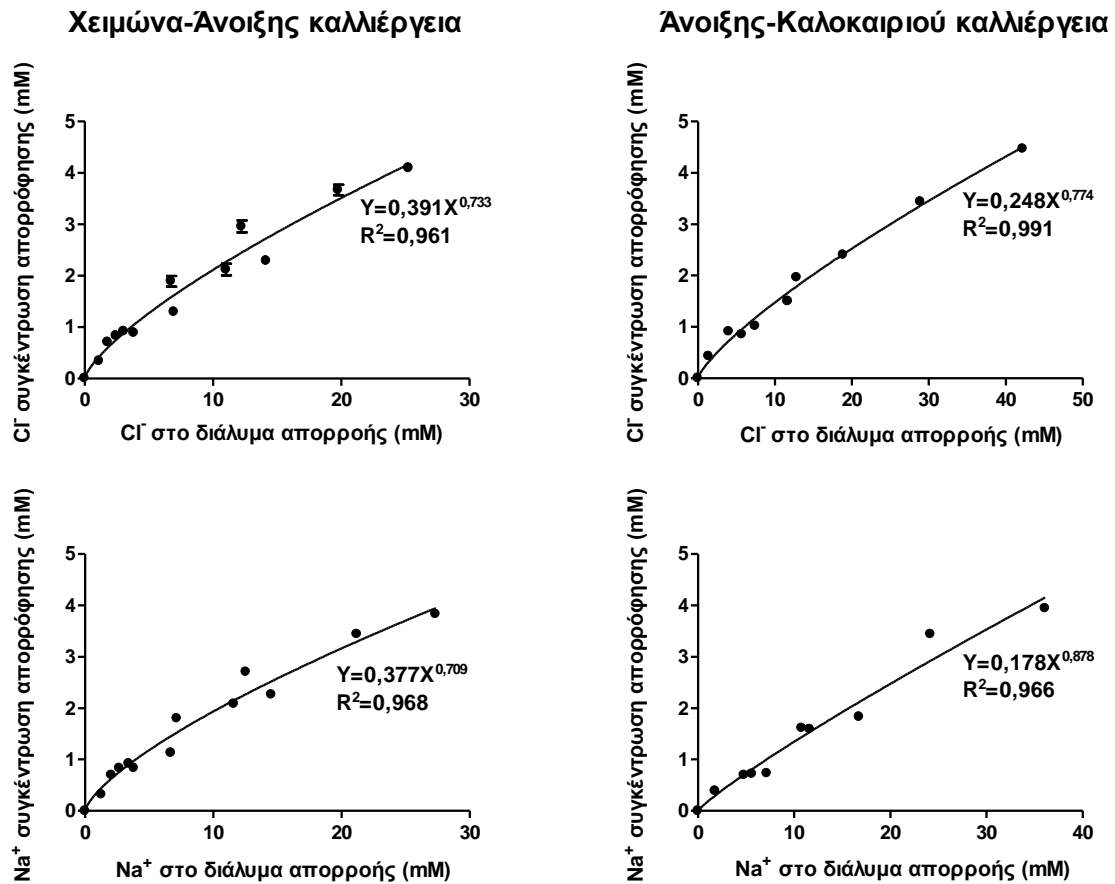
### Χρόνος (ημέρες) μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων

**Σχήμα 5.2.** Πορεία μεταβολής των συγκεντρώσεων απορρόφησης του Cl<sup>-</sup> και του Na<sup>+</sup> στο διάλυμα απορροής σε συνάρτηση με το χρόνο (ημέρες μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων) σε πεπόνι καλλιεργούμενο σε τελείως κλειστό υδροπονικό σύστημα – NFT, όπως επηρεάστηκε από τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl στο αρδευτικό νερό (0,7, 2,5 και 5 mM NaCl) που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή θρεπτικού διαλύματος σε δύο διαφορετικές εποχές καλλιέργειας (Χειμώνα-Άνοιξης και Άνοιξης-Καλοκαιριού). Τα σύμβολα απεικονίζουν μέσες μετρημένες τιμές (n = 3) για το Cl<sup>-</sup> και το Na<sup>+</sup>. Οι κατακόρυφες μπάρες υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα του μέσου και μπορεί να είναι μικρότερες από τα σύμβολα.

### 5.3.3. Ανάπτυξη και βαθμονόμηση του μοντέλου

Το μαθηματικό προσομοίωμα (μοντέλο) το οποίο περιγράφει καλύτερα τις σχέσεις μεταξύ των συγκεντρώσεων του  $\text{Cl}^-$  και του  $\text{Na}^+$  στο περιβάλλον των ριζών, όπως μετρήθηκε στο διάλυμα απορροής, και των αντίστοιχων συγκεντρώσεων απορρόφησης ( $\Sigma A$ ) του  $\text{Cl}^-$  και του  $\text{Na}^+$  από τα φυτά, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.3. Τα ζεύγη τιμών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, μετρήθηκαν σε όλες τις μεταχειρίσεις αλατότητας και για όλη την περίοδο καλλιέργειας του πεπονιού και εφαρμόστηκε μη γραμμική ανάλυση της παλινδρόμησης στα δεδομένα θεωρώντας ότι η τομή (intercept) στην εξίσωση είναι μηδέν (οι συγκεντρώσεις απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  είναι μηδενικές όταν οι συγκεντρώσεις τους στο περιβάλλον της ρίζας είναι μηδενικές). Ο συντελεστής προσδιορισμού ( $R^2$ ) της γραμμικής σχέσης (μεταξύ συγκέντρωσης στη ρίζα και συγκέντρωση απορρόφησης) για το  $\text{Cl}^-$  και το  $\text{Na}^+$  σύμφωνα με την εξίσωση (2) ήταν 0,909 και 0,899, αντίστοιχα, στο πείραμα X-A και 0,954 και 0,955, αντίστοιχα, στο πείραμα A-K. Ο αντίστοιχος συντελεστής  $R^2$  ο οποίος εκτιμάει την εκθετική μορφή του μοντέλου, χρησιμοποιώντας την εκδοχή της εξίσωσης (1) ως μοντέλο, για το  $\text{Cl}^-$  και το  $\text{Na}^+$  ήταν 0,961 και 0,968, αντίστοιχα, στο X-A και 0,991 και 0,966, αντίστοιχα, στο A-K πείραμα. Μολονότι η σύγκριση των προβλεπόμενων τιμών που προκύπτουν με τη γραμμική και την εκθετική εκδοχή του προσομοιώματος με τις μετρούμενες τιμές, επιβεβαίωσε τη δυνατότητα πρόβλεψης με αποδεκτή ακρίβεια και των δύο μοντέλων, εντούτοις η εκθετική μορφή του προσομοιώματος έδειξε ότι παρέχει σημαντικά μεγαλύτερη ακρίβεια στις προβλέψεις, λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές προσδιορισμού για τα δύο ιόντα και πειράματα. Για το λόγο αυτό, μόνο η εκθετική εκδοχή του προσομοιώματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα X-A και την εξίσωση (1) ως πρότυπη, οι τιμές που προσδιορίστηκαν για τις παραμέτρους  $a$  για το  $\text{Cl}^-$  και  $\text{Na}^+$  ήταν 0,391 και 0,377 και οι τιμές του  $b$  ήταν 0,733 και 0,709, αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα A-K και ως πρότυπη την ίδια εξίσωση, η

παράμετρος  $a$  ήταν 0,248 και 0,178 και η παράμετρος  $b$  ήταν 0,774 και 0,878, για το  $\text{Cl}^-$  και το  $\text{Na}^+$  αντίστοιχα.

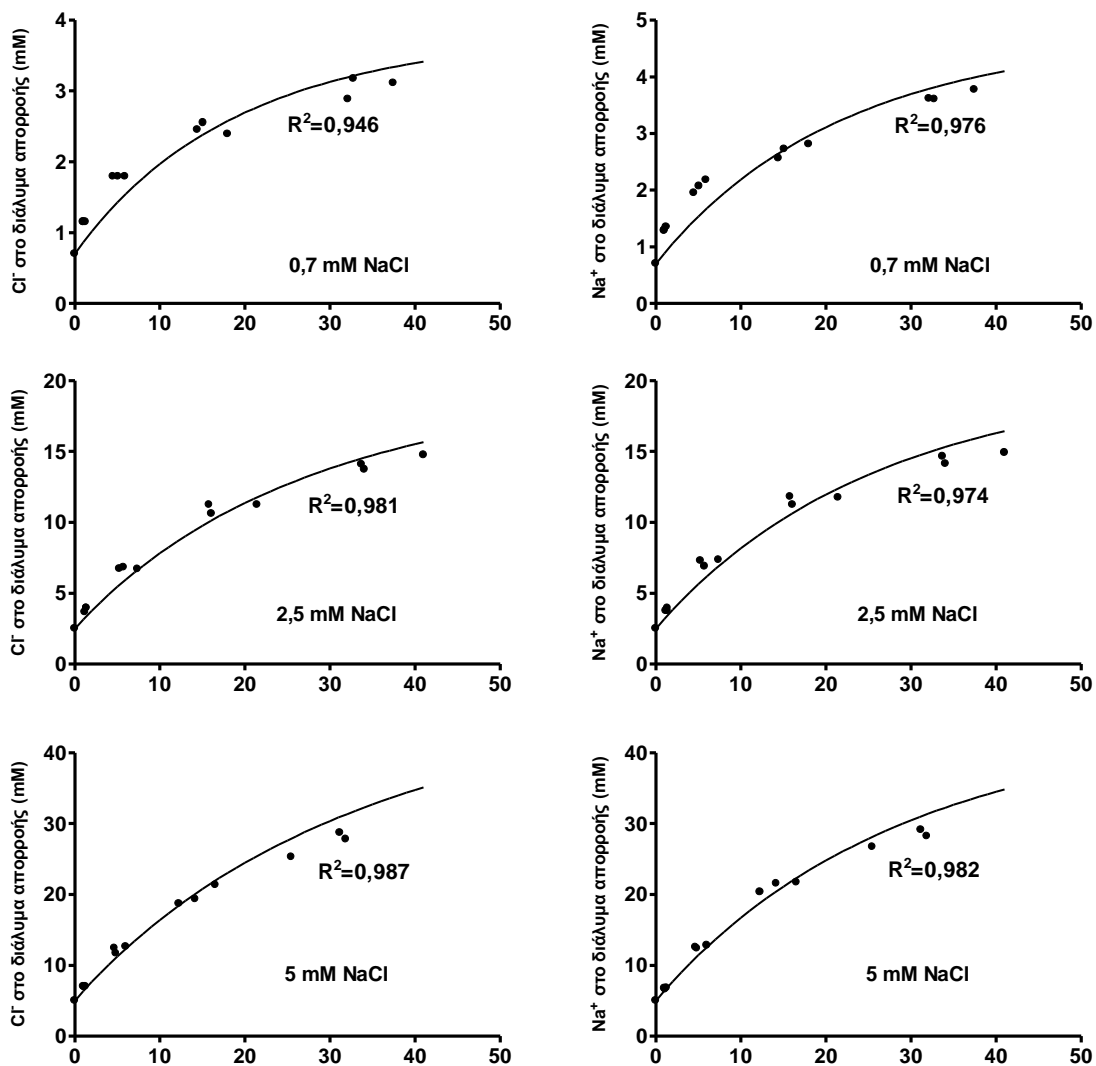


**Σχήμα 5.3.** Σχέση (η σχέση βασίζεται στο καλύτερο προσομοίωμα) μεταξύ των συγκεντρώσεων  $\text{Cl}^-$  και  $\text{Na}^+$  στο διάλυμα απορρόφησης, και των αντίστοιχων συγκεντρώσεων απορρόφησης  $\text{Cl}^-$  και  $\text{Na}^+$  σε πεπόνι καλλιεργούμενο σε τελείως κλειστό υδροπονικό σύστημα – NFT, σε δύο διαφορετικές εποχές καλλιέργειας (Χειμώνα-Άνοιξης και Άνοιξης-Καλοκαιριού). Τα σύμβολα υποδηλώνουν μέσες μετρημένες τιμές ( $n = 3$ ) για το  $\text{Cl}^-$  και το  $\text{Na}^+$  σε 0,7, 2,5 και 5 mM συγκεντρώσεις NaCl στο αρδευτικό νερό. Οι κατακόρυφες μπάρες υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα του μέσου και μπορεί να είναι μικρότερες από τα σύμβολα.

#### 5.3.4. Έλεγχος αξιοπιστίας του μοντέλου

Οι καμπύλες που παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.4 και 5.5 προσομοιάζουν τη συσσώρευση του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον της ρίζας σε καλλιέργεια πεπονιάς σε

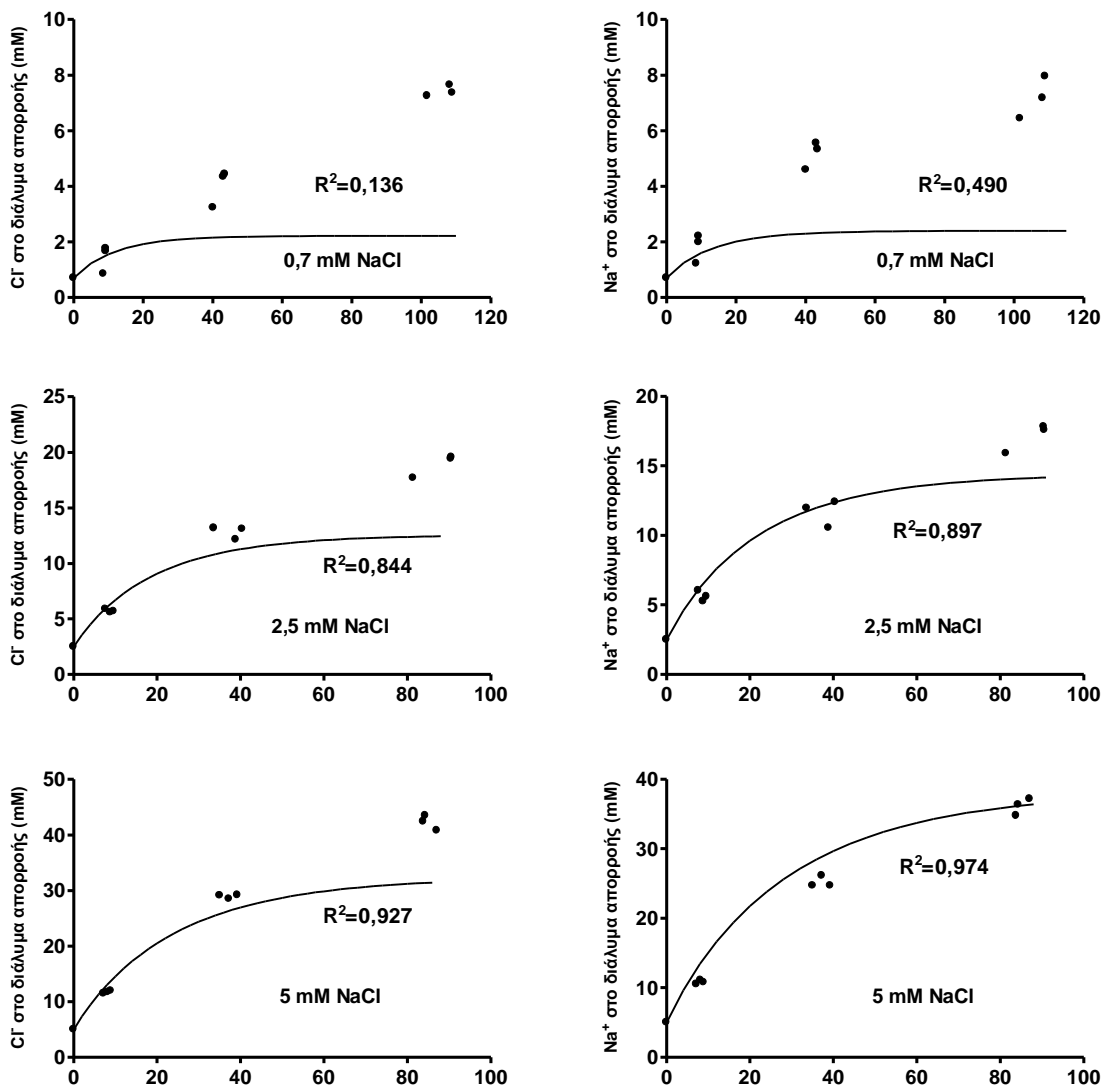
κλειστό υδροπονικό σύστημα σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού, όταν η συγκέντρωση του NaCl στο θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης θρεπτικών στοιχείων και νερού είναι 0,7, 2,5 και 5 mM. Για την στατιστική αξιολόγηση της δυνατότητας πρόβλεψης της εκθετικής μορφής του μοντέλου, οι εκτιμώμενες και μετρημένες τιμές χρησιμοποιήθηκαν (ως ζεύγη τιμών) σε γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης και οι συντελεστές προσδιορισμού ( $R^2$ ) απεικονίζονται στα Σχήματα 5.4 και 5.5. Οι καμπύλες στο Σχήμα 5.4 συμβολίζουν εκτιμώμενες τιμές επιλύοντας την εξίσωση (4) και χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του πειράματος A-K, ενώ τα σύμβολα απεικονίζουν μετρημένες τιμές στο πείραμα X-A. Ανάλογα, το Σχήμα 5.5 παρουσιάζει τις γραμμές (καμπύλες) που συμβολίζουν τις εκτιμώμενες τιμές που προέκυψαν επιλύοντας την εξίσωση (4), χρησιμοποιώντας τα δεδομένα X-A και ως σύμβολα τις μετρημένες τιμές στο A-K πείραμα. Όταν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα A-K, εκτιμώμενες και μετρημένες τιμές είχαν πολύ μικρή απόκλιση με υψηλή τιμή του συντελεστή προσδιορισμού σε όλο το εύρος των συγκεντρώσεων NaCl που μελετήθηκαν (Σχήμα 5.4). Εντούτοις, όταν το μοντέλο βαθμονομήθηκε χρησιμοποιώντας τα δεδομένα X-A, η ακρίβεια στις προβλέψεις δεν ήταν ικανοποιητική σε ορισμένες περιπτώσεις (Σχήμα 5.5).



#### Αθροιστική κατανάλωση νερού (L/φυτό)

**Σχήμα 5.4.** Συγκεντρώσεις Cl<sup>-</sup> και Na<sup>+</sup> στο διάλυμα απορροής σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού. Τα δεδομένα έχουν ληφθεί από καλλιέργεια πεπονιάς σε τελείως κλειστό υδροπονικό σύστημα – NFT, με τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl στο αρδευτικό νερό που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή θρεπτικού διαλύματος. Σε κάθε διάγραμμα, οι γραμμές συμβολίζουν εκτιμώμενες τιμές χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του πειράματος Άνοιξης-Καλοκαιριού (A-K), ενώ τα σύμβολα απεικονίζουν μετρημένες τιμές στο πείραμα Χειμώνα-Άνοιξης (X-A). Οι συντελεστές προσδιορισμού (R<sup>2</sup>) της γραμμικής ανάλυσης παλινδρόμησης μεταξύ των εκτιμώμενων και μετρημένων τιμών απεικονίζονται στα γραφήματα.





### Αθροιστική κατανάλωση νερού (L/φυτό)

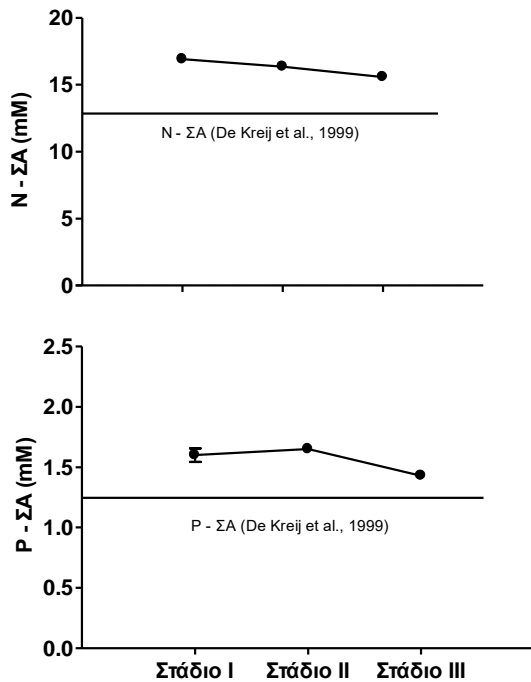
**Σχήμα 5.5.** Συγκεντρώσεις Cl<sup>-</sup> και Na<sup>+</sup> στο διάλυμα απορροής σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού. Τα δεδομένα έχουν ληφθεί από καλλιέργεια πεπονιάς σε τελείως κλειστό υδροπονικό σύστημα – NFT, με τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl στο αρδευτικό νερό που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή θεραπευτικού διαλύματος. Σε κάθε διάγραμμα, οι γραμμές συμβολίζουν εκτιμώμενες τιμές χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του πειράματος Χειμώνα-Άνοιξης (X-A), ενώ τα σύμβολα απεικονίζουν μετρημένες τιμές στο πείραμα Άνοιξης-Καλοκαιριού (A-K). Οι συντελεστές προσδιορισμού (R<sup>2</sup>) της γραμμικής ανάλυσης παλινδρόμησης μεταξύ των εκτιμώμενων και μετρημένων τιμών απεικονίζονται στα γραφήματα.

### 5.3.5. Συγκεντρώσεις απορρόφησης των μακροστοιχείων N, P, K, Ca και Mg

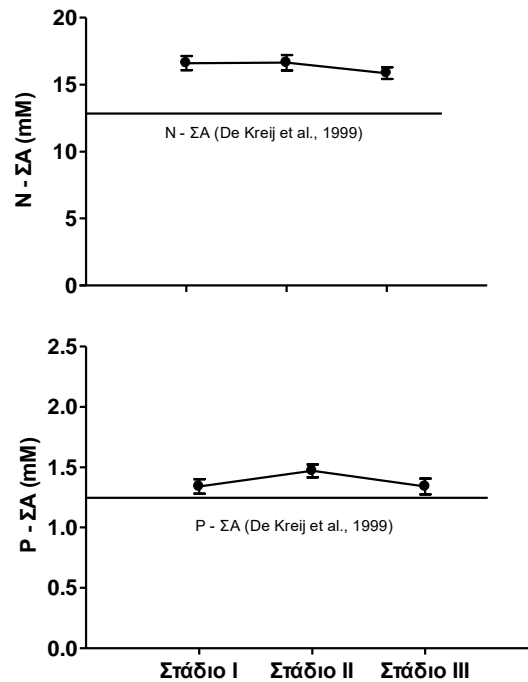
Στα πειράματα που διεξάχθηκαν, η στατιστική έδειξε ότι η αλατότητα στο εύρος που μελετήθηκε δεν επηρέασε σημαντικά τις συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) του N, P, K, Ca και Mg από τα φυτά πεπονιάς. Εντούτοις, το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας επηρέασε τις παραμέτρους που μελετήθηκαν. Αν και σημαντικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ του επιπέδου αλατότητας και του σταδίου ανάπτυξης της καλλιέργειας δεν υπήρχαν, θεωρήθηκε χρήσιμο να παρουσιαστούν οι χρονικές διακυμάνσεις των ΣΑ των θρεπτικών μακροστοιχείων τόσο κατά τη διάρκεια ανάπτυξης της καλλιέργειας όσο και σε διαφορετικές εποχές καλλιέργειας (Σχήμα 5.6). Ο προσδιορισμός των ΣΑ βασιζόμενος και στις δύο μεθόδους υπολογισμού (δηλ. την απομάκρυνση θρεπτικών στοιχείων από το θρεπτικό διάλυμα και την ανάκτηση θρεπτικών στοιχείων από τη ξηρή βιομάζα ανά μονάδα όγκου καταναλισκόμενου νερού) έδειξε ότι η ΣΑ του K ήταν αυξημένη κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων ανάπτυξης και στις δύο εποχές καλλιέργειας και βαθμιαία μειώθηκε με το χρόνο ειδικότερα στο πείραμα A-K (Σχήμα 5.6). Η ΣΑ του Ca (Σχήμα 5.6), όπως και στην περίπτωση του K, αντανakλούσε τη συγκέντρωση  $Ca^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας. Αναφορικά με τις χρονικές διακυμάνσεις, οι τιμές που προσδιορίστηκαν για τη ΣΑ του Ca σε κατοπινά στάδια της καλλιέργειας, ήταν μικρότερες συγκρινόμενες με τις τιμές που υπολογίστηκαν για τα αρχικά στάδια ανάπτυξης. Η ΣΑ του Mg αντανakλούσε τη συγκέντρωση  $Mg^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας, και οι τιμές κυμάνθηκαν σε παρόμοια επίπεδα κατά τη διάρκεια των αρχικών και τελικών σταδίων ανάπτυξης (Σχήμα 5.6). Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δεδομένα, οι μέσες ΣΑ του K και Mg συγκλίνουν στις τιμές (ΣΑ) οι οποίες προσδιορίστηκαν στα θερμοκήπια των χωρών της Βόρειας Ευρώπης ενώ η ΣΑ του Ca εμφανίζεται σχετικά αρκετά αυξημένη (Σχήμα 5.6). Η ΣΑ του N ήταν μεγαλύτερη στα αρχικά στάδια ενώ μειώθηκε με την πάροδο του χρόνου κατά τη διάρκεια του βλαστικού κύκλου (Σχήμα 5.6). Η ΣΑ του N, όπως και στην περίπτωση του Ca, ήταν αρκετά αυξημένη συγκρινόμενη με τις

τιμές που προσδιορίστηκαν σε θερμοκήπια στις κλιματικές συνθήκες της Βόρειας Ευρώπης. Παρόλο που η πορεία μεταβολής της ΣΑ του P δεν ήταν πανομοιότυπη και στις δύο εποχές καλλιέργειας (δηλ. φθίνουσα πορεία με το χρόνο παρατηρήθηκε μόνο στο πείραμα X-A), η ΣΑ του P κυμάνθηκε γύρω στο επίπεδο 1.5 mM και στις δύο εποχές, τιμή η οποία είναι αυξημένη συγκρινόμενη με αυτήν που προσδιορίστηκε στις κλιματικές συνθήκες της Ολλανδίας (Σχήμα 5.6). Ο προσδιορισμός των μέσων ΣΑ των επιλεγμένων μακροστοιχείων σε δύο συνεχόμενες περιόδους καλλιέργειας έδωσε παρόμοια αποτελέσματα. Επομένως, ανασυνθέτοντας τα δεδομένα σύμφωνα με τα στάδια ανάπτυξης της πεπονιάς, οι μέσες ΣΑ του N, P, K, Ca και Mg υπολογίστηκαν ως ακολούθως: (i) 16,8, 1,5, 7,7, 4,7 και 1,1 mmol L<sup>-1</sup>, αντίστοιχα (Στάδιο I, βλαστικό στάδιο – δέσιμο καρπών), (ii) 16,5, 1,5, 7,2, 4,6 και 1,1 mmol L<sup>-1</sup>, αντίστοιχα (Στάδιο II, δέσιμο καρπών – έναρξη δικτύωσης), και (iii) 15,7, 1,4, 6,9, 4,3 και 1,0 mmol L<sup>-1</sup>, αντίστοιχα (Στάδιο III, έναρξη δικτύωσης – συγκομιδή). Ωστόσο, η μέση συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα, επομένως και στο ριζόστρωμα, σταδιακά αυξήθηκε με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη της καλλιέργειας στα πειράματα (λεπτομερή αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται), όπου κυμάνθηκαν στα εξής επίπεδα: 9,67 – 19,0 [K<sup>+</sup>], 6,47 – 11,1 [Ca<sup>2+</sup>], 1,54 – 3,94 [Mg<sup>2+</sup>], 1,40 – 1,53 [P-H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>] και 19,8 – 36,8 [N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>] mmol L<sup>-1</sup>. Ανάλογα, η μέση τιμή της ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) κυμάνθηκε μεταξύ 3,2 – 6,9 dS m<sup>-1</sup>.

### Χειμώνα-Άνοιξης καλλιέργεια

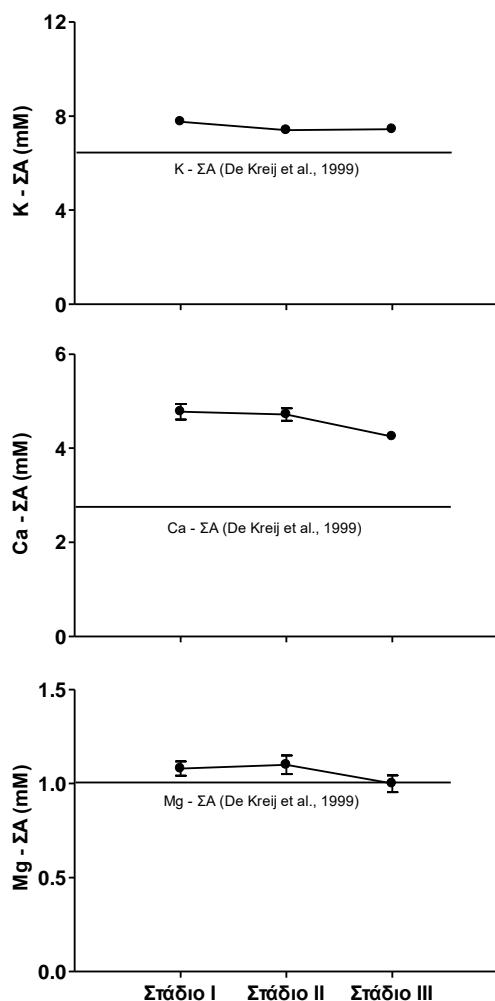


### Άνοιξης-Καλοκαιριού καλλιέργεια

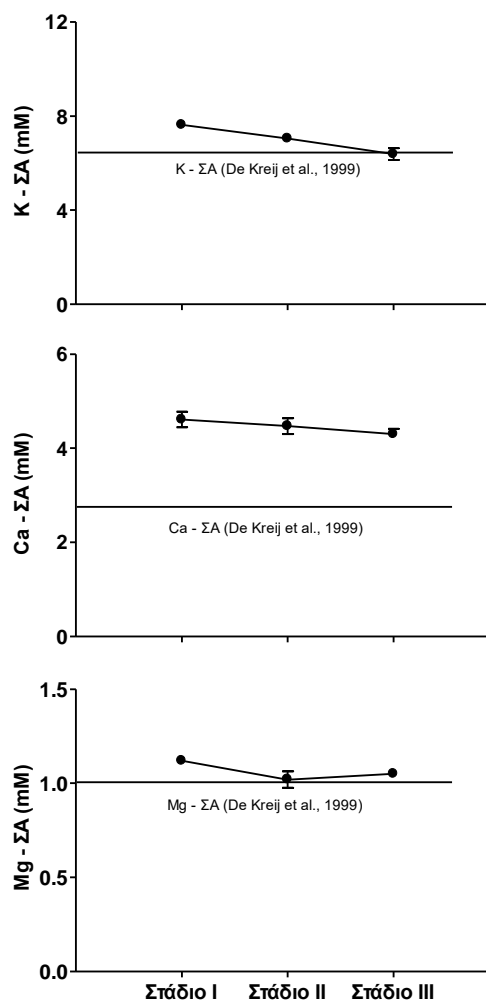


**Σχήμα 5.6.** Μέσες συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) του αζώτου (N) και φωσφόρου (P) σε συνάρτηση με το στάδιο ανάπτυξης του φυτού (Στάδιο I = βλαστικό στάδιο – δέσιμο καρπών, Στάδιο II = δέσιμο καρπών – έναρξη δικτύωσης, Στάδιο III = έναρξη δικτύωσης – συγκομιδή) σε καλλιέργεια πεπονιάς σε τελείως κλειστό υδροπονικό σύστημα – NFT, σε δύο διαφορετικές εποχές καλλιέργειας (Χειμώνα-Άνοιξης και Άνοιξης-Καλοκαιριού). Οι κατακόρυφες μπάρες υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα του μέσου ( $n = 3$ ). Οι οριζόντιες γραμμές στα γραφήματα απεικονίζουν τις μέσες ΣΑ των μακροθρεπτικών σε Ολλανδικές κλιματικές συνθήκες ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ ΣΑ σε μεσογειακές και βορειοευρωπαϊκές κλιματικές συνθήκες.

### Χειμώνα-Άνοιξης καλλιέργεια



### Άνοιξης-Καλοκαιριού καλλιέργεια



**Σχήμα 5.7.** Μέσες συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) των μακροκατιόντων K, Ca και Mg σε συνάρτηση με το στάδιο ανάπτυξης του φυτού (Στάδιο I = βλαστικό στάδιο – δέσιμο καρπών, Στάδιο II = δέσιμο καρπών – έναρξη δικτύωσης, Στάδιο III = έναρξη δικτύωσης – συγκομιδή) σε καλλιέργεια πεπονιάς σε τελείως κλειστό υδροπονικό σύστημα – NFT, σε δύο διαφορετικές εποχές καλλιέργειας (Χειμώνα-Άνοιξης και Άνοιξης-Καλοκαιριού). Οι κατακόρυφες μπάρες υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα του μέσου ( $n = 3$ ). Οι οριζόντιες γραμμές στα γραφήματα απεικονίζουν τις μέσες ΣΑ των μακροθρεπτικών σε Ολλανδικές κλιματικές συνθήκες ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ ΣΑ σε μεσογειακές και βορειοευρωπαϊκές κλιματικές συνθήκες.



**Εικόνα 5.3.** Πειραματική καλλιέργεια πεπονιάς σε υδροπονικό σύστημα τύπου NFT.

#### **5.4. Συζήτηση**

Στο εαρινό-θερινό (A-K) πείραμα, το χρονικό διάστημα από την έναρξη των μεταχειρίσεων μέχρι την παραγωγή ώριμων καρπών ήταν συντομότερο (75 ΗΜΕΜ) από ότι στο χειμερινό-εαρινό (X-A) πείραμα (110 ΗΜΕΜ), παρόλο που και στα δύο πειράματα οι καρποί κατά τη συγκομιδή βρίσκονταν στο ίδιο στάδιο ωρίμανσης. Η πρωιμότητα αυτή παρατηρήθηκε λόγω της υψηλότερης μέσης θερμοκρασίας του αέρα το 24ωρο (21,5°C και 28,7°C στο X-A και A-K πείραμα, αντίστοιχα) και της υψηλότερης ολικής ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας που έφθανε στο θερμοκήπιο (14,4 MJ m<sup>-2</sup> και 26,5 MJ m<sup>-2</sup> στο X-A και A-K, αντίστοιχα). Πράγματι, είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία ότι οι ρυθμοί ανάπτυξης των φυτών έχουν περισσότερη εξάρτηση από τις βαθμομέρες, από ότι με την πραγματική ημερολογιακή ηλικία του φυτού (Bonhomme, 2000). Ωστόσο, θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία είναι επίσης καθοριστικοί παράγοντες για τους ρυθμούς απορρόφησης νερού από τα φυτά (Sonneveld, 2002). Όντως στην παρούσα εργασία, η αυξημένη μέση ημερήσια θερμοκρασία και εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία (λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα από όλες τις μεταχειρίσεις) οδήγησε στην απορρόφηση σημαντικά μεγαλύτερης ποσότητας νερού από τα φυτά (τριπλάσια αύξηση) στο πείραμα A-K σε σύγκριση με την κατανάλωση που μετρήθηκε στο πείραμα X-A, παρά το μικρότερο βιολογικό κύκλο στο πρώτο.

Είναι γνωστό ότι η επίδραση της αλατότητας επιφέρει μείωση της κατανάλωσης νερού από τα φυτά (Munns, 2002). Σε συμφωνία με την πιο πάνω διαπίστωση, στην παρούσα εργασία η μέση κατανάλωση νερού από τα φυτά μειώθηκε με την επίδραση της αλατότητας. Στην πειραματική καλλιέργεια A-K, το μέτριο και υψηλό επίπεδο αλατότητας στο νερό θρεπτικό διάλυμα (δηλ. 2,5 και 5 mM NaCl) είχαν σαν αποτέλεσμα παρόμοια κατανάλωση νερού από τα φυτά, ενώ στη X-A καλλιέργεια, η κατανάλωση ήταν διαφορετική. Προφανώς όταν επικρατούν υψηλοί ρυθμοί διαπνοής (όπως στο πείραμα A-K), η είσοδος των ιόντων  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στο ρεύμα της διαπνοής αυξάνει τη συνολική συγκέντρωση αλάτων που εισέρχεται μέσα στο φυτό, με αποτέλεσμα οι υδατικές σχέσεις του φυτού να επηρεάζονται πανομοιότυπα. Σε αυτά τα πλαίσια, οι An et al. (2002) ελαχιστοποίησαν τα αρνητικά αποτελέσματα της αλατότητας σε φυτά πεπονιάς όταν μείωσαν τους ρυθμούς διαπνοής των φυτών, ρυθμίζοντας ανάλογα τη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας.

Αντίθετα με τους ρυθμούς κατανάλωσης νερού οι οποίοι αυξήθηκαν ακολουθώντας εκθετική πορεία μεταβολής, οι ρυθμοί συσσώρευσης των αλάτων ακολούθησαν σιγμοειδή πορεία με βαθμιαία επιβράδυνση της συσσώρευσης στα τελευταία στάδια της καλλιέργειας. Σε προηγούμενες εργασίες με γαρύφαλλο, ζέρμπερα (Baas et al., 1995) και αγγούρι (Savvas et al., 2005a, b), τα οποία καλλιεργήθηκαν για μεγαλύτερη χρονική περίοδο, οι ρυθμοί συσσώρευσης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  βαθμιαία επιβραδύνονται και τελικά μηδενίζονται, οπότε και οι συγκεντρώσεις τους στο διάλυμα απορροής (ριζοστρώματος) τελικά σταθεροποιούνται σε κάποια μέγιστα επίπεδα. Παρόμοια πορεία συσσώρευσης των αλάτων και τελικά σταθεροποίησης τους, παρατηρήθηκε και σε άλλες καλλιέργειες εφόσον το υδροπονικό σύστημα ήταν τελείως κλειστό όπως στο φασόλι (Savvas et al., 2007), και τομάτα (Varlagas et al., 2010), υποδηλώνοντας σταδιακή εξισορρόπηση μεταξύ της εισόδου (με το νερό άρδευσης) και απομάκρυνσης (από τα φυτά) των αναλογιών  $\text{Na}^+/\text{νερό}$  και  $\text{Cl}^-/\text{νερό}$  στο κλειστό σύστημα. Όπως αναφέρεται από τους Savvas et al. (2008), η βαθμιαία επιβράδυνση

του ρυθμού συσσώρευσης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  σε κλειστά υδροπονικά συστήματα συμβαίνει όταν οι συγκεντρώσεις απορρόφησης τους από τα φυτά συγκλίνουν με τις συγκεντρώσεις αυτών στο νερό άρδευσης που εισάγεται στο σύστημα. Ειδικότερα, σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα με μηδενικές απορροές θρεπτικού διαλύματος, η συγκέντρωση απορρόφησης ενός ιόντος (π.χ. του  $\text{Na}^+$ ) αντιπροσωπεύει την αναλογία ιόντος/νερό που απομακρύνεται από το σύστημα, ενώ η συγκέντρωση του ιόντος στο θρεπτικό διάλυμα-ΘΔ τροφοδοσίας αντιπροσωπεύει την αναλογία ιόντος/νερό που εισάγεται στο σύστημα. Είναι γνωστό ότι η βαθμιαία αύξηση της συγκέντρωσης  $\text{Na}^+$  στο περιβάλλον των ριζών λόγω συσσώρευσης του στο κλειστό σύστημα, συνοδεύεται από ανάλογη αύξηση της συγκέντρωσης απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  (Massa et al., 2008). Έτσι, καθώς η συγκέντρωση απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  αυξάνει και συγκλίνει με την αντίστοιχη συγκέντρωση του στο νερό άρδευσης (εισερχόμενο ΘΔ), η διαφορά μεταξύ της εισόδου και απομάκρυνσης του ιόντος βαθμιαία μειώνεται, με αποτέλεσμα να επιβραδύνεται και ο ρυθμός συσσώρευσης του στο σύστημα. Η βαθμιαία επιβράδυνση των ρυθμών συσσώρευσης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  που παρατηρήθηκαν στο κλειστό σύστημα στην παρούσα εργασία (Σχήμα 5.1), υποδηλώνει την τάση, τα επίπεδα του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  να σταθεροποιούνται σε ορισμένα μέγιστα επίπεδα στο διάλυμα ριζοστρώματος, και είναι απόλυτα σύμφωνη με τις πιο πάνω αναφορές.

Οι ΣΑ του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  συναρτήσει του χρόνου είχαν παρόμοια πορεία μεταβολής σχεδόν σε όλες τις μεταχειρίσεις αλατότητας. Σε προηγούμενες εργασίες (Edelstein et al., 2011, Orsini et al., 2013), υψηλές συγκεντρώσεις  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  βρέθηκαν στους φυτικούς ιστούς της πεπονιάς, υποδεικνύοντας ότι οι μηχανισμοί ανθεκτικότητας της πεπονιάς στην αλατότητα, δεν βασίζονται στον πλήρη έλεγχο (αποκλεισμό) της εισόδου των αλατούχων ιόντων στο φυτό. Η διαπίστωση αυτή βρίσκεται σε συμφωνία με τις σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  που παρατηρήθηκαν στην παρούσα εργασία ακόμα μέχρι και 30 ημέρες μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων (HMEM), όταν οι



συγκεντρώσεις  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον της ρίζας ήταν ακόμη χαμηλές. Παρόλα αυτά, οι σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  στα αρχικά βλαστικά στάδια εν μέρει μπορεί να οφείλεται στους χαμηλούς ρυθμούς διαπνοής (κατανάλωσης νερού) λόγω του μεγέθους των φυτών και της περιορισμένης φυλλικής επιφάνειας (Massa et al., 2008).

Παρόλο που οι αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στους μηχανισμούς που εμπλέκονται στην απορρόφηση  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  και τις συνθήκες του περιβάλλοντος βασίζονται σε ένα σύνθετο φυσιολογικό υπόβαθρο, το οποίο και δεν είναι εύκολο να κατανοηθεί (Massa et al., 2008), η πορεία μεταβολής της απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  ήταν πανομοιότυπη στις δύο εποχές καλλιέργειας στην παρούσα εργασία. Επίσης, οι συγκεντρώσεις απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  αυξήθηκαν με την αύξηση των συγκεντρώσεων τους στο περιβάλλον των ριζών. Αυτό είναι λογικό καθώς, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για μη θρεπτικά στοιχεία όπως το  $\text{Na}^+$  και το  $\text{Cl}^-$ , η συγκέντρωση απορρόφησης τους έχει θετική συσχέτιση με τις συγκεντρώσεις των ιόντων αυτών στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα (Sonneveld, 2000, Massa et al., 2008). Οι καμπύλες που προέκυψαν από τα δεδομένα και παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.3 δείχνουν ότι η εκθετική σχέση ( $C_{xu} = aC_{xs}^b$ , όπου  $C_{xu}$  = συγκεντρώσεις απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  ή του  $\text{Cl}^-$ ,  $C_{xs}$  = συγκεντρώσεις του  $\text{Na}^+$  ή του  $\text{Cl}^-$  στο κλειστό σύστημα,  $a$  και  $b$  σταθερές) περιγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις προβλέψεις και για τα δύο ιόντα του άλατος ανεξάρτητα από την καλλιεργητική περίοδο. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τους Savvas et al. (2005a), οι οποίοι ανέφεραν ότι σε πολλά φυτικά είδη, μεταξύ της εξωτερικής συγκέντρωσης και της συγκέντρωσης απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$ , η εκθετική μορφή παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια στις προβλέψεις σε σχέση με τη γραμμική μορφή του προσομοιώματος. Είναι γνωστό ότι το  $\text{Cl}^-$  μεταφέρεται εύκολα από τα κύτταρα του ριζικού συστήματος στο υπέργειο μέρος του φυτού με το ρεύμα της διαπνοής (Wahome, 2003), ενώ το  $\text{Na}^+$  συγκρατείται σε μεγάλο βαθμό στα κατώτερα βλαστικά όργανα

(ρίζα, βλαστοί, μίσχοι παλαιότερων φύλλων), καθώς μεταφέρεται στα χυμοτόπια των κυττάρων του ξυλώδους παρεγχύματος μέσω του λιπιδικού στρώματος των μεμβρανών ή με ενεργό μεταφορά από διαμεμβρανικές πρωτεΐνες-κανάλια (Edelstein et al., 2011). Αν και το τελευταίο βήμα της φόρτωσης του ξυλώματος εμπλέκει μεταβολική ενέργεια (Tester and Davenport, 2003), σε σχετικά υψηλές εξωτερικές συγκεντρώσεις  $\text{Na}^+$ , διευκολύνεται η παθητική μεταφορά του ιόντος αυτού στα κύτταρα της ρίζας, με αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  (Massa et al., 2008). Οι Edelstein et al. (2011) εκχύλισαν παρόμοιες συγκεντρώσεις  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  από το ξύλωμα του βλαστού πεπονιάς, οι οποίες ήταν ανάλογες της συγκέντρωσης τους στο αρδευτικό νερό. Αν και στην πειραματική εργασία η οποία αναφέρεται από τον Edelstein et al. (2011) η συγκέντρωση του  $\text{Na}^+$  στη ρίζα ήταν κατά πάσα πιθανότητα ανώτερη από αυτήν στο αρδευτικό νερό, τα ευρήματα σαφώς αποδεικνύουν την έλλειψη μηχανισμών πλήρους ελέγχου της εισόδου των αλάτων στο ριζικό σύστημα της πεπονιάς (Ruiz et al., 1997, Orsini et al., 2013). Ωστόσο, οι διαφορές μεταξύ απορρόφησης και εξωτερικών συγκεντρώσεων  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στην παρούσα εργασία (Σχήμα 5.2), δείχνουν καθαρά ότι το ριζικό σύστημα της πεπονιάς έχει τη δυνατότητα μερικού (μέχρι ενός ορίου) ελέγχου της απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  και ότι η είσοδος του  $\text{Na}^+$  στο φυτό δεν είναι απλά μια παθητική διαδικασία.

Επίσης ένα άλλο σημαντικό θέμα είναι ότι οι υπολογισθείσες σταθερές του μοντέλου (βαθμονόμηση του μοντέλου) έπρεπε να ελεγχθούν ως προς την αξιοπιστία τους σε μια δεύτερη καλλιέργεια πεπονιού σε διαφορετικές συνθήκες ανάπτυξης, όπως συνιστάται στη σχετική διεθνή βιβλιογραφία (Carmassi et al, 2005, Katsoulas et al., 2015). Η βαθμονόμηση (παραμετροποίηση) του μοντέλου, δηλαδή ο υπολογισμός συγκεκριμένων τιμών που ισχύουν ειδικά για το πεπόνι για τις σταθερές  $a$  και  $b$  χρησιμοποιώντας δεδομένα της καλλιέργειας X-A (δηλ. το πείραμα της χαμηλής κατανάλωσης νερού μέσω διαπνοής) έδειξε αποκλίσεις μεταξύ των θεωρητικά υπολογιζόμενων τιμών και αυτών που προέκυψαν από την

καλλιέργεια A-K (δηλ. το πείραμα υψηλής κατανάλωσης νερού μέσω διαπνοής) σε ορισμένες περιπτώσεις (Σχήμα 5.5). Το αποτέλεσμα αυτό συγκλίνει με τη γενικότερη άποψη ότι τα εμπειρικά μοντέλα στη γεωργία μπορεί να αποδειχθούν αναξιόπιστα αν χρησιμοποιηθούν σε συνθήκες διαφορετικές από αυτές που επικρατούσαν κατά τη βαθμονόμηση τους. Αντίθετα, όταν οι σταθερές  $a$  και  $b$  υπολογίστηκαν με βάση τα δεδομένα A-K, οι προβλεπόμενες τιμές και αυτές που προέκυψαν από τις μετρήσεις X-A ήταν σε πολύ καλή συμφωνία (Σχήμα 5.4). Επιπρόσθετα λαμβάνοντας υπόψη ότι η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ ) προσέγγιζε την μονάδα σε όλες τις περιπτώσεις, είναι πολύ λογικό να λεχθεί ότι το εμπειρικό μοντέλο ( $C_{xu} = aC_{xs}^b$ ) στην παρούσα εργασία το οποίο βαθμονομήθηκε ( $a = 0,248$  και  $0,178$  και  $b = 0,774$  και  $0,878$  για το  $Cl^-$  και το  $Na^+$  αντίστοιχα) με A-K δεδομένα, παρέχει σημαντικά μεγαλύτερη ακρίβεια στις προβλέψεις για όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου του πεπονιού, και για ένα ευρύ φάσμα κλιματικών συνθηκών και εξωτερικών συγκεντρώσεων NaCl. Οι αποκλίσεις που μπορεί να εμφανίζονται με ορισμένες τιμές ενδεχομένως να οφείλονται σε μικρές ατέλειες της πειραματικής εγκατάστασης. Παρόλο που παρόμοια προσομοιώματα έχουν δοκιμασθεί με επιτυχία σε άλλες καλλιέργειες (Sonneveld et al., 1999, Savvas et al., 2005a, 2007, Massa et al., 2008), δεν βρέθηκαν πληροφορίες στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με την συσχέτιση των συγκεντρώσεων  $Na^+$  και  $Cl^-$  στο περιβάλλον των ριζών φυτών πεπονιάς, με την κατανάλωση νερού από τα φυτά. Επομένως, τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να συμβάλουν στην καλύτερη διαχείριση της καλλιέργειας της πεπονιάς (*Cucumis melo* L.) σε συστήματα με πλήρη και συνεχή ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος (των απορροών), ειδικά σε περιοχές όπου η αλατότητα του νερού είναι υψηλότερη από τα επιθυμητά επίπεδα.

Από τα πειραματικά δεδομένα δεν προέκυψαν σημαντικές διαφορές στις μέσες συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) των μακροθρεπτικών, δηλ. N, P, K, Ca, και Mg, ανάμεσα στις μεταχειρίσεις αλατότητας (NaCl). Σε συμφωνία με τα πιο πάνω ευρήματα, στην

προηγούμενη ερευνητική εργασία (Κεφάλαιο Ι) οι ΣΑ των μακροθρεπτικών στο πεπόνι δεν επηρεάστηκαν αρνητικά από την αλατότητα οφειλόμενη στην αυξημένη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα ανακύκλωσης (Neocleous and Savvas, 2015). Επίσης στα πλαίσια αυτά, οι Magán et al. (2005) αναφέρουν ότι σε υδροπονική καλλιέργεια τομάτας, οι ΣΑ των θρεπτικών στοιχείων παρουσίασαν μεγαλύτερη σταθερότητα με την αύξηση της αλατότητας, συγκρινόμενες με τις απόλυτες τιμές απορρόφησης τους. Είναι ευρέως γνωστό ότι η αλατότητα μπορεί να επηρεάσει άμεσα την απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων, με τυπικό παράδειγμα τη μείωση της απορρόφησης του ασβεστίου ( $\text{Ca}^{2+}$ ) από το νάτριο ( $\text{Na}^+$ ) και των νιτρικών ( $\text{NO}_3^-$ ) από το χλώριο ( $\text{Cl}^-$ ) (Grattan and Grieve, 1999). Επομένως, η έλλειψη βλαπτικών επιδράσεων της αλατότητας στις συγκεντρώσεις απορρόφησης των μακροθρεπτικών από τα φυτά πεπονιάς στην παρούσα εργασία θα μπορούσε να αποδοθεί στα εξής: (1) στον προστατευτικό ρόλο του  $\text{Ca}^{2+}$  στη διατήρηση της επιλεκτικότητας των κυτταρικών μεμβρανών από τη δυσμενή επίδραση του νατρίου  $\text{Na}^+$  και το ρυθμιστικό ρόλο του  $\text{Ca}^{2+}$  στο μεταβολισμό των φυτών της πεπονιάς (Carvajal et al., 2000), το οποίο συμφωνεί με τις αυξημένες συγκεντρώσεις απορρόφησης των ιόντων  $\text{Ca}^{2+}$  και αζώτου N ( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ ) που παρατηρήθηκαν, συγκρινόμενες με τιμές που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία (De Krij et al., 1999) και (2) στη βαθμιαία και όχι απότομη αύξηση του επιπέδου των αλάτων (συσσώρευση ιόντων  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον των ριζών), με αποτέλεσμα την εμφάνιση αλατούχου καταπόνησης στα φυτά μετά την έναρξη της καρποφορίας, στάδιο στο οποίο η πεπονιά θεωρείται λιγότερο ευαίσθητη στην αλατότητα (Sivritepe et al., 2005). Προφανώς η επαρκής τροφοδότηση  $\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{NO}_3^-$ , αύξησε ανάλογα και τις συγκεντρώσεις απορρόφησης τους, αντισταθμίζοντας την αρνητική επίδραση της αλατότητας στη θρεπτική ισορροπία της πεπονιάς (Navarro et al., 2000, Kaya et al., 2003). Ένας επιπλέον παράγοντας μπορεί να είναι και το γεγονός ότι η αλατότητα μπορεί να επηρεάζει σε παρόμοιο βαθμό την πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων και νερού με συνέπεια η

μεταξύ τους αναλογία, δηλαδή η ΣΑ να μην επηρεάζεται τελικά (Magán et al., 2005). Παρόλο που οι μέσες συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων αυξήθηκαν μέσα στο κλειστό σύστημα με την πάροδο του χρόνου, οι μέσες ΣΑ των μακροθρεπτικών N, P, K, Ca και Mg (δηλ. η μάζα προσλαμβανόμενου στοιχείου ανά μονάδα όγκου απορροφούμενου νερού την ίδια χρονική περίοδο), μειώθηκαν στα τελευταία στάδια ανάπτυξης των φυτών. Προηγουμένως έχει αναφερθεί ότι οι ΣΑ, τουλάχιστον για τα θρεπτικά στοιχεία, στις μη περιοριστικές συνθήκες της υδροπονίας, είναι περισσότερο συνυφασμένες με την απορρόφηση του νερού και λιγότερο με την εξωτερική τους συγκέντρωση (Pardossi et al., 2004, Carmassi et al., 2005). Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η διαδικασία της φωτοσύνθεσης, η οποία επηρεάζει κυρίως τις ανάγκες για θρεπτικά στοιχεία, συνδέεται καμπυλόγραμμα με την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ η διαδικασία της διαπνοής, η οποία επηρεάζει τις ανάγκες σε νερό, έχει κυρίως γραμμική σχέση (Sonneveld, 2002). Συνεπώς, η μείωση των τιμών των συγκεντρώσεων απορρόφησης με την αύξηση της ηλικίας της A-K καλλιέργειας οφειλόταν κυρίως στους υψηλότερους ρυθμούς διαπνοής οι οποίοι αναπτύσσονται φυσιολογικά την περίοδο της άνοιξης και του καλοκαιριού στο βόρειο ημισφαίριο. Παρομοίως, οι Thompson et al. (2013) κατέδειξαν σημαντική επίδραση του κλίματος στη συγκέντρωση απορρόφησης του αζώτου (N). Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν την αναγκαιότητα της διαφοροποίησης της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος κατά τη διάρκεια διαφορετικών σταδίων ανάπτυξης της πεπονιάς, λαμβάνοντας υπόψη και την εποχή του έτους κατά την οποία λαμβάνει χώρα το κάθε στάδιο ανάπτυξης των φυτών (Neocleous and Savvas, 2015).

Έχει αποδειχθεί ότι, οι μέσες αναμενόμενες συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) για ένα συγκεκριμένο φυτικό είδος και στάδιο καλλιέργειας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των δοσολογιών προσθήκης θρεπτικών στοιχείων και νερού στο διάλυμα απορροής πριν την επαναχρησιμοποίηση του σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα, με στόχο

να αποφευχθούν τυχόν θρεπτικές ανισορροπίες (De Kreij et al., 1999). Επιπλέον, είναι γνωστό ότι οι σχέσεις ανάμεσα στην αλατότητα και τη θρέψη των οπωροκηπευτικών καλλιεργειών είναι ιδιαίτερα σύνθετες (Grattan and Grieve, 1999) και ενδεχομένως να οδηγήσουν σε λανθασμένα σχήματα θρέψης (συστάσεις λίπανσης) των καλλιεργειών αν δεν ληφθούν υπόψη. Με βάση τα παραπάνω, οι μέσες ΣΑ οι οποίες προσδιορίστηκαν στην παρούσα εργασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλείο στην κατάστροψη θρεπτικών διαλυμάτων με κατάλληλη σύσταση για πεπόνι όταν καλλιεργείται σε κλειστά υδροπονικά συστήματα (πλήρης και συνεχής ανακύκλωση) υπό συνθήκες αλατότητας. Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) του θρεπτικού διαλύματος είναι ένα μέτρο της συνολικής συγκέντρωσης αλάτων στο διάλυμα και συχνά αναφέρεται ως αλατότητα του θρεπτικού διαλύματος (Adams, 2002). Σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) ενός θρεπτικού διαλύματος είναι σχεδόν γραμμικά ανάλογη της συγκέντρωσης των ιόντων στο θρεπτικό διάλυμα (Savvas and Adamidis, 1999). Συνεπώς, για την αριστοποίηση της θρέψης σε συστήματα με ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος, είναι ουσιώδες να προσδιορίζεται ποιο μέρος της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) στο διάλυμα απορροής αντιστοιχεί στο συσσωρευμένο NaCl λόγω της σύστασης του αρδευτικού νερού. Το προσομοίωμα των Savvas et al. (2005a, b), όπως βαθμονομήθηκε στην παρούσα εργασία, μπορεί να συμβάλλει επιτυχώς σε αυτό τον σκοπό, όπως έδειξαν τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της αξιοπιστίας του.

## **5.5. Συμπεράσματα**

Ένα εμπειρικό μοντέλο για την προσομοίωση των συγκεντρώσεων  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον των ριζών πεπονιάς (*Cucumis melo* L.), καλλιεργούμενης σε σύστημα με ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος, βαθμονομήθηκε και αξιολογήθηκε σε καλλιέργειες υπό διαφορετικές συνθήκες ανάπτυξης. Μέσω του προσομοιώματος αυτού μπορεί άμεσα να

υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον της ρίζας σε πραγματικό χρόνο σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού από τα φυτά. Επιπλέον, η εργασία αυτή δίνει μέσες τιμές συγκεντρώσεων απορρόφησης (ΣΑ) των μακροθρεπτικών (δηλ. N, P, K, Ca και Mg) σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια πεπονιού, υπό συνθήκες αλατότητας όπως έχει περιγραφεί. Ο προσδιορισμός των τιμών των παραμέτρων του μοντέλου (βαθμονόμηση του μοντέλου) και των μέσων ΣΑ των μακροθρεπτικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία ανάπτυξης διαχειριστικών πρακτικών σε καλλιέργειες πεπονιάς σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από χαμηλότερης ποιότητας νερά. Η εφαρμογή των αποτελεσμάτων αυτών μπορεί να βοηθήσει για να προσδιορισθούν: 1) πότε θα απορρίπτεται το διάλυμα απορροής με βάση την ανώτατη επιτρεπτή συγκέντρωση αλατότητας στο διάλυμα ριζοστρώματος συμβάλλοντας ταυτόχρονα στην επίτευξη των περιβαλλοντικών απαιτήσεων και 2) ποιο μέρος της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) του θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας (drift solution) στην καλλιέργεια αντιστοιχεί στην αλατότητα λόγω NaCl και επομένως ποια πρέπει να είναι η τελική τιμή EC στόχος, ώστε να παρέχονται επαρκείς ποσότητες θρεπτικών στοιχείων στα φυτά.

## **6. ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ. «Επίδραση της βαθμιαίας αύξησης της αλατότητας του θρεπτικού διαλύματος στη βλαστική αύξηση και παραγωγή, καθώς και σε παραμέτρους φυσιολογίας και θρέψης φυτών πεπονιάς (*Cucumis melo* L.) καλλιεργούμενων σε κλειστό υδροπονικό σύστημα»**

### **6.1. Εισαγωγή**

Η αλατότητα αποτελεί απειλή για τη γεωργία σε πολλές περιοχές του πλανήτη για περίοδο πέραν των 3000 χρόνων (Flowers, 2006). Αν και έχει επιτευχθεί αξιόλογη πρόοδος στη μοριακή γενετική, με έμφαση στη βελτίωση της ανθεκτικότητας των φυτών στην αλατότητα (Edelstein et al., 2011, Orsini et al., 2013) και παρά τις προχωρημένες τεχνικές διαχείρισης που έχουν αναπτυχθεί (Botía et al. 2005, Tedeschi et al., 2011), οι απώλειες της γεωργικής παραγωγής σε παγκόσμια κλίμακα λόγω της αλατότητας είναι σημαντικές. Εντούτοις, οι γεωργοί αναγκάζονται να χρησιμοποιούν ολοένα και περισσότερο αλατούχα νερά για σκοπούς άρδευσης σε ξηρές και ημίξηρες περιοχές, υπό το πρίσμα των μειωμένων βροχοπτώσεων και της έλλειψης καλής ποιότητας φρέσκου νερού. Έτσι, η έννοια της ανάπτυξης καλλιεργητικών πρακτικών στο άμεσο μέλλον, οι οποίες θα επιτρέπουν τη διατήρηση της γεωργικής παραγωγικότητας σε αλατούχες συνθήκες χωρίς να παραγνωρίζονται οι δυνητικά επιβλαβείς επιπτώσεις χρήσης αλατούχων αρδευτικών νερών (Läuchli and Grattan, 2007, Neocleous et al., 2014), έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον αρκετών ερευνητών (Rouphael et al., 2012).

Το σταθερά αυξανόμενο ενδιαφέρον της καλλιέργειας των φυτών εκτός εδάφους προς τα κλειστά συστήματα καλλιέργειας (Savvas and Manos, 1999), οι δυσκολίες στη διαχείριση των κλειστών υδροπονικών συστημάτων ειδικότερα όταν το αρδευτικό νερό έχει υψηλή συγκέντρωση αλάτων (κυρίως  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$ ) και η βλαπτική επίδραση των αλάτων στα φυτά έχουν αναφερθεί εκτενέστερα στις υποενότητες 2.8 και 2.11. Η αναστολή της αύξησης σε



πολλά φυτά σε συνθήκες αλατότητας συχνά συσχετίζεται με σχεδόν κάθε φυσιολογική και βιοχημική διεργασία μέσα στο φυτό (Munns, 2002, Parida and Das, 2005, Colla et al., 2006, Tedeschi et al., 2011, Rouphael et al., 2012). Ο βαθμός στον οποίο ένας μηχανισμός επηρεάζει το φυτό έναντι των άλλων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες συμπεριλαμβανομένου του είδους και του γονότυπου, της ηλικίας του φυτού, του επιπέδου αλατότητας, και του υπό αναφορά μέρους του φυτού (Läuchli and Grattan, 2007).

Όταν είδη με μέτρια αντοχή στην αλατότητα καλλιεργούνται σε κλειστά υδροπονικά συστήματα, η χρήση λογισμικών προγραμμάτων υποστήριξης απόφασης (γνωστά ως Decision Support Systems - DSS) σε συνθήκες πραγματικού χρόνου, μπορεί να επιμηκύνει την πλήρη και συνεχή ανακύκλωση του ίδιου θρεπτικού διαλύματος, βελτιώνοντας τόσο την απόδοση όσο και την αποτελεσματικότητα χρήσης του νερού (Water Use Efficiency - WUE) (Carmassi et al., 2005, Varlagas et al., 2010, Katsoulas et al., 2015). Εντούτοις, το κάθε είδος μπορεί να συμπεριφερθεί διαφορετικά με τη συνεχή και πλήρη ανακύκλωση των απορροών (Bar-Yosef, 2008). Η παρουσία αλατούχων ιόντων όπως το  $\text{Na}^+$  και το  $\text{Cl}^-$  στο αρδευτικό νερό, εντέλει θα προκαλέσει αύξηση στα επίπεδα των αλάτων στο διάλυμα ανακύκλωσης σε επίπεδα που υπερβαίνουν τη μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση για την καλλιέργεια (Savvas, 2002a, b). Αυτό προφανώς μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη διεργασία της διαπνοής και της ανάπτυξης του φυτού, λόγω και των δύο: ωσμωτικής καταπόνησης και τοξικής επίδρασης αλάτων (Munns, 2002). Εντούτοις, η έκθεση των φυτών πεπονιάς σε μια ελεγχόμενη αύξηση της αλατότητας στο περιβάλλον των ριζών σε επίπεδα που υπερβαίνουν τα επιθυμητά για απρόσκοπτη αύξηση και ανάπτυξη της καλλιέργειας, δεν φαίνεται να προκαλεί μη αποδεκτές απώλειες στην παραγωγή και την ποιότητα των καρπών (Colla et al., 2006, Neocleous and Savvas, 2015). Επιπρόσθετα, προηγούμενες εργασίες έδειξαν ότι η ανασταλτική επίδραση της αλατότητας στην πεπονιά βαθμιαία μειώνεται όταν η επίδραση των αλάτων συνδυάζεται με την έναρξη του σταδίου καρποφορίας (Carvajal et al., 1998). Έτσι, η παραγωγή πεπονιών

σε πλήρως κλειστά υδροπονικά συστήματα εξοπλισμένα με μοντέρνα τεχνολογία η οποία μπορεί να ρυθμίσει ή να καθυστερήσει την εμφάνιση αλατούχου καταπόνησης στα φυτά μετά την έναρξη του σταδίου καρποφορίας (Botía et al. 2005, Sivritepe et al., 2005), μπορεί να αποτελέσει μια λειτουργικά αποδεκτή τεχνική άμβλυνσης των δυσμενών επιπτώσεων της αλατότητας σε καλλιέργειες πεπονιού.

Οι επιδράσεις διαφόρων επιπέδων αλατότητας σε εκτός εδάφους καλλιέργειες πεπονιάς είναι ευρέως γνωστές (Ruiz et al., 1997, Navarro et al., 2000, Pardossi et al., 2000, Colla et al., 2006, Tedeschi et al., 2011). Εντούτοις, η ανώτατη επιτρεπτή τιμή αλατότητας σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα δεν θα πρέπει απλά να ταυτίζεται με την ούτως καλούμενη τιμή-κατώφλι αλατότητας για την καλλιέργεια (Bar-Yosef, 2008). Η πρώτη υποδηλώνει την ανώτατη επιτρεπτή τιμή αλατότητας στο διάλυμα ανακύκλωσης μέσα από μια διαδικασία βαθμιαίας συσσώρευσης των αλάτων στο σύστημα χωρίς απώλειες σε παραγωγή και ποιότητα, ενώ η δεύτερη υποδεικνύει μια σταθερή συγκέντρωση αλάτων στο διάλυμα ριζοστρώματος (Savvas, 2002a, b). Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι μια βαθμιαία έκθεση των φυτών σε συνθήκες αλατότητας έχει λιγότερο αρνητικές συνέπειες από ότι μια απότομη αύξηση της συγκέντρωσης των αλάτων (στα ίδια τελικά επίπεδα), διότι τα φυτά στην πρώτη περίπτωση μπορούν να ρυθμίζουν το ωσμωτικό τους δυναμικό (Flexas et al., 2004, Savvas et al., 2005b). Ο τρόπος προσαρμογής διαφέρει ανάμεσα στις καλλιέργειες, ανάλογα με το είδος της αλατότητας και τις συνθήκες ανάπτυξης (Sonneveld and Voogt, 2009). Η ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας αποκαλύπτει ότι αρκετοί παράμετροι, οι συνδυασμοί και οι αλληλεπιδράσεις τους πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν αναλύεται η καλλιέργεια των φυτών κάτω από συνθήκες υψηλής αλατότητας (Parida and Das, 2005). Προφανώς, η ερευνητική πρόκληση είναι να αναπτυχθούν πρακτικές μέθοδοι διαχείρισης οι οποίες να ελαχιστοποιούν την αρνητική επίδραση της αλατότητας στη φυσιολογική λειτουργία των φυτών. Πειραματικά δεδομένα, εντούτοις, όσον αφορά τις φυσιολογικές,

θρεπτικές και αυξητικές παραμέτρους των φυτών πεπονιάς σε συνθήκες βαθμιαίας αύξησης της αλατότητας σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα ως αποτέλεσμα των μηχανισμών ανάδρασης της καλλιέργειας, δεν υπάρχουν.

Η εργασία αυτή βασίζεται σε δεδομένα προερχόμενα από τα ίδια πειράματα που περιγράφονται στη δεύτερη ερευνητική εργασία (Κεφάλαιο II) και στη δημοσίευση των Neocleous and Savvas (2016), όπου περιγράφεται ένα εμπειρικό μοντέλο προσομοίωσης της συσσώρευσης  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στο διάλυμα ανακύκλωσης και μελετάται η επίδραση της αλατότητας στο διάλυμα ριζοστρώματος στις αναλογίες απορρόφησης των θρεπτικών μακροστοιχείων προς νερό. Η παρούσα εργασία παραθέτει επιπλέον αποτελέσματα της επίδρασης μιας βαθμιαίας αύξησης της αλατότητας στο περιβάλλον των ριζών στις φυσιολογικές, θρεπτικές και αυξητικές παραμέτρους των φυτών πεπονιάς, καλλιεργούμενης σε συστήματα με συνεχή και πλήρη ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος σε διαφορετικές εποχές καλλιέργειας. Διαφορετικές συγκεντρώσεις αλατότητας  $\text{NaCl}$  στο νερό άρδευσης και εντέλει στο θρεπτικό διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε για την αναπλήρωση θρεπτικών στοιχείων και νερού, εφαρμόστηκαν ως πειραματικές επεμβάσεις. Για να κατανοηθούν οι μηχανισμοί πάνω στους οποίους βασίζεται η απόκριση των φυτών πεπονιάς στη βαθμιαία αύξηση της συγκέντρωσης των αλάτων στο διάλυμα ανακύκλωσης, μελετήθηκαν φωτοσυνθετικές και παράμετροι της χλωροφύλλης, υδατικές σχέσεις, παρουσία θρεπτικών και μη-θρεπτικών ιόντων στους φυτικούς ιστούς, συνολική απορρόφηση θρεπτικών, αύξηση, παραγωγή και ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος. Τα αποτελέσματα μπορούν να ενσωματωθούν σε συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (DSS) στα θερμοκήπια, σε υδροπονικές καλλιέργειες πεπονιάς κάτω από συνθήκες αλατότητας.

## **6.2. Υλικά και Μέθοδοι**

### **6.2.1. Συνθήκες ανάπτυξης της καλλιέργειας**

Η πειραματική εγκατάσταση, το φυτικό υλικό και οι συνθήκες καλλιέργειας περιγράφονται στην υποενότητα 5.2.1 (Κεφάλαιο II). Επιγραμματικά αναφέρεται ότι το πρώτο πείραμα διεξήχθη από 20 Δεκεμβρίου, 2013 μέχρι 9 Απριλίου, 2014 (Χειμώνα-Άνοιξης καλλιέργεια), ενώ το δεύτερο διήρκησε από τις 8 Μαΐου μέχρι 11 Ιουλίου, 2014 (Άνοιξης-Καλοκαιριού καλλιέργεια). Τρία διαφορετικά επίπεδα NaCl (0,7, 2,5 και 5 mM) στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας στο κλειστό σύστημα, αποτελούσαν τις πειραματικές επεμβάσεις οι οποίες άρχισαν αμέσως μετά τη μεταφορά των νεαρών φυτών πεπονιάς στα κανάλια υδροπονιάς. Ο υπολογισμός της δοσολογίας προσθήκης των θρεπτικών στοιχείων στην καλλιέργεια, βασίστηκε στην εκτίμηση των λιπαντικών αναγκών με βάση τις συγκεντρώσεις απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων (αναλογίες απορρόφησης θρεπτικού στοιχείου προς νερό, Savvas et al., 2013).

### **6.2.2. Μετρήσεις και χημικές αναλύσεις**

Ολόκληρα φυτά από κάθε πειραματική μονάδα συγκομίσθηκαν την 30, 60, 90 και 110 ημέρα μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων (HMEM) στο χειμερινό-εαρινό πείραμα (X-A) και την 25, 50 και 75 HMEM στο εαρινό-θερινό πείραμα (A-K), και ακολούθως διαχωρίστηκαν σε φύλλα, βλαστό, ρίζες και καρπούς, όπου προσδιορίστηκαν οι συγκεντρώσεις χλωρίου (Cl), νατρίου (Na) και επιλεγμένων μακροθρεπτικών (N, P, K, Ca και Mg). Η συνολική παραγωγή νωπής και ξηρής βιομάζας προσδιορίστηκε κατά το χρόνο τερματισμού της καλλιέργειας σε έξι φυτά για κάθε μεταχείριση, λαμβάνοντας υπόψη στους υπολογισμούς και το σύνολο των κλαδεμάτων μέχρι την ημερομηνία αυτή. Η μεθοδολογία προσδιορισμού της συγκέντρωσης των χημικών στοιχείων στους φυτικούς ιστούς περιγράφεται στην υποενότητα 3.5.

Η συνολική απορρόφηση των θρεπτικών μακροστοιχείων, του χλωρίου και του νατρίου από τα φυτά, υπολογίστηκε από το γινόμενο της συγκέντρωσης του έκαστου θρεπτικού στοιχείου όπως ανακτήθηκε από κάθε φυτικό ιστό (g/g ξ.β.) επί του ξηρού του βάρους (g/φυτό). Ακολούθως, η συνολική απορρόφηση υπολογίστηκε αθροίζοντας τις επιμέρους ποσότητες των θρεπτικών στοιχείων για όλο το φυτό (g/φυτό) (Rouphael and Colla, 2005).



**Εικόνα 6.1.** Φυτικά μέρη πεπονιάς καλλιεργούμενης σε σύστημα τύπου NFT.

Τα πιο πρόσφατα πλήρη αναπτυγμένα φύλλα από την κορυφή σε τρία τυχαία επιλεγμένα φυτά για κάθε επανάληψη, δύο εβδομάδες πριν το τέλος του πειράματος, χρησιμοποιήθηκαν για να μετρηθούν παράμετροι ανταλλαγής αερίων κατά τη φωτοσύνθεση [δηλ. καθαρός ρυθμός φωτοσύνθεσης (A), στοματική αγωγιμότητα ( $g_s$ ), συγκέντρωση  $CO_2$  στους μεσοκυττάριους χώρους ( $C_i$ ), και ρυθμός διαπνοής (E)]. Τα ίδια φύλλα ακολούθως σημάνθηκαν για να μετρηθούν το υδατικό δυναμικό των φύλλων ( $\Psi_w$ ), το ωσμωτικό δυναμικό ( $\Psi_\pi$ ) και το σχετικό υδατικό περιεχόμενο (RWC). Μαζί με την ανταλλαγή αερίων κατά τη φωτοσύνθεση και τις υδατικές σχέσεις, για την αξιολόγηση της φωτοχημικής δραστηριότητας μετρήθηκαν (1) χημικός ποσοτικός προσδιορισμός χλωροφύλλης, (2) φθορισμός της χλωροφύλλης (φωτοχημική απόδοση του φωτοσυστήματος II, δείκτης Fv/Fm) και (3) ρυθμός μεταφοράς ηλεκτρονίων (ETR). Οι αντίστοιχες μεθοδολογίες περιγράφονται στην υποενότητα 3.6 (Μεθοδολογίες εργαστηριακών μετρήσεων).

Καρποί στο στάδιο της πλήρους ωρίμανσης συγκομίσθηκαν 68 και 75 ημέρες μετά τη μεταφύτευση στην καλλιέργεια A-K καθώς και 98 και 110 ημέρες μετά τη μεταφύτευση στην καλλιέργεια X-A. Οι εμπορεύσιμοι καρποί σε κάθε πειραματική μονάδα μετρήθηκαν, ζυγίσθηκαν και προσδιορίσθηκε το μέσο βάρος καρπού. Ο συνολικός αριθμός καρπών που παρουσιάζεται αντιπροσωπεύει τους εμπορεύσιμους (αποδεκτό χρώμα και ποιότητα) και μη εμπορεύσιμους καρπούς (ανώριμοι ή ατελώς σχηματισμένοι). Ακολούθως δύο αντιπροσωπευτικοί καρποί από κάθε πειραματική μονάδα χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό ορισμένων ποιοτικών χαρακτηριστικών όπως η συνεκτικότητα σάρκας, διαλυτά στερεά, pH, ογκομετρούμενη οξύτητα, ξηρή ουσία, ασκορβικό οξύ, ολικές φαινολικές ουσίες και συνολική αντιοξειδωτική ικανότητα (ferric reducing antioxidant power, δοκιμή FRAP και 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl, δοκιμή DPPH). Οι αντίστοιχες μεθοδολογίες περιγράφονται στην υποενότητα 3.6 (Μεθοδολογίες εργαστηριακών μετρήσεων).

### **6.2.3. Στατιστική επεξεργασία**

Το πειραματικό σχέδιο που εφαρμόστηκε και στα δύο πειράματα θερμοκηπίου ήταν το τυχαίοποιημένο σχέδιο πλήρων ομάδων. Εφαρμόσθηκαν τρεις μεταχειρίσεις αλατότητας οι οποίες αντιστοιχούσαν σε τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl στο νερό άρδευσης (0,7, 2,5 και 5 mM), με τρεις επαναλήψεις για κάθε μεταχείριση (τυχαία τοποθετημένες σε τρεις ομάδες). Ανάλυση διασποράς (Analysis of variance, ANOVA) των πειραματικών δεδομένων έγινε με το στατιστικό πακέτο SAS (Version 9.2, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) και τα γραφήματα σχεδιάστηκαν με τη βοήθεια του πακέτου GraphPad Prism (Version 5.0, GraphPad Software, San Diego California, USA). Ζεύγη τιμών από όλες τις μεταχειρίσεις αλατότητας χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση παλινδρόμησης.

### 6.3. Αποτελέσματα

#### 6.3.1. Συγκέντρωση αλάτων στο ριζόστρωμα

Η πορεία συσσώρευσης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  στο διάλυμα απορροής κλειστής υδροπονικής καλλιέργειας πεπονιάς, περιγράφηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο II και στην εργασία των Neocleous and Savvas (2016). Επιγραμματικά, οι συγκεντρώσεις του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  βαθμιαία αυξήθηκαν στο περιβάλλον των ριζών με την πάροδο του χρόνου ενώ σταθεροποιήθηκαν σε μέγιστες συγκεντρώσεις 20 και 40 mM έπειτα από 75 ημέρες στην A-K καλλιέργεια και 15 και 30 mM έπειτα από 110 ημέρες στην X-A καλλιέργεια, για τη μέση και υψηλή μεταχείριση αλατότητας, αντίστοιχα. Στη χαμηλή συγκέντρωση αλατότητας, το NaCl στο διάλυμα απορροής διατηρήθηκε σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις των 10 mM, το οποίο είναι το μέγιστο επιτρεπτό όριο συγκέντρωσης NaCl στο περιβάλλον των ριζών σε μια σειρά από καρποδοτικά λαχανικά θερμοκηπίου σε κλειστά υδροπονικά συστήματα (Adams, 2002). Όταν όμως τα πειραματικά δεδομένα αναλύθηκαν ξανά ώστε να προσδιορισθεί ο ρυθμός συσσώρευσης των ιόντων  $\text{Na}^+$  ( $\text{Cl}^-$ ) στο περιβάλλον των ριζών κατά τη διάρκεια της φάσης που επιταχύνονται οι ρυθμοί συσσώρευσης των αλάτων σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα (Bar-Yosef, 2008), δηλ. το στάδιο της βλαστικής αύξησης του φυτού που είναι και περισσότερο ευαίσθητο στην αλατότητα, η γραμμική σχέση μπορούσε καλύτερα να περιγράψει τα πειραματικά δεδομένα (λεπτομερή αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται). Η τιμή της κλίσης της γραμμικής σχέσης μεταξύ των ιόντων  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στη μονάδα του χρόνου (ημέρα-d) ήταν παρόμοια σε κάθε μεταχείριση αλατότητας, εντούτοις, για το κάθε ιόν χωριστά ήταν σημαντικά ( $P \leq 0,05$ ) διαφορετική ανάμεσα στις μεταχειρίσεις αλατότητας. Ειδικότερα, οι τιμές για την καλλιέργεια A-K ήταν (μ.ο.  $\pm$  SE):  $0,10 \pm 0,01$ ,  $0,25 \pm 0,02$  και  $0,52 \pm 0,03$  mM NaCl d<sup>-1</sup> για 0,7, 2,5 και 5 mM NaCl, αντίστοιχα, και για την καλλιέργεια X-A ήταν (μ.ο.  $\pm$  SE):  $0,02 \pm 0,002$ ,  $0,12 \pm 0,01$  και  $0,23 \pm 0,02$  mM NaCl d<sup>-1</sup> για 0,7, 2,5 και 5 mM NaCl, αντίστοιχα.

### 6.3.2. Φυτομάζα, καρπική απόδοση και ποιότητα

Η υψηλότερη συγκέντρωση αλατότητας (δηλ. 5 mM NaCl στο φρέσκο θρεπτικό διάλυμα), περιόρισε τη συνολική παραγωγή νωπής και ξηρής βιομάζας και την παραγωγή εμπορεύσιμων καρπών, και στις δύο περιόδους ανάπτυξης (Πίνακας 6.1). Παρόμοια, σημαντική μείωση στον συνολικό αριθμό καρπών και το μέσο βάρος καρπού επίσης παρατηρήθηκε στα φυτά που εφαρμόστηκε υψηλό επίπεδο NaCl στο θρεπτικό διάλυμα (Πίνακας 6.1). Εντούτοις, ο αριθμός των εμπορεύσιμων καρπών δεν επηρεάστηκε από τις μεταχειρίσεις αλατότητας, ανεξάρτητα από την εποχή καλλιέργειας.

**Πίνακας 6.1.** Παραγωγή βιομάζας νωπού βάρους (BM-NB), ξηρού βάρους (BM-ΞΒ), εμπορεύσιμη παραγωγή (EMΠ), εμπορεύσιμος αριθμός καρπών (ΕΑΚ), ολικός αριθμός καρπών (ΟΑΚ) και μέσο βάρος καρπού (ΜΒΚ) σε φυτά πεπονιάς καλλιεργούμενα σε κλειστό υδροπονικό σύστημα - NFT όπως επηρεάζονται από τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl στο αρδευτικό νερό (0,7, 2,5 και 5 mM) που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή θρεπτικού διαλύματος σε δύο εποχές καλλιέργειας (Χειμώνα-Άνοιξης/Χ-Α και Άνοιξης-Καλοκαιριού/Α-Κ).

(mM NaCl)	BM-NB (g/φυτό)	BM-ΞΒ (g/φυτό)	EMΠ (g/φυτό)	ΕΑΚ (N/φυτό)	ΟΑΚ (N/φυτό)	ΜΒΚ (g/καρπό)
Χ-Α καλ/γεια						
0,7	3435a	286a	1688a	3,4	4,6a	518a
2,5	3343a	277a	1664a	3,4	4,7a	490ab
5	2637b	216b	1362b	3,1	3,6b	458b
Σημαντικότητα	*	*	*	ΜΣ	*	*
Α-Κ καλ/γεια						
0,7	6983a	650a	5130a	3,7	5,1a	1359a
2,5	6530a	628a	4756ab	3,6	4,6a	1325a
5	5667b	578b	4042b	3,2	4,0b	1224b
Σημαντικότητα	*	*	*	ΜΣ	*	*

Σε κάθε καλλιέργεια, οι μέσοι των διαφορετικών μεταχειρίσεων ( $n = 3$ ) για κάθε χαρακτηριστικό συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα έχουν στατιστικά σημαντική διαφορά σύμφωνα με το κριτήριο Duncan ( $P \leq 5\%$ ). ΜΣ και \* δείχνουν μη σημαντικές ή σημαντικές διαφορές σε επίπεδο  $P \leq 5\%$ , αντίστοιχα.



Επιπρόσθετα, η αξιολόγηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του καρπού δεν αποκάλυψε τυχόν διαφορές που οφείλονται στις μεταχειρίσεις αλατότητας ή την περίοδο καλλιέργειας. Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του καρπού που προσδιορίστηκαν ήταν η συνεκτικότητα σάρκας (μ.ο. 50,9 Nt cm<sup>-2</sup>), τα διαλυτά στερεά συστατικά (μ.ο. 10,7 °Brix), το pH (μ.ο. 6,41), η ογκομετρούμενη οξύτητα (μ.ο. 0,10% citric acid), η ξηρή ουσία (μ.ο. 9,69%), το ασκορβικό οξύ (AA, μ.ο. 4,10 mg AA [100 g v.β.]<sup>-1</sup>, οι ολικές φαινόλες (0,153 mg Gallic Acid [g v.β.]<sup>-1</sup>), και η αντιοξειδωτική ικανότητα εκτιμώμενη με τη δοκιμή αντιοξειδωτικής ισχύς αναγωγής σιδήρου - ferric reducing antioxidant power (FRAP τιμές, μ.ο. 0,852 μmol AA [g v.β.]<sup>-1</sup>) και την ικανότητα εκκαθάρισης ελευθέρων ριζών - radical scavenging activity (DPPH τιμές, μ.ο. 11,6 mg ισοδύναμα AA [100g v.β.]<sup>-1</sup>, λεπτομερή στοιχεία δεν παρουσιάζονται).

### **6.3.3. Ανταλλαγή αερίων κατά τη φωτοσύνθεση και υδατικές σχέσεις**

Και στις δύο εποχές καλλιέργειας, ο καθαρός ρυθμός φωτοσύνθεσης (A), η στοματική αγωγιμότητα (g<sub>s</sub>), η συγκέντρωση CO<sub>2</sub> στους μεσοκυττάρους χώρους (Ci), και ο ρυθμός διαπνοής (E) μειώθηκαν στα φυτά πεπονιάς στη μεταχείριση 5 mM NaCl σε σύγκριση με τις άλλες μεταχειρίσεις αλατότητας (δηλ. στην απουσία προσθήκης NaCl ή σε επίπεδο 2,5 mM NaCl στο φρέσκο θρεπτικό διάλυμα), στις οποίες οι μετρήσεις ήταν παρόμοιες (Πίνακας 6.2). Τα φυτά που τροφοδοτήθηκαν με θρεπτικό διάλυμα που έγινε προσθήκη NaCl έδειξαν σημαντικές μειώσεις στο υδατικό (Ψ<sub>w</sub>) και ωσμωτικό (Ψ<sub>π</sub>) δυναμικό των φύλλων στο μέτριο επίπεδο αλατότητας, οι οποίες έγιναν πιο εμφανείς στην υψηλότερη συγκέντρωση αλατότητας (Πίνακας 6.2), χωρίς όμως απώλεια της πίεσης σπαργής των κυττάρων (Ψ<sub>p</sub>) (λεπτομερή στοιχεία δεν παρουσιάζονται). Το σχετικό υδατικό περιεχόμενο (RWC) των κυττάρων έδωσε χαμηλότερες τιμές στην υψηλή συγκέντρωση αλατότητας, αλλά η μείωση ήταν σημαντική (P ≤ 0,05) μόνο στο X-A πείραμα (Πίνακας 6.2). Τέλος, οι

παράμετροι της χλωροφύλλης και τα στοιχεία των φωτοσυστημάτων που προσδιορίστηκαν στην παρούσα εργασία, δηλ. η φωτοχημική απόδοση του φωτοσυστήματος II (δείκτης Fv/Fm, μ.ο. 0,79), ο ρυθμός μεταφοράς ηλεκτρονίων (ETR, μ.ο. 162  $\mu\text{mol e}^- \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), ο χημικός προσδιορισμός της ολικής συγκέντρωσης χλωροφύλλης (chl<sub>t</sub>, μ.ο. 1,19 mg [g v.β.]<sup>-1</sup>) και ο οπτικός προσδιορισμός της χλωροφύλλης (τιμές SPAD, μ.ο. 51,5), δεν επηρεάστηκαν από τις πειραματικές μεταχειρίσεις αλατότητας (λεπτομερή στοιχεία δεν παρουσιάζονται).

**Πίνακας 6.2.** Καθαρός ρυθμός αφομοίωσης CO<sub>2</sub> (A,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), στοματική αγωγιμότητα (g<sub>s</sub>,  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), CO<sub>2</sub> στους μεσοκυττάρους χώρους (C<sub>i</sub>,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ ), ρυθμός διαπνοής (E,  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), υδατικό δυναμικό φύλλων ( $\Psi_w$ , -MPa), ωσμωτικό δυναμικό φύλλων ( $\Psi_\pi$ , -MPa), και σχετικό υδατικό περιεχόμενο (RWC, %) σε φυτά πεπονιάς καλλιεργούμενα σε κλειστό υδροπονικό σύστημα - NFT όπως επηρεάζονται από τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl στο αρδευτικό νερό (0,7, 2,5 και 5 mM) που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή θρεπτικού διαλύματος σε δύο εποχές καλλιέργειας (Χειμώνα-Άνοιξης/X-A και Άνοιξης-Καλοκαιριού/A-K).

(mM NaCl)	A	g <sub>s</sub>	C <sub>i</sub>	E	$\Psi_w$	$\Psi_\pi$	RWC
<i>X-A καλ/γεια</i>							
0,7	17,9a	0,295a	252a	4,50a	0,78c	1,36c	83,2a
2,5	18,1a	0,279a	244a	4,38a	1,02b	1,70b	78,5ab
5	15,5b	0,205b	227b	3,58b	1,30a	1,83a	73,3b
Σημαντικότητα	***	***	**	***	***	***	*
<i>A-K καλ/γεια</i>							
0,7	18,5a	0,505a	288a	7,83a	0,84c	1,30c	81,2
2,5	18,4a	0,496a	287ab	7,33a	1,06b	1,60b	79,6
5	16,7b	0,344b	272b	6,53b	1,28a	1,80a	77,2
Σημαντικότητα	*	*	*	*	***	***	ΜΣ

Σε κάθε καλλιέργεια, οι μέσοι των διαφορετικών μεταχειρίσεων (n = 3) για κάθε χαρακτηριστικό συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα έχουν στατιστικά σημαντική διαφορά σύμφωνα με το κριτήριο Duncan (P ≤ 5%). ΜΣ, \*, \*\* και \*\*\* δείχνουν μη σημαντικές ή σημαντικές διαφορές σε επίπεδο P ≤ 5%, 1% και 0,1%, αντίστοιχα.

### 6.3.4. Απορρόφηση θρεπτικών και μη-θρεπτικών στοιχείων και συγκεντρώσεις στους φυτικούς ιστούς

Η έκθεση των φυτών σε αυξημένες συγκεντρώσεις NaCl δεν περιόρισε τις συνολικές ποσότητες απορρόφησης του N, P, K, Ca και Mg σε επίπεδο σημαντικότητας  $P \leq 0,05$  (Πίνακας 6.3).

**Πίνακας 6.3.** Συνολική απορρόφηση (mmol/φυτό) θρεπτικών μακροστοιχείων (N, P, K, Ca και Mg), χλωρίου (Cl) και νατρίου (Na) σε όλη την καλλιεργητική περίοδο από φυτά πεπονιάς καλλιεργούμενα σε κλειστό υδροπονικό σύστημα - NFT όπως επηρεάζεται από τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl στο αρδευτικό νερό (0,7, 2,5 και 5 mM) που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή θρεπτικού διαλύματος σε δύο εποχές καλλιέργειας (Χειμώνα-Άνοιξης/X-A και Άνοιξης-Καλοκαιριού/A-K).

(mM NaCl)	N†	P	K	Ca	Mg	Cl	Na
X-A καλ/γεια							
0,7	644	72,4	325	182	44,2	36,7c	37,4c
2,5	652	77,1	340	191	46,3	77,4b	75,4b
5	583	67,4	288	172	41,8	97,5a	91,9a
Σημαντικότητα	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	***	**
A-K καλ/γεια							
0,7	1795	191	886	553	121	102,7c	93,3c
2,5	1659	178	824	511	110	207,2b	178,7b
5	1509	161	793	496	101	289,8a	245,6a
Σημαντικότητα	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	***	**

Σε κάθε καλλιέργεια, οι μέσοι των διαφορετικών μεταχειρίσεων ( $n = 3$ ) για κάθε χαρακτηριστικό συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα έχουν στατιστικά σημαντική διαφορά σύμφωνα με το κριτήριο Duncan ( $P \leq 5\%$ ). ΜΣ, \*, \*\* και \*\*\* δείχνουν μη σημαντικές ή σημαντικές διαφορές σε επίπεδο  $P \leq 5\%$ ,  $1\%$  και  $0,1\%$ , αντίστοιχα. †Οργανικώς δεσμευμένο.

Από την άλλη, η αλατότητα αύξησε σημαντικά τις ποσότητες  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  που απορροφήθηκαν από τα φυτά πεπονιάς, ανεξάρτητα της εποχής καλλιέργειας (Πίνακας 6.3). Σε απόλυτες τιμές, μεγαλύτερες ποσότητες θρεπτικών και μη-θρεπτικών ιόντων

απορροφήθηκαν στην καλλιέργεια άνοιξης-καλοκαιριού (A-K) από ότι στην καλλιέργεια χειμώνα-άνοιξης (X-A, Πίνακας 6.3) ενώ διαφορές στις συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων αντικατοπτρίζουν διαφορετικούς φυτικούς ιστούς (Πίνακας 6.4). Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα της ανάλυσης των φυτικών ιστών έδειξαν ότι οι διαφορές στις συγκεντρώσεις N, P, K, Ca και Mg στα φύλλα της πεπονιάς από τις επεμβάσεις αλατότητας δεν ήταν σημαντικές. Εντούτοις, στους βλαστούς, καρπούς και ρίζες, οι διαφορές στις συγκεντρώσεις των μακροθρεπτικών ανάμεσα στις μεταχειρίσεις δεν ήταν πάντα ίδιες στις δύο περιόδους καλλιέργειας. Όπως και στην περίπτωση της συγκέντρωσης αζώτου (N) στα φύλλα, η συγκέντρωση του N στους βλαστούς και τους καρπούς δεν επηρεάστηκε από την αλατότητα, ενώ στις ρίζες παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση στη μέτρια αλατότητα, ακολουθούμενη από μείωση σε συνθήκες υψηλής αλατότητας στα επίπεδα του μάρτυρα (X-A) ή και σε χαμηλότερα επίπεδα (A-K). Παρόμοια με το N, οι συγκεντρώσεις φωσφόρου (P) στα φύλλα, βλαστούς και καρπούς δεν επηρεάστηκαν από την αλατότητα. Εντούτοις, η συγκέντρωση P στις ρίζες αυξήθηκε με την αλατότητα αλλά μόνο στην περίπτωση του πειράματος X-A. Παρόλο, που οι συγκεντρώσεις καλίου K στα φύλλα και τους καρπούς δεν επηρεάστηκαν από την αλατότητα, τα επίπεδα καλίου K στο βλαστό μειώθηκαν στις μεταχειρίσεις που εφαρμόστηκε προσθήκη NaCl στα φυτά, ανεξάρτητα της περιόδου καλλιέργειας. Εντούτοις, η επίδραση της αλατότητας στη συγκέντρωση K στη ρίζα δεν ακολούθησε την ίδια πορεία μεταβολής στις δύο περιόδους ανάπτυξης. Αύξηση της συγκέντρωσης του άλατος στο αρδευτικό νερό δεν διαφοροποίησε τις συγκεντρώσεις Ca ή Mg στα φύλλα, τους βλαστούς και τους καρπούς. Σχετικά με τις ρίζες, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση στη συγκέντρωση Ca και μείωση της συγκέντρωσης Mg με την αλατότητα, στο X-A και A-K πείραμα, αντίστοιχα.

**Πίνακας 6.4.** Συγκεντρώσεις μακροθρεπτικών (N, P, K, Ca και Mg) ως ποσοστά επί τοις εκατό (%) του ξηρού βάρους σε φύλλα (Φ), βλαστούς (B), καρπούς (Κ) και ρίζες (Ρ) φυτών πεπονιάς καλλιεργούμενα σε κλειστό υδροπονικό σύστημα - NFT όπως επηρεάζονται από τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl στο αρδευτικό νερό (0,7, 2,5 και 5 mM) που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή θρεπτικού διαλύματος σε δύο εποχές καλλιέργειας (Χειμώνα-Άνοιξης και Άνοιξης-Καλοκαιριού). Οι τιμές στον πίνακα απεικονίζουν μέσες τιμές μετρήσεων σε όλη τη διάρκεια του πειράματος.

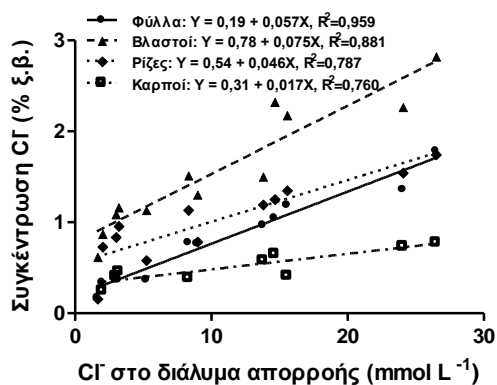
X-A καλ/γεια (mM NaCl)	N†				P				K				Ca				Mg			
	Φ	B	K	P	Φ	B	K	P	Φ	B	K	P	Φ	B	K	P	Φ	B	K	P
0,7	3,86	2,20	3,28	3,72b	0,76	1,03	1,00	1,17b	5,22	6,26a	4,87	5,31b	5,46	0,98	0,39	1,11c	0,61	0,28	0,28	0,35
2,5	3,87	2,26	3,36	4,25a	0,70	0,90	0,98	1,31a	4,86	5,65b	4,88	5,58a	5,80	0,97	0,45	1,21b	0,63	0,27	0,31	0,35
5	3,88	2,17	3,28	3,71b	0,70	0,90	0,95	1,30a	4,65	5,40b	4,86	4,85c	5,41	1,01	0,48	1,40a	0,59	0,27	0,29	0,36
Σημαντικότητα	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	***	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	***	ΜΣ	*	ΜΣ	***	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	***	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ
A-K καλ/γεια (mM NaCl)																				
0,7	3,97	2,19	3,71	3,63b	0,74	0,97	0,99	1,00	4,84	7,40a	5,39	6,22	7,39	1,28	0,79	1,10	0,72	0,26	0,37	0,38a
2,5	3,85	2,18	3,64	3,85a	0,81	0,94	0,96	1,02	4,82	6,62b	5,37	6,16	7,50	1,19	0,83	1,00	0,74	0,23	0,40	0,30b
5	3,88	2,14	3,63	3,48c	0,71	0,87	0,93	0,98	4,73	5,96b	5,21	5,71	7,33	1,17	0,77	1,08	0,73	0,20	0,38	0,27b
Σημαντικότητα	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	*	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	*	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	*

Σε κάθε καλλιέργεια, οι μέσοι των διαφορετικών μεταχειρίσεων (n = 3) για κάθε χαρακτηριστικό συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα έχουν στατιστικά σημαντική διαφορά σύμφωνα με το κριτήριο Duncan ( $P \leq 5\%$ ). ΜΣ, \*, \*\* και \*\*\* δείχνουν μη σημαντικές ή σημαντικές διαφορές σε επίπεδο  $P \leq 5\%$ , 1% και 0,1%, αντίστοιχα. † Οργανικώς δεσμευμένο.

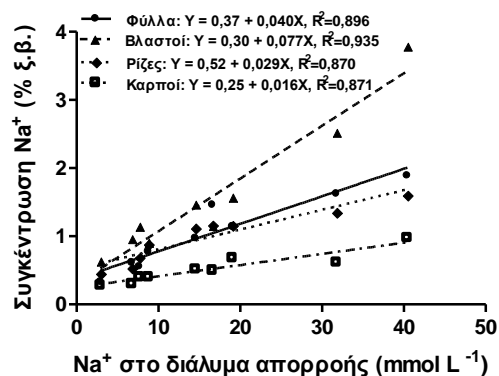
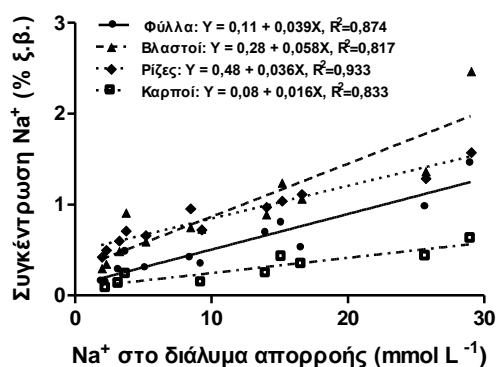
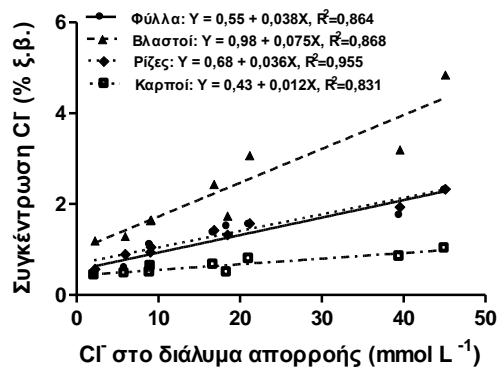
Σε απόλυτες τιμές, οι μέσες συγκεντρώσεις των N, P, K και Mg στους φυτικούς ιστούς ήταν παρόμοιες στις δύο περιόδους ανάπτυξης, ενώ οι συγκεντρώσεις Ca σε φύλλα και καρπούς ήταν μεγαλύτερες στην εαρινό-θερινή καλλιέργεια πεπονιάς (A-K) σε σύγκριση με την καλλιέργεια την περίοδο χειμώνα-άνοιξης (X-A) (Πίνακας 6.4).

Αυξάνοντας την αλατότητα στο διάλυμα ανακύκλωσης αύξησε τη συγκέντρωση του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$ , σε όλα τα φυτικά μέρη, περίπου σε παρόμοια επίπεδα (Σχήμα 6.1). Εντούτοις, ο ρυθμός συσσώρευσης των αλάτων ήταν διαφορετικός ανάμεσα στα διάφορα φυτικά μέρη. Για την απλούστευση της περιγραφής των σχέσεων ανάμεσα στη συγκέντρωση του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον της ρίζας και των συγκεντρώσεων τους στους φυτικούς ιστούς, χρησιμοποιήθηκε γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης για να περιγραφούν τα δεδομένα λαμβάνοντας υπόψη ότι οι συντελεστές προσδιορισμού ( $R^2$ ) είχαν αρκετά υψηλές τιμές (Σχήμα 6.1), παρόλο που σε ορισμένες περιπτώσεις η εκθετική σχέση ήταν δυνατό να είχε μεγαλύτερη ακρίβεια (λεπτομερή στοιχεία δεν παρουσιάζονται). Αναφορικά με τον καταμερισμό των ιόντων των αλάτων στα διάφορα φυτικά μέρη, οι βλαστοί των φυτών πεπονιάς έδειξαν τη μεγαλύτερη, ενώ οι καρποί τη μικρότερη συσσώρευση αλάτων σε συνάρτηση με τις συγκεντρώσεις στο περιβάλλον των ριζών (Σχήμα 6.1). Στα φύλλα και τις ρίζες τα ιόντα  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  συσσωρεύτηκαν σε περίπου παρόμοια επίπεδα, τα οποία βρισκόνταν μεταξύ αυτών που μετρήθηκαν στους βλαστούς και τους καρπούς (Σχήμα 6.1). Τέλος, οι μέσες συγκεντρώσεις  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  που παρατηρήθηκαν στους φυτικούς ιστούς, ήταν μεγαλύτερες στην καλλιέργεια την περίοδο Άνοιξης-Καλοκαιριού (A-K) από ότι στην καλλιέργεια την περίοδο Χειμώνα-Άνοιξης (X-A).

### Χειμώνα-Άνοιξης καλλιέργεια



### Άνοιξης-Καλοκαιριού καλλιέργεια



**Σχήμα 6.1.** Σχέσεις μεταξύ των συγκεντρώσεων  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στο θρεπτικό διάλυμα ριζοστρώματος ( $\text{mmol L}^{-1}$ ) και των συγκεντρώσεων  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στους φυτικούς ιστούς (% ξ.β.) φυτών πεπονιάς cv. ‘Cory’ καλλιεργούμενης σε κλειστό υδροπονικό σύστημα - NFT σε δύο εποχές καλλιέργειας (Χειμώνα-Άνοιξης και Άνοιξης-Καλοκαιριού). Τα σύμβολα υποδηλώνουν μέσες τιμές μετρήσεων σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Γραμμές παλινδρόμησης, εξισώσεις και συντελεστές προσδιορισμού ( $R^2$ ) για φύλλα, βλαστούς, ρίζες και καρπούς απεικονίζονται στα γραφήματα.

### 6.4. Συζήτηση

Η πεπονιά θεωρείται ότι είναι περισσότερο ευαίσθητη στην έκθεση στην αλατότητα κατά τη διάρκεια του βλαστικού σε σχέση με το αναπαραγωγικό στάδιο (Botía et al., 2005). Εντούτοις, το βλαστικό στάδιο στο βιολογικό κύκλο του φυτού έχει χαρακτηριστεί ως η κύρια φάση που συσσωρεύονται τα άλατα σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα (Bar-Yosef,

2008). Οι ρυθμοί συσσώρευσης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  στο διάλυμα ριζοστρώματος της ποικιλίας πεπονιάς ‘Cory’ κατά τη διάρκεια του σταδίου αυτού, δείχνει ότι (i) υψηλότερη συγκέντρωση  $\text{NaCl}$  στο αρχικό αρδευτικό νερό συνεπάγεται εντονότερους ρυθμούς συσσώρευσης  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στο διάλυμα απορροής όπως ενδεχομένως αναμενόταν (Savvas et al., 2005a, b, Massa et al., 2008), (ii) η συσσώρευση των αλάτων στο διάλυμα απορροής ήταν εντονότερη κατά τη διάρκεια της Άνοιξης-Καλοκαιριού (A-K) από ότι την περίοδο Χειμώνα-Άνοιξης (X-A) το οποίο είναι άμεσα συνυφασμένο με την κατανάλωση νερού από τα φυτά (Varlagas et al., 2010), όπως επίσης και της ποσότητας  $\text{NaCl}$  που εισέρχεται στο σύστημα με το νερό άρδευσης (Savvas et al., 2013), και (iii) παρόμοιες συγκεντρώσεις  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στο διάλυμα ριζοστρώματος, τείνουν προς παρόμοιες συγκεντρώσεις  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στους φυτικούς ιστούς (Sonneveld and Voogt, 2009).

Σε σύγκριση με τα X-A, τα A-K φυτά πεπονιάς ήταν περισσότερο εύρωστα με μεγαλύτερους καρπούς, εντούτοις, ο αριθμός των καρπών ήταν σε παρόμοια επίπεδα στις δύο καλλιέργειες. Έτσι, η παραγωγή των φυτών ήταν φυσιολογικά μεγαλύτερη στην A-K από ότι στη X-A καλλιέργεια, ενώ τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των καρπών δεν παρουσίασαν αξιόλογες μεταβολές (Neocleous and Savvas, 2015). Η αναστολή της αύξησης στα φυτά από την αλατότητα έχει κατ’ επανάληψη αναφερθεί στη βιβλιογραφία για πολλά καλλιεργούμενα είδη τόσο στο έδαφος (Parida and Das, 2005) όσο και στην υδροπονία (Bar-Yosef, 2008). Στην παρούσα εργασία, τόσο ως φυσιολογική διεργασία η αύξηση των φυτών εκφραζόμενη ως παραγωγή φυτομάζας, όσο και από οικονομική άποψη η παραγωγή εκφραζόμενη ως εμπορεύσιμο καρπικό προϊόν, και τα δύο μειώθηκαν περίπου κατά τον ίδιο τρόπο στη μεταχείριση υψηλής συγκέντρωσης  $\text{NaCl}$ , σε σύγκριση με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις. Η μείωση της εμπορεύσιμης παραγωγής πεπονιών (μ.ο. 22% μείωση) κατά κύριο λόγο ήταν συνυφασμένη με τη μείωση του μέσου βάρους καρπού. Σε συμφωνία με αυτή τη διαπίστωση, ο Bar-Yosef (2008) έχει αναφέρει ότι, η ανύψωση της ολικής



συγκέντρωσης αλάτων στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια πεπονιού προκάλεσε ανάλογη μείωση στην εμπορεύσιμη παραγωγή αλλά αύξησε τα διαλυτά στερεά στους καρπούς. Σε γενικές γραμμές, υπάρχει η άποψη ότι η μείωση της παραγωγής στα κηπευτικά ενδεχομένως να αντισταθμίζεται από τη σημαντική βελτίωση στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των καρπών λόγω αλατότητας, σύμφωνα με αρκετές εργασίες στη διεθνή βιβλιογραφία (Sonneveld and Voogt, 2009). Εντούτοις, στην εργασία αυτή, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά δεν διαφοροποιήθηκαν από τις μεταχειρίσεις αλατότητας NaCl που εξετάστηκαν, σε συμφωνία με τα αποτελέσματα στο Κεφάλαιο I (αλατότητα θρεπτικών στοιχείων) και τη δημοσιευμένη εργασία από τους Neocleous and Savvas, (2015).

Η φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών είναι άμεσα συνυφασμένη με την αύξηση των φυτών με την έννοια της παραγωγής βιομάζας, η οποία συνήθως συσχετίζεται με την απόδοση σε καρπό. Εντούτοις, περιορισμοί λόγω των στομάτων των φύλλων και λόγω των μεταβολικών διεργασιών των φυτών που συνδέονται με την απορρόφηση άνθρακα από την ατμόσφαιρα, ή συνδυασμού τους, είναι οι κύριοι λόγοι στους οποίους οφείλονται οι μειωμένοι ρυθμοί φωτοσύνθεσης σε συνθήκες ήπιας και μέτριας περιβαλλοντικής καταπόνησης (Flexas et al., 2004, Bolla et al., 2009, Roupael et al., 2012). Στο παρόν πείραμα, η ανύψωση της αλατότητας μέχρι τα 30 mM (X-A) και 40 mM (A-K) NaCl στο διάλυμα ριζοστρώματος, είχε αρνητική επίδραση στις φωτοσυνθετικές παραμέτρους και τα στοιχεία παραγωγής των φυτών πεπονιάς. Προφανώς, η στενή σχέση μεταξύ της φωτοσυνθετικής απόδοσης και της αύξησης των φυτών πεπονιάς, κάτω από συνθήκες βαθμιαίας αύξησης της αλατότητας σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα, έχει επιβεβαιωθεί. Η ελάττωση της στοματικής αγωγιμότητας ( $g_s$ ) συνοδεύτηκε από μείωση της συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> στους μεσοκυττάριους χώρους (Ci), και του ρυθμού διαπνοής (E) αποδεικνύοντας ότι η λειτουργία των στομάτων αποτέλεσε τον κύριο λόγο περιορισμού της διάχυσης του CO<sub>2</sub> στο εσωτερικό των φύλλων, εμποδίζοντας έτσι τις μεταβολικές διεργασίες και την

συνεπακόλουθη αύξηση του φυτού. Αναστολή διεργασιών που σχετίζονται με την ανταλλαγή αερίων κατά τη φωτοσύνθεση έχει επίσης παρατηρηθεί σε διάφορα φυτικά είδη κάτω από συνθήκες αλατούχου καταπόνησης (Ashraf and Harris, 2013).

Μια άλλη επιβλαβής επίδραση της αλατότητας είναι η συσσώρευση ενεργών μορφών οξυγόνου (activated oxygen species – ROS, He et al., 2009). Ο σχηματισμός των ROS έχει συσχετισθεί με την εμφάνιση μεταβολικών δυσλειτουργιών στα φυτά που οδηγούν στο κλείσιμο των στομάτων των φύλλων (Ashraf, 2009, He et al., 2009). Παρόλο που ο σχηματισμός των ROS δεν αξιολογήθηκε στην παρούσα εργασία, το ότι ο ρυθμός φωτοσύνθεσης στα φυτά που μεταχειρίστηκαν με υψηλή συγκέντρωση NaCl μειώθηκε αλλά χωρίς ταυτόχρονη μείωση του ρυθμού μεταφοράς ηλεκτρονίων, αφήνει να εννοηθεί ότι ένα μέρος των ηλεκτρονίων κινήθηκαν προς τα μόρια του οξυγόνου αντί να χρησιμοποιηθούν για το μεταβολισμό του άνθρακα, αλλάζοντας την ισορροπία μεταξύ του σχηματισμού και χρησιμοποίησης των ROS μορφών (Sánchez-Rodríguez et al., 1997). Εντούτοις, χωρίς την προσθήκη επιπλέον ποσότητας NaCl (0,7 mM NaCl) και σε επίπεδο 2,5 mM NaCl στο θρεπτικό διάλυμα, τόσο οι φωτοσυνθετικές παράμετροι όσο και οι μετρήσεις χαρακτηριστικών της φωτοχημείας του φύλλου έδωσαν πανομοιότυπα αποτελέσματα. Προφανώς αυτό αποδεικνύει ότι η βαθμιαία συσσώρευση των αλάτων (NaCl) στο διάλυμα ανακύκλωσης μέχρι τα επίπεδα 15 (X-A) και 20 (A-K) mM, επιτρέπει στα φυτά πεπονιάς να διατηρήσουν τη λειτουργικότητα του φωτοσυνθετικού μεταβολισμού, κυρίως λόγω της ικανότητας διατήρησης της στοματικής αγωγιμότητας (Rouphael et al., 2008), χωρίς να επηρεαστεί η ισορροπία μεταξύ των διαδικασιών σχηματισμού και χρησιμοποίησης των ROS μορφών, συνεπώς τα φυτά διαφυλάσσουν την αύξηση, την παραγωγή και την ποιότητα των καρπών. Εντούτοις, όταν παρόμοια επίπεδα NaCl δεν ανήλθαν βαθμιαία αλλά εφαρμόστηκαν απότομα στο διάλυμα ριζοστρώματος των φυτών πεπονιάς, ο ρυθμός αφομοίωσης του CO<sub>2</sub> και παράμετροι της καρπικής απόδοσης των φυτών επηρεάστηκαν αρνητικά

(Mavrogianopoulos et al., 1999, Colla et al., 2006). Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε συμφωνία με τη γενική διαπίστωση ότι η έκθεση των φυτών σε βαθμιαία αύξηση της αλατότητας είναι λιγότερη αρνητική σε σύγκριση με την απότομη αύξηση της (Savvas et al., 2005a, b, Bar-Yosef, 2008). Όπως αναφέρεται στους Ashraf and Harris (2013), η ρύθμιση της στοματικής αγωγιμότητας των φύλλων ( $g_s$ ) είναι παράγοντας-κλειδί στα φυτά, καθώς είναι ζωτικής σημασίας τόσο για την αποφυγή της αφυδάτωσης όσο και της τροφοδοσίας του  $CO_2$  και αυτή η διαπίστωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων στην εργασία αυτή. Για παράδειγμα, θετικές επιδράσεις στην απόδοση αναφέρθηκαν από τους Roupheal et al. (2012) σε φυτά πεπονιάς και αγγουριάς, λόγω της ικανότητας τους να διατηρούν υψηλούς ρυθμούς φωτοσυνθετικής αφομοίωσης  $CO_2$  κάτω από συνθήκες αλατότητας.

Μια κοινή βλαπτική επίδραση του χαμηλού ωσμωτικού δυναμικού στις καλλιέργειες είναι η μείωση της παραγωγής νωπής και ξηρής βιομάζας (Neocleous and Vasilakakis, 2007). Όντως, στο παρόν πείραμα, η μειωμένη παραγωγή βιομάζας ήταν συνυφασμένη με μειωμένο υδατικό και ωσμωτικό δυναμικό στα φύλλα ακολουθώντας τα επίπεδα αλατότητας στο αρδευτικό νερό. Το ωσμωτικό δυναμικό ( $\Psi_\pi$ ) και το υδατικό δυναμικό των φύλλων ( $\Psi_w$ ) στα φυτά πεπονιάς είχε περισσότερο αρνητικές τιμές στην υψηλότερη συγκέντρωση αλατότητας (5 mM NaCl) και το σχετικό υδατικό περιεχόμενο (RWC) παρουσίασε μειωτική τάση. Η αύξηση της συσσώρευσης των ιόντων  $Cl^-$  και  $Na^+$  τόσο στο περιβάλλον των ριζών όσο και στους φυτικούς ιστούς, μπορεί ενδεχομένως να δικαιολογήσει την εμφανή επίδραση της μεταχείρισης υψηλής αλατότητας στις υδατικές σχέσεις του φυτού στο παρόν πείραμα. Στο ίδιο μήκος κύματος, οι Sonneveld and Voogt (2009) αναφέρουν ότι το ωσμωτικό δυναμικό του διαλύματος που περιβάλλει τις ρίζες των καλλιεργειών σε θερμοκήπια είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας ρύθμισης της αύξησης των καλλιεργειών που συνδέεται άμεσα με τη συσσώρευση των αλάτων. Η τιμή του υδατικού δυναμικού ( $\Psi_w$ ) που μετρήθηκε

ήταν χαμηλότερη (αρνητικότερη) του  $-1$  MPa, επίπεδο το οποίο αντικατοπτρίζει μια αρχική κατάσταση υδατικής καταπόνησης (Hsiao 1973, Larcher 1980). Επιπρόσθετα, άλλοι ερευνητές (Flexas et al., 2004) ανέφεραν ότι η μείωση στη φωτοσυνθετική απόδοση μπορεί να είναι το αποτέλεσμα του περιορισμού των διεργασιών μεταβολισμού του άνθρακα κάτω από συνθήκες χαμηλού υδατικού δυναμικού, το οποίο με τη σειρά του είναι άμεσα συνδεδεμένο με την παραγωγική ικανότητα του φυτού. Σε συμφωνία με αυτή τη διαπίστωση, το χαμηλό υδατικό δυναμικό που παρατηρήθηκε στην υψηλή συγκέντρωση αλατότητας ήταν συνυφασμένο με τη μείωση της στοματικής αγωγιμότητας ( $g_s$ ), περιορίζοντας τους ρυθμούς αφομοίωσης (A) και διαπνοής (E), μειώνοντας εντέλει τους ρυθμούς αύξησης και ανάπτυξης των φυτών (Lawlor, 2002). Αντίθετα, οι υδατικές σχέσεις στα φύλλα των φυτών που μεταχειρίστηκαν με μέτρια αλατότητα (δηλ.  $2,5$  mM NaCl) δεν συνδυάστηκαν με περιορισμό των φωτοσυνθετικών παραμέτρων σε επίπεδο στομάτων ή χλωροπλαστών, και έτσι η φυτική αύξηση και παραγωγή δεν περιορίστηκε. Αυτό αποδεικνύει ότι η βαθμιαία συσσώρευση των αλάτων (NaCl) σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα με τελικές συγκεντρώσεις στο διάλυμα ριζοστρώματος  $15$  (X-A) -  $20$  (A-K) mM, δεν επηρεάζουν αρνητικά τις υδατικές σχέσεις του φυτού [δηλ. μείωση υδατικού δυναμικού φύλλων ( $\Psi_w$ ) μέχρι  $-1$  MPa χωρίς αρνητική επίδραση στη φωτοσύνθεση] και τη συνεπακόλουθη αύξηση και παραγωγή, πιθανότατα επάγοντας μηχανισμούς εγκλιματισμού των φυτών όπως η ωσμωτική προσαρμογή [μείωση ωσμωτικού δυναμικού φύλλων ( $\Psi\pi$ ), Rouphael et al., 2008]. Σε αυτά τα πλαίσια, το μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο αλατότητας στο περιβάλλον των ριζών τομάτας καλλιεργούμενης σε υποστρώματα έχει καθορισθεί και για τα δύο ιόντα του άλατος NaCl στην συγκέντρωση των  $22$  mM (Sonneveld and Voogt, 2009). Τα ευρεθέντα αποτελέσματα συμφωνούν με την υπόθεση ότι τα στόματα λειτουργούν ώστε να διατηρηθεί το υδατικό δυναμικό των φύλλων ( $\Psi_w$ ) πάνω από ένα ελάχιστο όριο και συνδυάζονται με τα αποτελέσματα της φωτοσύνθεσης. Η προσαρμογή αυτή οφείλεται στην αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων  $Na^+$  και  $Cl^-$  στο

εσωτερικό των κυττάρων και στη συσσώρευση οργανικών μορίων (Läuchli and Grattan, 2007).

Τα δεδομένα από τα πειράματα έδειξαν ότι η έκθεση των φυτών σε αυξημένες συγκεντρώσεις NaCl στο διάλυμα ριζοστρώματος προκαλεί σημαντική αύξηση των συγκεντρώσεων Na<sup>+</sup> και Cl<sup>-</sup> σε όλους τους φυτικούς ιστούς. Επιπρόσθετα, την περίοδο A-K μεγαλύτερες ποσότητες των ιόντων Na<sup>+</sup> και Cl<sup>-</sup> εισήλθαν στα φυτά, γεγονός το οποίο έχει συνδεθεί με τους υψηλότερους ρυθμούς διαπνοής των φυτών (Savvas et al., 2008, Edelstein et al., 2011). Υψηλότερα επίπεδα περιεκτικότητας Na<sup>+</sup> και Cl<sup>-</sup> στους βλαστούς και ακολούθως στις ρίζες και φύλλα, υποδηλώνει προτιμησιακή συγκέντρωση στους βλαστούς σε ταύτιση με προηγούμενες αναφορές (An et al., 2002, Tedeschi et al., 2011). Εντούτοις, η δυνατότητα συγκράτησης στο βλαστό περιορίζεται σε συνθήκες μακρόχρονης επίδρασης της αλατότητας και έτσι τα ιόντα Na<sup>+</sup> και Cl<sup>-</sup> μεταφέρονται σε όλα τα φυτικά μέρη. Επίσης, μετρήσεις της περιεκτικότητας των ιόντων Na<sup>+</sup> και Cl<sup>-</sup> σε όλους τους φυτικούς ιστούς, δείχνει ότι το Galia-υβρίδιο 'Cory' ασκεί μικρό έλεγχο στην απορρόφηση του Na<sup>+</sup> και του Cl<sup>-</sup> από το διάλυμα ριζοστρώματος, επιβεβαιώνοντας την έλλειψη ικανότητας αποκλεισμού (πλήρους ελέγχου) της εισόδου αλάτων από το ριζικό σύστημα της πεπονιάς (Ruiz et al., 1997, Orsini et al., 2013). Είναι ευρέως γνωστό ότι τα χλωριόντα Cl<sup>-</sup> απορροφούνται και μεταφέρονται κυρίως με το ρεύμα της διαπνοής (Neocleous et al., 2014) και ότι το Cl<sup>-</sup> γενικά αυξάνεται περισσότερο από το Na<sup>+</sup> στο βλαστό (Botía et al., 2005). Εντούτοις, η αποφυγή της συσσώρευσης Na<sup>+</sup> στο βλαστό του υβριδίου-Galia 'Cory' ήταν περιορισμένη με την εξέλιξη του χρόνου, γεγονός το οποίο συμφωνεί με την πρόταση των Sonneveld and Voogt (2009) ότι οι συγκεντρώσεις Na<sup>+</sup> και Cl<sup>-</sup> στο περιβάλλον των ριζών και μέσα στα φυτά είναι στενά συνδεδεμένες. Είναι επίσης ενδιαφέρον, ότι οι διαφορές μεταξύ των εξωτερικών συγκεντρώσεων και των ρυθμών συσσώρευσης του Na<sup>+</sup> και του Cl<sup>-</sup> στους φυτικούς ιστούς, υποδηλώνουν ότι το ριζικό σύστημα της πεπονιάς ασκεί μερικό έλεγχο στην απορρόφηση

$\text{Na}^+$  και η είσοδος του  $\text{Na}^+$  στο φυτό δεν είναι απλά μια παθητική διαδικασία, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνει προηγούμενα αποτελέσματα στη διατριβή αυτή (Κεφάλαιο II). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε φυτά πεπονιάς τύπου *Galía* καλλιεργούμενα σε υδροπονικό σύστημα σε συνθήκες αλατότητας, βρέθηκε σημαντική συσχέτιση μεταξύ της αύξησης του φυτού και της συγκέντρωσης  $\text{Na}^+$  στους φυτικούς ιστούς (Botía et al., 2005). Οι Tzerakis et al. (2012) αναφέρουν ότι οι κρίσιμες συγκεντρώσεις στους φυτικούς ιστούς που συνδέονται με τη μείωση της φυτικής αύξησης και της παραγωγής, χρησιμοποιούνται συχνά ως τιμές-δείκτες του ορίου συγκέντρωσης τοξικότητας. Προφανώς ο μηχανισμός προστασίας των φυτών πεπονιάς από την αλατότητα οφείλεται στην ικανότητα του φυτού να διαμερισματοποιεί τα άλατα στα χυμοτόπια ή τον αποπλάστη και έτσι να αποφεύγεται η συσσώρευση τους στο κυτόπλασμα, μέχρι την υπέρβαση ενός ορίου συγκέντρωσης στους φυτικούς ιστούς (An et al., 2002, Munns, 2002). Εντούτοις, πολύ υψηλές συγκεντρώσεις  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στους φυτικούς ιστούς, οι οποίες αντιστοιχούσαν σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις στο διάλυμα ριζοστρώματος, φαίνεται να εμπλέκονται στην παρατηρούμενη μειωμένη αύξηση και παραγωγή (Parida and Das, 2005, Colla et al., 2006, Läuchli and Grattan, 2007). Επίσης, σαφής διάκριση μεταξύ ωσμωτικής επίδρασης και ειδικής τοξικότητας των αλάτων, δεν ήταν δυνατό να γίνει στην παρούσα εργασία.

Στα πειράματα που περιγράφηκαν, παρόλη τη σημαντική αύξηση της πρόσληψης των ποσοτήτων  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  από τα φυτά στην υψηλή μεταχείριση αλατότητας  $\text{NaCl}$ , οι μέσες συγκεντρώσεις των μακροστοιχείων (δηλ. N, P, K, Ca και Mg) στους φυτικούς ιστούς, δεν επηρεάστηκαν στις περισσότερες περιπτώσεις (Bar-Yosef, 2008, Neocleous and Savvas, 2015). Παρόμοια, οι Sonneveld and Voogt (2009) αναφέρουν ότι παρά την απορρόφηση επιπρόσθετων ποσοτήτων  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  με την αύξηση της αλατότητας, η θρεπτική σύσταση των φυτών σε διάφορες καλλιέργειες δεν επηρεάστηκε σε μεγάλο βαθμό. Παρόλο που οι πειραματικές επεμβάσεις αλατότητας δεν επηρέασαν σημαντικά ( $P \leq 0,05$ ) τις ποσότητες

απορρόφησης των μακροστοιχείων, η γενική τάση μείωσης των δεδομένων απορρόφησης ( $P \leq 0,1$ ) αφήνει να εννοηθεί ότι ο μειωμένος ρυθμός φωτοσυνθετικής δραστηριότητας μείωσε τη βιοσύνθεση οργανικών υποστρωμάτων διαθέσιμων για την αφομοίωση των θρεπτικών στοιχείων, το οποίο εντέλει οδήγησε στην παραγωγή λιγότερης φυτομάζας στη μεταχείριση υψηλής συγκέντρωσης NaCl. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ξεκάθαρα ότι η ελάττωση της παραγωγής στη μεταχείριση υψηλής αλατότητας οφειλόταν κυρίως σε στοματικούς περιορισμούς, υδατικές ανισορροπίες και ειδικές επιδράσεις (τοξικότητες) των αλάτων, και λιγότερο σε θρεπτικούς περιορισμούς. Εντούτοις, δεν είναι ξεκάθαρο αν το  $\text{Na}^+$  ή το  $\text{Cl}^-$  ή ο συνδυασμός των δύο είναι που ευθύνεται για αυτή τη μείωση της παραγωγής.

### **6.5. Συμπεράσματα**

Η εργασία αυτή αναφέρεται στην περιγραφή της συσσώρευσης των αλάτων σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα, θέμα το οποίο ανήκει σε ένα μη ολοκληρωμένο ερευνητικά πεδίο. Τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής αποδεικνύουν ότι η βαθμιαία συσσώρευση της αλατότητας στο περιβάλλον των ριζών σε μέγιστα επίπεδα συγκεντρώσεων 15 (X-A) και 20 (A-K) mM για τα ιόντα του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$ , δεν είναι επιβλαβής για τη βέλτιστη παραγωγή της ποικιλίας πεπονιού που εξετάστηκε, επειδή τα φυτά είναι ικανά να διατηρήσουν τους φυσιολογικούς ρυθμούς αύξησης και παραγωγής επάγοντας διάφορους μηχανισμούς εγκλιματισμού όπως η ωσμωτική προσαρμογή και η διαμερισματοποίηση των αλάτων. Έτσι, φυσιολογικοί μηχανισμοί όπως η απορρόφηση και μεταφορά των θρεπτικών στοιχείων, οι υδατικές σχέσεις και ο καθαρός ρυθμός αφομοίωσης του  $\text{CO}_2$ , διατηρούνται ακέραιοι και λειτουργικοί, επιτρέποντας τα φυτά να προσαρμόζονται με την πάροδο του χρόνου ρυθμίζοντας την αύξηση και την απόδοση. Εντούτοις, επιβάρυνση με μεγαλύτερες ποσότητες  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στο διάλυμα ριζοστρώματος και στους φυτικούς ιστούς, επηρέασε αρνητικά την αύξηση και την παραγωγή, κυρίως λόγω στοματικών περιορισμών, ωσμωτικών και ειδικών

ιοντικών επιδράσεων των αλάτων. Ως εκ τούτου, η καλλιέργεια της ποικιλίας πεπονιάς ‘Cory’ ή ποικιλιών με παρόμοια απόκριση στην αλατότητα, σε συστήματα με πλήρη και συνεχή ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος είναι εφικτή, χωρίς περιορισμούς στην αύξηση, την απόδοση και την ποιότητα του προϊόντος όταν η συγκέντρωση NaCl στο αρδευτικό νερό δεν υπερβαίνει τη συγκέντρωση 2,5 mM. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλείο στη διαχείριση θερμοκηπιακών καλλιεργειών (πεπονιού) με ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος κάτω από συνθήκες αλατότητας (Neocleous et al., 2017).



**Εικόνα 6.2.** Ανάπτυξη καλλιέργειας πεπονιάς σε σύστημα με συνεχή και πλήρη ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος υπό συνθήκες αλατότητας.



## **7. ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV. «Προσομοίωση της συσσώρευσης NaCl σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς, και η επίδραση της στην απορρόφηση μακροθρεπτικών, την αύξηση, την παραγωγή και την ανταλλαγή αερίων κατά τη φωτοσύνθεση»**

### **7.1. Εισαγωγή**

Τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής των κλειστών υδροπονικών συστημάτων στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες κηπευτικών έχουν αναφερθεί στην υποενότητα 2.8. Δυστυχώς, η επαναχρησιμοποίηση του θρεπτικού διαλύματος που απορρέει από το χώρο των ριζών δεν είναι συνήθης πρακτική στις εμπορικές καλλιέργειες θερμοκηπίων στην περιοχή της Μεσογείου (Massa et al., 2010, Thompson et al., 2013). Αυτό οφείλεται κυρίως στη βαθμιαία συσσώρευση ιόντων λόγω της αυξημένης παρουσίας τους στα αρδευτικά νερά, όπως το  $\text{Na}^+$  και το  $\text{Cl}^-$ , την εμφάνιση θρεπτικών ανισορροπιών στο διάλυμα ανακύκλωσης και την έλλειψη τεχνογνωσίας σχετικά με τη διαδικασία ανακύκλωσης του θρεπτικού διαλύματος (Bar-Yosef, 2008). Για την επίλυση των πιο πάνω, τις τελευταίες δεκαετίες αναπτύχθηκαν προσεγγίσεις με τη χρήση εργαλείων μοντελοποίησης με στόχο την περιγραφή των διαδικασιών που σχετίζονται τόσο με τη θρέψη των φυτών όσο και με τον καλύτερο έλεγχο και ελάττωση του ρυθμού συσσώρευσης των αλάτων σε κλειστά υδροπονικά συστήματα για διάφορες καλλιέργειες (βλέπε υποενότητα 2.11). Εντούτοις, με βάση το γνωστικό περιεχόμενο της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας, παρόμοιες πληροφορίες για την καλλιέργεια κολοκυθιάς δεν βρέθηκαν.

Η εκτός εδάφους καλλιέργεια κολοκυθιάς (*Cucurbita pepo* L.) είναι αρκετά διαδεδομένη ανάμεσα στους καλλιεργητές θερμοκηπίου στη λεκάνη της Μεσογείου (Rouphael and Colla, 2005). Τα φυτά της κολοκυθιάς είναι περισσότερο ανθεκτικά στην αλατότητα σε σύγκριση με άλλα καρποδοτικά λαχανικά θερμοκηπίου (Rouphael et al., 2006). Συνεπώς, η καλλιέργεια κολοκυθιάς σε κλειστά ή ημί-κλειστά υδροπονικά συστήματα

θα μπορούσε να είναι προτιμότερη επιλογή σε περιοχές που αντιμετωπίζουν προβλήματα με αλατούχα νερά (Katsoulas et al., 2015). Επίσης, η βελτιστοποίηση της διαχείρισης του θρεπτικού διαλύματος σε κλειστά υδροπονικά συστήματα προϋποθέτει την ύπαρξη ισορροπίας μεταξύ των χορηγούμενων και των απορροφούμενων θρεπτικών στοιχείων από την καλλιέργεια, ώστε να αποφευχθεί τυχόν συσσώρευση ή ανεπάρκεια θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα ανακύκλωσης και ως εκ τούτου στη ριζόσφαιρα (Magán et al., 2005), ελαχιστοποιώντας έτσι την ανάγκη περιοδικής απόρριψης νερού και θρεπτικών στοιχείων. Μια τυπική τεχνική επαναχρησιμοποίησης του διαλύματος απορροής βασίζεται στην παροχή θρεπτικών στοιχείων και νερού στην καλλιέργεια σε ίσες αναλογίες με αυτές που διέπουν τις συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) και αρκετοί ερευνητές έχουν δημοσιεύσει δεδομένα σχετικά με τις ΣΑ διαφόρων καλλιεργούμενων ειδών (βλέπε υποενότητες 2.7 και 2.8). Εντούτοις, ο προσδιορισμός κατάλληλων τιμών ΣΑ των θρεπτικών στοιχείων σε αλατούχα περιβάλλοντα, εξακολουθεί να είναι πρωταρχικής σημασίας για τις καλλιέργειες σε κλειστά υδροπονικά συστήματα (Massa et al., 2010, Neocleous and Savvas, 2016). Με βάση τη διαθέσιμη γνώση, στην προσπάθεια αριστοποίησης του σχήματος θρέψης υδροπονικής καλλιέργεια κολοκυθιάς (Colla and Saccardo, 2003, Roupael et al., 2006, Roupael and Colla, 2009), σπάνια τίθεται το ερώτημα κατά πόσο οι ΣΑ των θρεπτικών και μη θρεπτικών στοιχείων διαφοροποιούνται στη διάρκεια εξέλιξης της καλλιέργειας υπό συνθήκες αλατότητας.

Συνοψίζοντας, η εργασία αυτή είχε στόχο να καθορίσει τη σχέση που συνδέει τις αναλογίες απορρόφησης  $\text{Na}^+$ /νερό και  $\text{Cl}^-$ /νερό (αναφέρονται ως συγκεντρώσεις απορρόφησης, ΣΑ) με τις συγκεντρώσεις τους στο διάλυμα ριζοστρώματος σε υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς, με τη χρήση διαφορετικών συγκεντρώσεων  $\text{NaCl}$  στο αρδευτικό νερό που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή νωπού θρεπτικού διαλύματος. Υφιστάμενα εμπειρικά μοντέλα από τη διεθνή βιβλιογραφία (βλέπε υποενότητα 2.11) χρησιμοποιήθηκαν

για να περιγραφούν τα πειραματικά δεδομένα. Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου (υπολογισμός παραμέτρων μοντέλου), χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα από Ανοιξιάτικη καλλιέργεια κολοκυθιάς (Α), ενώ ο έλεγχος της αξιοπιστίας του μοντέλου έγινε σε μια δεύτερη ανεξάρτητη Φθινοπωρινό-Χειμερινή καλλιέργεια (Φ-Χ). Ο δεύτερος κύριος στόχος της εργασίας ήταν να προσδιοριστούν οι μέσες ΣΑ επιλεγμένων μακροθρεπτικών (δηλ. N, P, K, Ca και Mg) για υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς και να μελετηθεί αν επηρεάζονται από τη βαθμιαία αύξηση της αλατότητας στο διάλυμα ριζοστρώματος. Για να κατανοηθεί καλύτερα η απόκριση των φυτών κολοκυθιάς στην αύξηση της αλατότητας, αύξηση, παραγωγή, ποιότητα, συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων στους φυτικούς ιστούς και φωτοσυνθετικοί παράμετροι, προσδιορίστηκαν ως μηχανισμοί ανάδρασης της καλλιέργειας.

## **7.2. Υλικά και Μέθοδοι**

### **7.2.1. Συνθήκες ανάπτυξης της καλλιέργειας**

Δύο πειράματα διεξήχθησαν στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις που αναφέρονται στην υποενότητα 3.1 και κάτω από φυσικές συνθήκες φωτισμού. Το πρώτο πείραμα διεξήχθη την περίοδο Οκτωβρίου-Δεκεμβρίου 2014 (Φθινοπωρινό-Χειμερινή καλλιέργεια, Φ-Χ) και το δεύτερο την περίοδο Μαρτίου-Μαΐου 2015 (Ανοιξιάτικη καλλιέργεια, Α). Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ανοικτού πράσινου χρώματος ποικιλία (Anita F<sub>1</sub>, Seminis, Netherlands) κολοκυθιάς (*Cucurbita pepo* L.), η οποία χρησιμοποιείται ευρέως από τους ντόπιους παραγωγούς στα θερμοκήπια. Και στα δύο πειράματα, η σπορά έγινε σε ειδικούς κύβους πετροβάμβακα για παραγωγή σποροφύτων (50 × 40 mm) δύο εβδομάδες πριν την ημερομηνία μεταφύτευσης (μεταφοράς). Στο στάδιο των δύο πραγματικών φύλλων, τα φυτά μεταφέρθηκαν σε είκοσι υδροπονικές μονάδες (κανάλια ρηχού ρεύματος θρεπτικού

διαλύματος τύπου NFT) με συνεχή και πλήρη ανακύκλωση στις 3 Οκτωβρίου 2014 (Φ-X) και στις 6 Μαρτίου 2015 (Α).



**Εικόνα 7.1.** Φυτά, καρποί και ρίζες πειραματικής καλλιέργεια κολοκυθιάς σε NFT.

Η τεχνική της ανακύκλωσης του θρεπτικού διαλύματος, το σύστημα καλλιέργειας και οι συνθήκες ανάπτυξης του φυτικού υλικού αναφέρονται στις υποενότητες 3.2, 3.3 και 3.4, αντίστοιχα. Και στα δύο πειράματα, η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος που αρχικά είχε εισαχθεί στο σύστημα παροχής-συλλογής ήταν η ακόλουθη: 6,0 mM  $K^+$ , 4,6 mM  $Ca^{2+}$ , 2,6 mM  $Mg^{2+}$ , 0,7 mM  $NH_4^+$ , 15,5 mM  $NO_3^-$ , 1,1 mM  $H_2PO_4^-$ , 2,1 mM  $SO_4^{2-}$ , 20  $\mu M$  Fe, 12  $\mu M$  Mn, 6  $\mu M$  Zn, 1  $\mu M$  Cu, 45  $\mu M$  B, και 0,5  $\mu M$  Mo. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και το pH αυτού του θρεπτικού διαλύματος ήταν 2,4  $dS\ m^{-1}$  και 5,6, αντίστοιχα. Για να διατηρηθούν οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα ανακύκλωσης στα επιθυμητά επίπεδα, ένα τυπικό θρεπτικό διάλυμα (συμπλήρωσης) για καλλιέργεια κολοκυθιάς σε κλειστό υδροπονικό σύστημα με την παρακάτω σύνθεση (Savvas et al., 2013) αναμιγνυόταν με το διάλυμα απορροής και το εξερχόμενο μείγμα συνιστούσε το τελικό θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας στα φυτά: 5,3 mM  $K^+$ , 2,65 mM  $Ca^{2+}$ , 1,5 mM  $Mg^{2+}$ , 1,6 mM  $NH_4^+$ , 11,65 mM  $NO_3^-$ , 1,05 mM  $H_2PO_4^-$ , 1,11 mM  $SO_4^{2-}$ , 10  $\mu M$  Fe, 10  $\mu M$  Mn, 5  $\mu M$  Zn, 1  $\mu M$  Cu, 30  $\mu M$  B, και 0,5  $\mu M$  Mo. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και το pH αυτού του θρεπτικού διαλύματος ήταν 1,8  $dS\ m^{-1}$  και 5,6, αντίστοιχα.

Τέσσερις διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl στο θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης (ΘΔΣ), ειδικότερα 0,7 mM, 3 mM, 5 mM και 7 mM, εφαρμόστηκαν ως πειραματικές

επεμβάσεις, οι οποίες αντιστοιχούσαν στις ακόλουθες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC): 1,8, 2,0, 2,2, και 2,4 dS m<sup>-1</sup>, αντίστοιχα. Τα τέσσερα επίπεδα αλατότητας είχαν επιτευχθεί προσθέτοντας τις κατάλληλες ποσότητες NaCl στο αρδευτικό νερό, το οποίο αρχικά περιείχε συγκέντρωση 0,7 mM NaCl. Οι τέσσερις διαφορετικές μεταχειρίσεις αλατότητας κατανεμήθηκαν σε τυχαιοποιημένο σχέδιο πλήρων ομάδων με τέσσερις επαναλήψεις για κάθε μεταχείριση. Η κάθε επανάληψη περιελάμβανε μια ανεξάρτητη κλειστού τύπου υδροπονική μονάδα (κανάλι ρηχού ρεύματος θρεπτικού διαλύματος - NFT) που φιλοξενούσε 11 φυτά. Η έναρξη των μεταχειρίσεων έγινε αμέσως μετά τη μεταφύτευση των σποροφύτων στα κανάλια υδροπονίας και διήρκησαν μέχρι το τέλος των πειραμάτων.

Τα φυτά υποστυλώθηκαν κατακόρυφα με τη χρήση πλαστικού σπάγκου και στερεώθηκαν σε οριζόντιο σύρμα (2,20 m πάνω από τη γραμμή φύτευσης). Τα κανάλια τοποθετήθηκαν σε αποστάσεις 1 m μεταξύ τους με τελική πυκνότητα φύτευσης 2,0 φυτά m<sup>-2</sup> και ρυθμούς ροής του θρεπτικού διαλύματος σε κάθε κανάλι 0,1 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. Το κλάδεμα περιελάμβανε αφαίρεση των παλιών φύλλων και ο έλεγχος των εχθρών και ασθενειών έγινε σύμφωνα με τις ορθές γεωργικές πρακτικές σε καλλιέργειες θερμοκηπίων. Η συγκομιδή των καρπών άρχισε και τερματίστηκε στις 29 Οκτωβρίου 2014 και 22 Δεκεμβρίου 2014 στο Φ-X πείραμα, και στις 3 Απριλίου 2015 και 25 Μαΐου 2015, αντίστοιχα, στο Α πείραμα.

### **7.2.2. Μετρήσεις**

Η επίδραση της αύξησης της αλατότητας στην αύξηση των φυτών αξιολογήθηκε μετρώντας την παραγωγή ξηρής βιομάζας σε οκτώ φυτά για κάθε μεταχείριση στο τέλος των πειραμάτων, λαμβάνοντας υπόψη και όλα τα κλαδέματα μέχρι την ημερομηνία αυτή. Η επίδραση της αλατότητας στη φωτοσυνθετική δραστηριότητα των φυτών αξιολογήθηκε μετρώντας παραμέτρους της ανταλλαγής αερίων [δηλ. καθαρός ρυθμός φωτοσύνθεσης (A), στοματική αγωγιμότητα (g<sub>s</sub>), συγκέντρωση CO<sub>2</sub> στους μεσοκυττάριους χώρους (Ci), και

ρυθμός διαπνοής (E)] στα πιο πρόσφατα πλήρη αναπτυγμένα φύλλα από την κορυφή σε δύο τυχαία επιλεγμένα φυτά για κάθε επανάληψη δύο εβδομάδες πριν το τέλος του πειράματος. Στα ίδια φύλλα, προσδιορίστηκαν παράμετροι της χλωροφύλλης (δηλ. ποσοτικός προσδιορισμός χλωροφύλλης και φωτοχημική απόδοση του φωτοσυστήματος II – δείκτης Fv/Fm, Neocleous and Savvas, 2013a, b). Τα ίδια επίσης φύλλα σημάνθηκαν για τη μέτρηση του υδατικού δυναμικού ( $\Psi_w$ ) και του ωσμωτικού δυναμικού ( $\Psi_\pi$ ) των φύλλων. Οι καρποί από κάθε πειραματική μονάδα συγκομίζονταν όταν αποκτούσαν εμπορεύσιμο μέγεθος (μεγαλύτερο των 10 cm), και ακολούθως μετρούνταν και ζυγίζονταν για να προσδιοριστεί η ολική καρπική απόδοση και το μέσο βάρος καρπού. Επιπρόσθετα, οι συγκομισθέντες καρποί κατηγοριοποιήθηκαν σε εμπορεύσιμους (αποδεκτό χρώμα και ποιότητα) και μη εμπορεύσιμους (ατελώς ή κακώς σχηματισμένοι). Σε οκτώ καρπούς από κάθε μεταχείριση προσδιορίστηκαν ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως: διαλυτά στερεά, pH, ογκομετρούμενη οξύτητα, ξηρή ουσία, ασκορβικό οξύ, ολικές φαινολικές ουσίες, συνολική αντιοξειδωτική ικανότητα (ferric reducing antioxidant power – δοκιμή FRAP και 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl – δοκιμή DPPH) και συγκέντρωση νιτρικών (Neocleous et al., 2014, Neocleous and Savvas, 2015). Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των αναγωγικών σακχάρων (γλυκόζη και φρουκτόζη) έγινε χρησιμοποιώντας το ανακλασίμετρο RQflex και της δοκιμής glucose and fructose test με βάση τις οδηγίες της εταιρείας (Merck, Darmstadt, Germany). Οι αντίστοιχες μεθοδολογίες για όλες τις πιο πάνω μετρήσεις περιγράφονται στην υποενότητα 3.6 (Μεθοδολογίες εργαστηριακών μετρήσεων).

Η μέση ημερήσια θερμοκρασία και σχετική υγρασία στο θερμοκήπιο διατηρήθηκε μεταξύ 15-30°C (μ.ο. 22,8 °C στην καλλιέργεια Φ-X και 24,9°C στην καλλιέργεια Α) και 60-80%, αντίστοιχα. Η ολική ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία είχε μέσες τιμές 11,9 MJ m<sup>-2</sup> και 21,6 MJ m<sup>-2</sup> στο Φ-X και Α πείραμα, αντίστοιχα.

### 7.2.3. Χειρισμός δεδομένων και χημικές αναλύσεις

Ολόκληρα φυτά και υδατικά διαλύματα συλλέγονταν από κάθε υδροπονική μονάδα στην αρχή και στο τέλος κάθε χρονικής περιόδου, δηλ., 0-20, 20-40, 40-60 και 60-80 ημέρες μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων (HMEM) και στα δύο πειράματα. Τα φυτά διαχωρίστηκαν σε φύλλα, βλαστούς, ρίζες και καρπούς, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για να προσδιορισθούν οι συγκεντρώσεις επιλεγμένων θρεπτικών και μη θρεπτικών στοιχείων (N, P, K, Ca, Mg, Cl και Na). Οι συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών στη ξηρή βιομάζα των κλαδεμάτων λήφθηκε επίσης υπόψη στους υπολογισμούς. Η αναλογία απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων και νερού (συγκεντρώσεις απορρόφησης, ΣΑ) για N, P, K, Ca και Mg υπολογίστηκαν με χημική ανάλυση τόσο του θρεπτικού διαλύματος όσο και της ξηρής βιομάζας του φυτού. Οι μετρήσεις αποσκοπούσαν στον προσδιορισμό της απομάκρυνσης των θρεπτικών στοιχείων ανά μονάδα όγκου απορροφούμενου νερού από το ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα, και τις ποσότητες οι οποίες ανακτήθηκαν από τη ξηρή βιομάζα του φυτού ανά μονάδα όγκου νερού που καταναλωνόταν (βλέπε υποενότητα 3.5). Η χημική ανάλυση των φυτικών ιστών και υδατικών διαλυμάτων για τα στοιχεία N, P, K, Ca, Mg, Cl και Na έγινε ακολουθώντας τη μεθοδολογία στην υποενότητα 3.5.

### 7.2.4. Περιγραφή του μοντέλου αλατότητας

Οι μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την περιγραφή των πειραματικών δεδομένων της Ανοιξιάτικης (Α) καλλιέργειας κολοκυθιάς, προέκυψαν από όλη την καλλιεργητική περίοδο και για ένα ευρύ φάσμα εξωτερικών συγκεντρώσεων NaCl, και δίνονται στην υποενότητα 2.11. Επίσης στην υποενότητα 5.2.3 περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία για τον προσδιορισμό των μεταβλητών του μοντέλου, με σκοπό την προσομοίωση των συγκεντρώσεων  $\text{Na}^+$  ή  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον της ρίζας σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού. Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των παραμέτρων του

μοντέλου, οι θεωρητικά υπολογιζόμενες τιμές συγκρίθηκαν με αυτές που προέκυψαν από μετρήσεις σε καλλιέργειες κάτω από διαφορετικές συνθήκες ανάπτυξης (Φ-Χ καλλιέργεια). Για την στατιστική αξιολόγηση, υπολογίστηκαν οι συντελεστές προσδιορισμού ( $R^2$ ) της γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ εκτιμώμενων και μετρημένων τιμών που προέκυψαν από όλες τις μεταχειρίσεις.

### **7.2.5. Στατιστική επεξεργασία**

Το πειραματικό σχέδιο που εφαρμόστηκε και στα δύο πειράματα θερμοκηπίου ήταν το τυχαίοποιημένο σχέδιο πλήρων ομάδων. Εφαρμόστηκαν τέσσερις μεταχειρίσεις αλατότητας οι οποίες αντιστοιχούσαν σε τέσσερις διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl στο νερό άρδευσης (0,7, 3, 5 και 7 mM), οι οποίες τοποθετήθηκαν τυχαία σε τέσσερις διαφορετικές ομάδες. Ανάλυση διασποράς (Analysis of variance, ANOVA) των πειραματικών δεδομένων έγινε με το στατιστικό πακέτο SAS (Version 9.2, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) και τα γραφήματα σχεδιάστηκαν με τη βοήθεια του πακέτου GraphPad Prism (Version 5.0, GraphPad Software, San Diego California, USA). Ανάλυση παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή των πειραματικών δεδομένων.

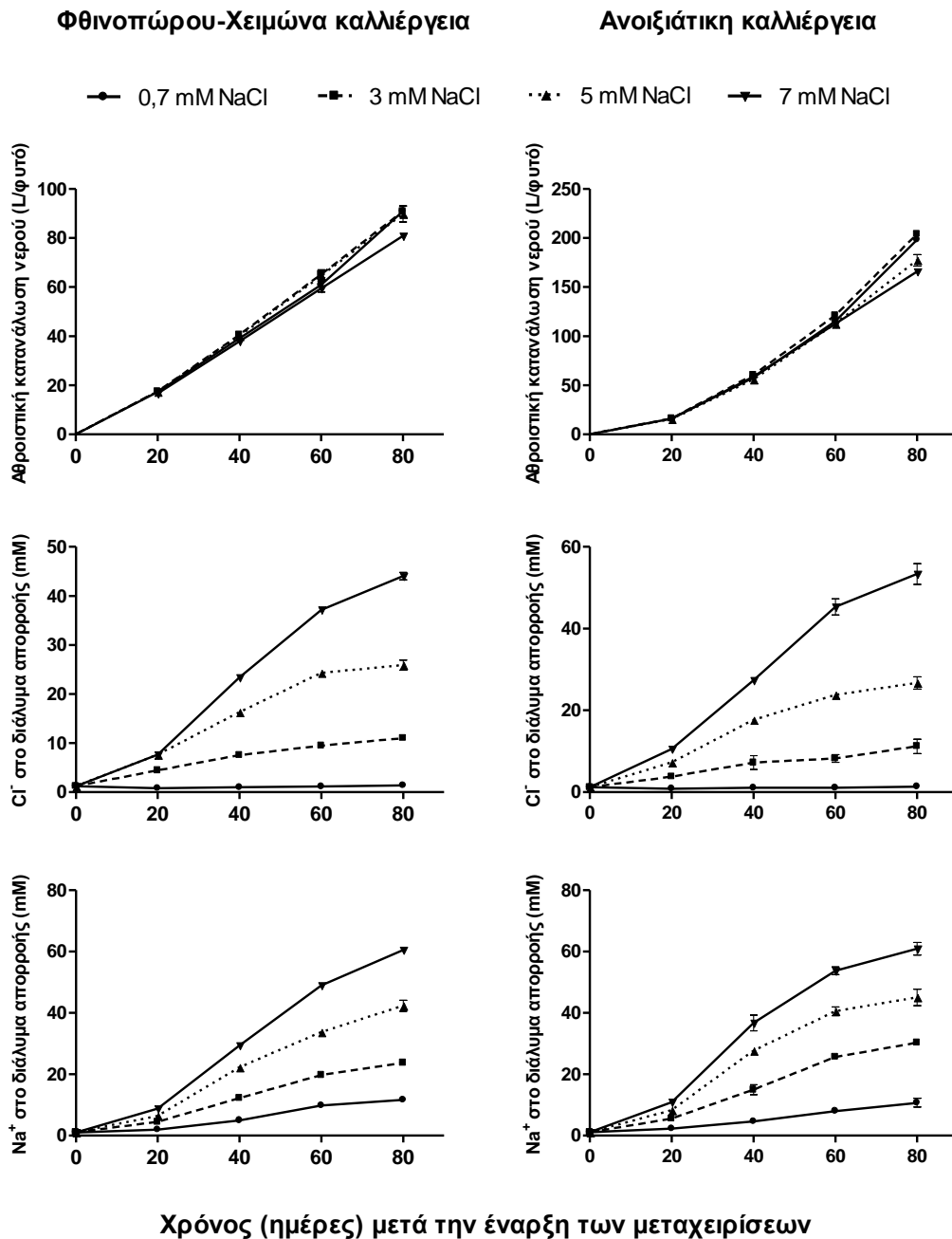
## **7.3. Αποτελέσματα**

### **7.3.1. Κατανάλωση νερού και συγκέντρωση αλάτων στο ριζόστρωμα**

Η συνεχής και πλήρης ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος στην καλλιέργεια Φθινοπώρου-Χειμώνα (Φ-Χ) είχε ως αποτέλεσμα τη διακύμανση της αθροιστικής κατανάλωσης νερού από τα φυτά μεταξύ 80-90 L/φυτό, ανάλογα με τη μεταχείριση αλατότητας. Η στατιστικά χαμηλότερη τιμή παρατηρήθηκε στην υψηλότερη συγκέντρωση αλατότητας (7 mM NaCl, Σχήμα 7.1). Στην Ανοιξιάτικη καλλιέργεια (Α), η κατανάλωση νερού από τα φυτά ήταν αρκετά μεγαλύτερη και κυμάνθηκε στο εύρος μεταξύ 166-200



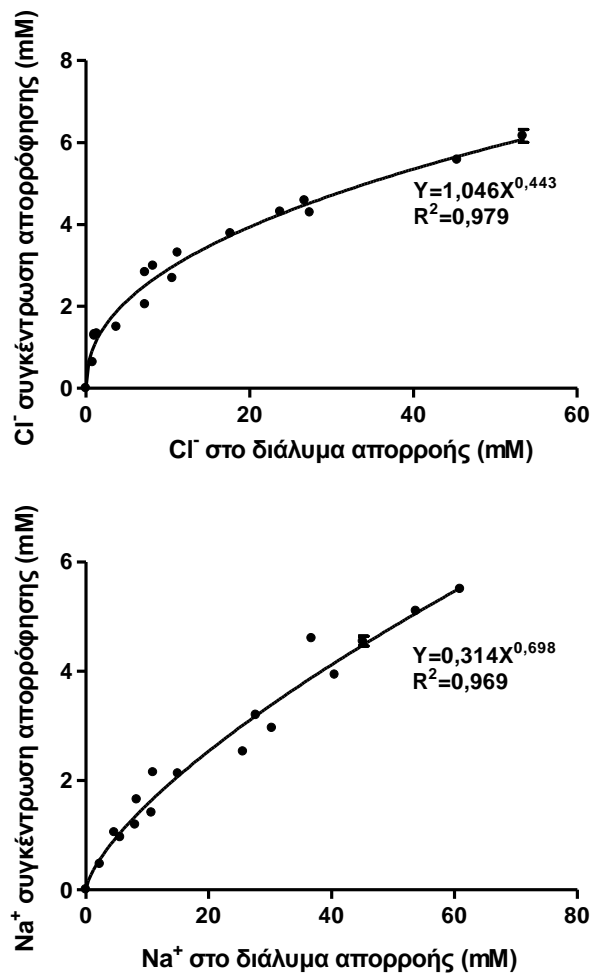
L/φυτό με τις χαμηλότερες τιμές να παρατηρούνται στις συγκεντρώσεις αλατότητας στο αρδευτικό νερό 5 και 7 mM NaCl (Σχήμα 7.1). Οι συγκεντρώσεις των ιόντων  $\text{Cl}^-$  και  $\text{Na}^+$  αυξήθηκαν βαθμιαία στο διάλυμα ριζοστρώματος σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ έδειξαν να σταθεροποιούνται, σε κάποια μέγιστα επίπεδα ανάλογα με τη μεταχείριση αλατότητας, προς το τέλος της καλλιέργειας (Σχήμα 7.1). Η ίδια πορεία μεταβολής των αλάτων παρατηρήθηκε σχεδόν σε όλες τις μεταχειρίσεις αλατότητας και για ολόκληρη την καλλιεργητική περίοδο της κολοκυθιάς, με διαφορετικούς όμως ρυθμούς συσσώρευσης ανάμεσα στις μεταχειρίσεις. Από τα πειραματικά δεδομένα των τριών μεταχειρίσεων αλατότητας (3, 5 και 7 mM NaCl), οι τελικές συγκεντρώσεις των ιόντων  $\text{Cl}^-$  που συσσωρεύτηκαν στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα κυμάνθηκαν μεταξύ 11 - 50 mM και αυτές του  $\text{Na}^+$  κυμάνθηκαν μεταξύ 25 - 60 mM. Στη μεταχείριση στην οποία δεν προστέθηκε επιπλέον ποσότητα NaCl στο αρδευτικό νερό (0,7 mM NaCl), τα ιόντα  $\text{Cl}^-$  και  $\text{Na}^+$  ions συσσωρεύτηκαν στο διάλυμα απορροής σε τελικές συγκεντρώσεις περίπου 1,5 mM και 10 mM, αντίστοιχα.



**Σχήμα 7.1.** Πορεία μεταβολής της αθροιστικής κατανάλωσης νερού, της συγκέντρωσης Cl<sup>-</sup> και Na<sup>+</sup> στο διάλυμα απορροφής σε συνάρτηση με το χρόνο (ημέρες μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων) σε κολοκυθιά καλλιεργούμενη σε κλειστό υδροπονικό σύστημα – NFT, όπως επηρεάστηκαν από διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl στο αρδευτικό νερό (0,7, 3, 5 και 7 mM NaCl) που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος σε δύο διαφορετικές εποχές καλλιέργειας (Φθινοπώρου-Χειμώνα/Φ-Χ και Άνοιξης/Α). Τα σύμβολα απεικονίζουν μέσες μετρημένες τιμές (n = 4) για το Cl<sup>-</sup> και το Na<sup>+</sup>. Οι κατακόρυφες μπάρες υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα του μέσου και μπορεί να είναι μικρότερες από τα σύμβολα.

### 7.3.2. Βαθμονόμηση και έλεγχος αξιοπιστίας του μοντέλου

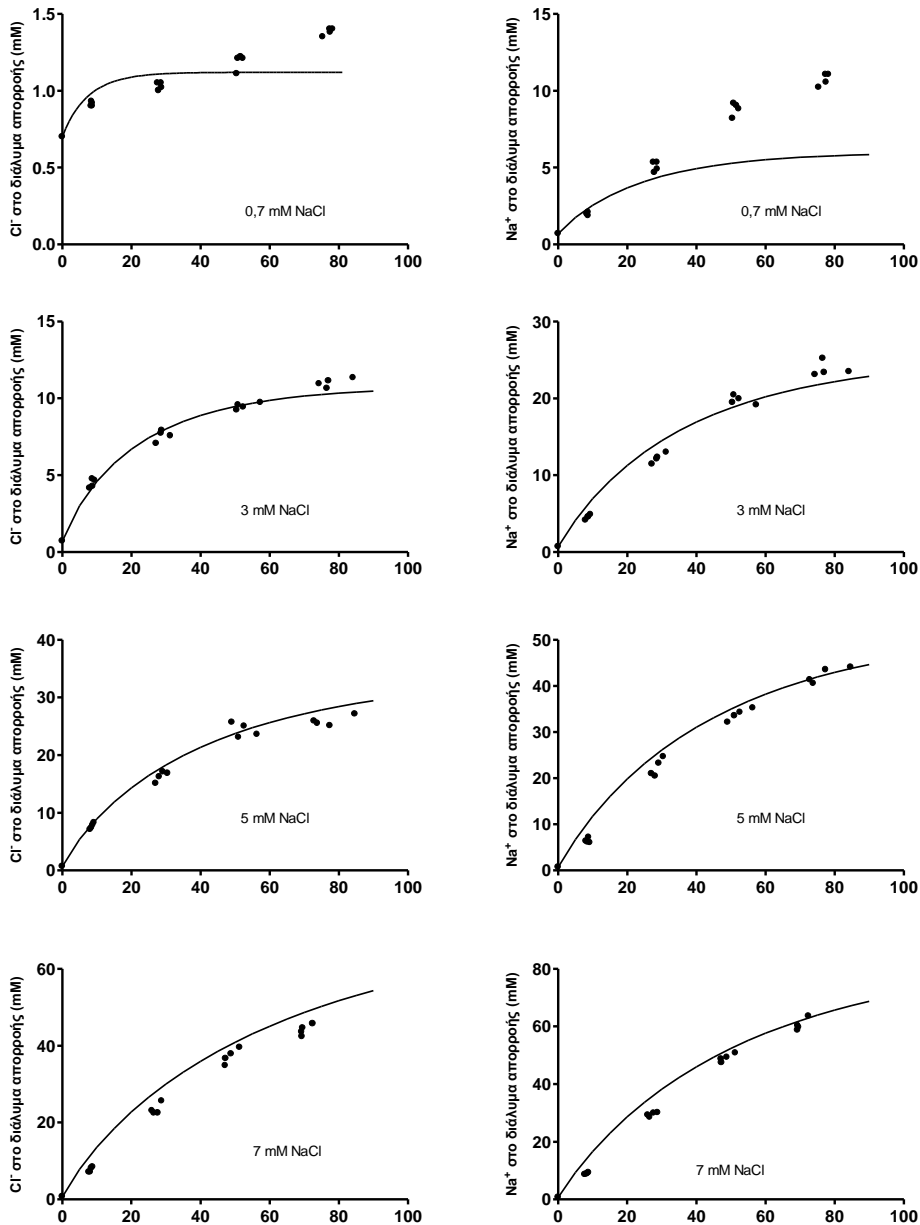
Το μοντέλο βαθμονομήθηκε με πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από την Ανοιξιάτικη (Α) καλλιέργεια κολοκυθιάς. Τα ζεύγη τιμών που χρησιμοποιήθηκαν, προέκυψαν από όλες τις μεταχειρίσεις αλατότητας και για όλη την περίοδο καλλιέργειας της κολοκυθιάς. Στα δεδομένα εφαρμόστηκε μη γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης θεωρώντας ότι η τομή (intercept) στη σχέση είναι μηδέν, χρησιμοποιώντας ως πρότυπες τις εξισώσεις, (1) και (2) (βλέπε υποενότητες 2.11 και 5.2.3). Ο συντελεστής προσδιορισμού ( $R^2$ ) που προέκυψε όταν τα δεδομένα είχαν περιγραφεί μέσω της εκθετικής εξίσωσης για το  $\text{Cl}^-$  και το  $\text{Na}^+$  ήταν 0,979 και 0,969, αντίστοιχα, ενώ ο συντελεστής προσδιορισμού ( $R^2$ ) της γραμμικής σχέσης ήταν 0,536 και 0,903, αντίστοιχα. Από τα πειράματα έχει αποδειχτεί (λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές προσδιορισμού), ότι η σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων του  $\text{Cl}^-$  και του  $\text{Na}^+$  στο περιβάλλον της ρίζας και των αντίστοιχων αναλογιών απορρόφησης  $\text{Cl}^-$  /νερό και  $\text{Na}^+$  /νερό μπορούν να περιγραφούν καλύτερα μέσω της εκθετικής εκδοχής της εξίσωσης. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1) ως πρότυπη, οι τιμές που προσδιορίστηκαν για την παράμετρο  $a$  για το  $\text{Cl}^-$  και το  $\text{Na}^+$  ήταν 1,046 και 0,314 και οι τιμές του  $b$  ήταν 0,443 και 0,698, αντίστοιχα (Σχήμα 7.2).



**Σχήμα 7.2.** Σχέση (η σχέση βασίζεται στο καλύτερο προσομοίωμα) που συνδέει τις συγκεντρώσεις  $\text{Cl}^-$  και  $\text{Na}^+$  στο διάλυμα απορροής και τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις απορρόφησης  $\text{Cl}^-$  και  $\text{Na}^+$  σε κλειστό υδροπονικό σύστημα – NFT, Ανοιξιάτικης (Α) καλλιέργειας κολοκυθιάς. Τα σύμβολα υποδηλώνουν μέσες μετρημένες τιμές ( $n = 4$ ) για το  $\text{Cl}^-$  και το  $\text{Na}^+$  για τέσσερα επίπεδα αλατότητας (0,7, 3, 5 και 7 mM NaCl) στο αρδευτικό νερό. Οι κατακόρυφες μπάρες υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα του μέσου και μπορεί να είναι μικρότερες από τα σύμβολα.

Η ακρίβεια στις προβλέψεις του μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.3. Οι καμπύλες στο Σχήμα 7.3 συμβολίζουν εκτιμώμενες τιμές χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους  $a$  και  $b$  στην εξίσωση (4) (βλέπε υποενότητα 5.2.3) για να επιλυθεί σύμφωνα με τον Savvas et al. (2005a, b, 2007), και να γίνει δυνατή η προσομοίωση των συγκεντρώσεων του  $\text{Na}^+$  και

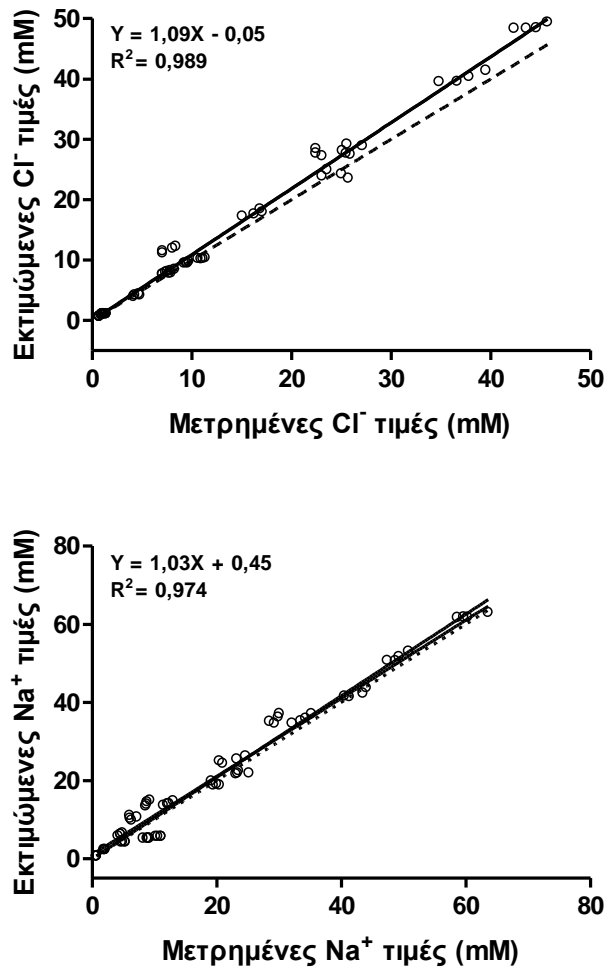
του  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον της ρίζας σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού από τα φυτά κολοκυθιάς. Ταυτόχρονα, τα σύμβολα στο Σχήμα 7.3 απεικονίζουν μετρημένες τιμές κατά τη διάρκεια του πειράματος Φθινοπώρου-Χειμώνα (Φ-Χ). Η βαθμονόμηση της εκθετικής εκδοχής του μοντέλου για το  $\text{Na}^+$  και το  $\text{Cl}^-$  έδωσε τη δυνατότητα να εκτιμηθούν με ικανοποιητική ακρίβεια οι μετρούμενες τιμές για ένα μεγάλο εύρος εξωτερικών συγκεντρώσεων  $\text{NaCl}$ , εντούτοις, μικρές αποκλίσεις παρατηρήθηκαν στη χαμηλή συγκέντρωση αλατότητας (0,7 mM  $\text{NaCl}$ ) στο αρδευτικό νερό (Σχήμα 7.3).



#### Αθροιστική κατανάλωση νερού (L/φυτό)

**Σχήμα 7.3.** Συγκεντρώσεις  $\text{Cl}^-$  και  $\text{Na}^+$  στο διάλυμα απορροφής σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού. Τα δεδομένα έχουν ληφθεί από καλλιέργεια κολοκυθιάς σε τελείως κλειστό υδροπονικό σύστημα – NFT, με διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl στο αρδευτικό νερό (0,7, 3, 5 και 7 mM) που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή θρεπτικού διαλύματος. Σε κάθε διάγραμμα, οι γραμμές συμβολίζουν εκτιμώμενες τιμές (από το μοντέλο) χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της Ανοιξιάτικης καλλιέργειας (Α), ενώ τα σύμβολα απεικονίζουν μετρημένες τιμές στην καλλιέργεια Φθινόπωρο-Χειμώνα (Φ-Χ).

Για τη στατιστική αξιολόγηση της δυνατότητας πρόβλεψης της εκθετικής μορφής του μοντέλου, οι εκτιμώμενες και μετρημένες τιμές χρησιμοποιήθηκαν (ως ζεύγη τιμών) σε γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης και τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ των δύο (η κλίση της ευθείας και οι συντελεστές παλινδρόμησης  $R^2$  πολύ κοντά στη μονάδα και για τα δύο ιόντα, Σχήμα 7.4).



**Σχήμα 7.4.** Σύγκριση μεταξύ θεωρητικά υπολογιζόμενων (εκτιμώμενες) τιμών και αυτών που προέκυψαν από μετρήσεις (μετρημένες) των συγκεντρώσεων του  $Cl^-$  και  $Na^+$  στο διάλυμα απορροής σε κλειστή υδροπονική-NFT καλλιέργεια κολοκυθιάς με τη χρήση αρδευτικού νερού με τέσσερις διαφορετικές συγκεντρώσεις  $NaCl$  (0,7, 3, 5 και 7 mM  $NaCl$ ). Η ευθεία γραμμή αντιπροσωπεύει τη γραμμική σχέση παλινδρόμησης μεταξύ εκτιμώμενων και μετρημένων τιμών, ενώ η διακεκομμένη γραμμή την ένα-προς-ένα σχέση (1:1 relationship) μεταξύ των δύο. Εξισώσεις και συντελεστές παλινδρόμησης απεικονίζονται.

### 7.3.3. Συγκεντρώσεις απορρόφησης των μακροστοιχείων N, P, K, Ca και Mg

Οι υπολογισμοί που βασίστηκαν στην απομάκρυνση θρεπτικών στοιχείων από το θρεπτικό διάλυμα και την ανάκτηση θρεπτικών στοιχείων από τη ξηρή βιομάζα ανά μονάδα όγκου καταναλισκόμενου νερού (μέσω της διαπνοής), έδειξαν ότι από την έκθεση των φυτών στην υψηλή συγκέντρωση NaCl, μεταβάλλονται ελαφρώς αλλά στατιστικά σημαντικά οι συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) των μακροστοιχείων N, K, Ca και Mg στην καλλιέργεια Φ-Χ. Εντούτοις, η διακύμανση της ΣΑ του P δεν ήταν στατιστικά σημαντική ανεξάρτητα από την εποχή καλλιέργειας. Η ΣΑ του N στις δύο καλλιέργειες, δηλ. της Άνοιξης και τη Φθινοπωρινό-Χειμερινή (Α και Φ-Χ), επηρεάστηκε αρνητικά στη μέτρια και την υψηλή συγκέντρωση άλατος στο νερό άρδευσης, ενώ για τα υπόλοιπα μακροστοιχεία η στατιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων δεν έδειξε περιορισμούς στις ΣΑ στην Ανοιξιάτικη (Α) καλλιέργεια. Από την άλλη, το στάδιο βλαστικής ανάπτυξης του φυτού είχε σημαντική επίδραση στην παραλλακτικότητα των ΣΑ των θρεπτικών στοιχείων. Τα αποτελέσματα προσδιορισμού των ΣΑ ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης, σε αδρές γραμμές κυμάνθηκαν στα ίδια περίπου επίπεδα στις δύο περιόδους καλλιέργειας (Α και Φ-Χ). Ειδικότερα, οι τιμές των ΣΑ που προσδιορίστηκαν στα αρχικά στάδια της καλλιέργειας για όλα τα μακροθρεπτικά, ήταν αυξημένες συγκρινόμενες με τις τιμές που προσδιορίστηκαν για τα κατοπινά στάδια, ανεξάρτητα της εποχής καλλιέργειας (Πίνακας 7.1). Η ΣΑ του N ήταν μεγαλύτερη στα αρχικά στάδια ενώ στη συνέχεια μειώθηκε σημαντικά με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη της καλλιέργειας, και στις δύο περιόδους ανάπτυξης (Πίνακας 7.1). Η πορεία μεταβολής της ΣΑ του P ήταν ανάλογη όπως προηγουμένως, αλλά γενικά κυμάνθηκε γύρω στο 1,1 mM (Πίνακας 7.1). Οι ΣΑ του K, Ca και Mg (Πίνακας 7.1), όπως και στην περίπτωση του N και του P, αντανakλούσαν τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δεδομένα του πειράματος, οι ΣΑ των μακροθρεπτικών που προσδιορίστηκαν στις δύο περιόδους καλλιέργειας, σε αδρές γραμμές



κυμάνθηκαν στα ίδια επίπεδα (Πίνακας 7.1). Η στατιστική ανάλυση έδειξε μικρό αριθμό αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μεταχειρίσεων και των ημερομηνιών δειγματοληψίας για ορισμένα από τα χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν. Εντούτοις, οι αλληλεπιδράσεις αυτές δεν παρουσιάζονται στους πίνακες καθώς δεν άλλαξαν τη σειρά των αποτελεσμάτων και μόνο τα αποτελέσματα των κύριων επεμβάσεων παρουσιάζονται.

**Πίνακας 7.1.** Συγκεντρώσεις απορρόφησης μακροστοιχείων ( $\text{mmol L}^{-1}$ ) από φυτά κολοκυθιάς καλλιεργούμενα σε υδροπονικό σύστημα NFT όπως επηρεάζονται από διάφορα επίπεδα αλατότητας στο αρδευτικό νερό (0,7, 3, 5 και 7 mM NaCl - Μεταχ.) κατά τη διάρκεια τεσσάρων διαδοχικών χρονικών διαστημάτων (διαχωρίζονται ως ημέρες μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων - HMEM) σε δύο διαφορετικές εποχές ανάπτυξης (Ανοιξιάτικη και Φθινοπώρου-Χειμώνα καλλιέργεια).

Μεταχ. (mM NaCl)	Ανοιξιάτικη καλλιέργεια					Φθινοπώρου-Χειμώνα καλλιέργεια				
	N†	P	K	Ca	Mg	N†	P	K	Ca	Mg
0,7	15,9a	1,15a	5,47a	3,48a	1,42a	15,5a	1,08a	5,92a	3,77a	1,67a
3,0	15,0b	1,14a	5,41a	3,43a	1,39a	15,0a	1,09a	5,86a	3,70a	1,65a
5,0	14,7bc	1,15a	5,46a	3,46a	1,40a	14,3b	1,09a	5,82ab	3,67ab	1,59ab
7,0	14,4c	1,14a	5,35a	3,43a	1,37a	13,8b	1,09a	5,75b	3,57b	1,52b
HMEM										
0-20	16,5a	1,35a	6,72a	4,18a	1,73a	16,3a	1,19a	6,10a	3,99a	1,86a
20-40	14,3c	1,09b	5,34b	3,23b	1,38b	14,6b	1,11b	5,85b	3,45b	1,65b
40-60	14,8b	1,07b	5,02c	3,20b	1,29c	13,9c	1,05c	5,72c	3,51b	1,48c
60-80	14,5bc	1,06b	4,62d	3,18b	1,18d	13,7c	0,98d	5,67c	3,25c	1,44c
M.O.	15,0A	1,15A	5,42B	3,45A	1,39B	14,6A	1,09B	5,83A	3,67A	1,61A
M × H	**	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	**	*	*	*	*

Σε κάθε καλλιέργεια, οι μέσοι των διαφορετικών μεταχειρίσεων ή της φάσης ανάπτυξης του φυτού ( $n = 4$ ), για κάθε χαρακτηριστικό, συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα έχουν στατιστικά σημαντική διαφορά σύμφωνα με το κριτήριο Duncan ( $P \leq 5\%$ ). Η σύγκριση των γενικών μέσων όρων (M.O.), η οποία συμβολίζεται με κεφαλαία γράμματα, ανάμεσα στις δύο καλλιέργειες για κάθε χαρακτηριστικό, έγινε με το T-test ( $P \leq 5\%$ ). ΜΣ, \* και \*\* δείχνουν μη σημαντικές ή σημαντικές διαφορές σε επίπεδο  $P \leq 5\%$ , και 1%, αντίστοιχα. † $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ .

#### 7.3.4. Περιεκτικότητα φυτικών ιστών σε θρεπτικά και μη-θρεπτικά στοιχεία

Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις  $\text{Cl}^-$  στους φυτικούς ιστούς μετρήθηκαν στους βλαστούς ακολούθως στις ρίζες και φύλλα, ενώ οι χαμηλότερες τιμές προσδιορίστηκαν στους καρπούς. Η συσσώρευση του  $\text{Na}^+$  ήταν πιο έντονη στις ρίζες και τους βλαστούς αλλά τα φυτά συγκέντρωσαν περισσότερο  $\text{Na}^+$  και λιγότερο  $\text{Cl}^-$  στις ρίζες από τους βλαστούς (Πίνακας 7.2). Στα φύλλα και τους καρπούς, τα φυτά κολοκυθιάς συσσώρευσαν σχετικά μικρές ποσότητες  $\text{Na}^+$  ακόμη και σε υψηλές εξωτερικές συγκεντρώσεις αλατότητας, ανεξάρτητα της εποχής ανάπτυξης (Πίνακας 7.2). Οι συγκεντρώσεις αζώτου (N) δεν επηρεάστηκαν από την αλατότητα στα φύλλα, ρίζες και καρπούς, αλλά μείωση παρατηρήθηκε στους βλαστούς. Επίσης, μείωση στις συγκεντρώσεις P και K παρατηρήθηκε στα φύλλα και τους βλαστούς λόγω αλατότητας, αλλά δεν ήταν πάντα σημαντικές και στις δύο περιόδους καλλιέργειας (A και Φ-X, Πίνακας 7.2). Στα άλλα φυτικά όργανα (δηλ. καρπούς και ρίζες) οι συγκεντρώσεις P και K δεν επηρεάστηκαν από την αλατότητα. Γενικά τα φυτά κολοκυθιάς έδειξαν παρόμοια επίπεδα συγκεντρώσεων Ca ή Mg στα φύλλα και τους βλαστούς σε όλα τα επίπεδα αλατότητας και για τις δύο εποχές καλλιέργειας (A και Φ-X), ενώ στις ρίζες παρατηρήθηκε μείωση. Αντίθετα, μικρή αύξηση μετρήθηκε στους καρπούς. Οι μέσες απόλυτες τιμές της συγκέντρωσης των μακροθρεπτικών στους φυτικούς ιστούς ήταν σε αδρές γραμμές παρόμοιες στις δύο καλλιεργητικές περιόδους, παρόλο που στα φυτά της περιόδου Φ-X παρατηρήθηκαν υψηλότερες συγκεντρώσεις K στους καρπούς αλλά χαμηλότερες στους βλαστούς και τις ρίζες σε σύγκριση με τα φυτά της περιόδου A (Πίνακας 7.2). Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δεδομένα, οι μέσες συγκεντρώσεις των N, P, K, Ca και Mg επί ξηρού βάρους ανήλθαν σε 44,6, 7,2, 46,7, 61,2 και 12,2 mg (g ξ.β.)<sup>-1</sup> στα φύλλα, 51,6, 10,9, 65,5, 4,68 και 4,2 mg (g ξ.β.)<sup>-1</sup> στους καρπούς, 27,1, 8,5, 93,2, 28,9 και 8,5 mg (g ξ.β.)<sup>-1</sup> στους βλαστούς και 39,3, 10,7, 30,8, 14,9 και 6,7 mg (g ξ.β.)<sup>-1</sup> στις ρίζες, αντίστοιχα.

**Πίνακας 7.2.** Συγκεντρώσεις μακροστοιχείων (N, P, K, Ca και Mg), χλωρίου (Cl) και νατρίου (Na) ως ποσοστά επί τοις εκατό του ξηρού βάρους (% ξ.β.) στα φύλλα, βλαστό, ρίζα και καρπό φυτών κολοκυθιάς καλλιεργούμενα σε κλειστό υδροπονικό σύστημα - NFT όπως επηρεάζονται από διάφορα επίπεδα αλατότητας στο αρδευτικό νερό (0,7, 3, 5 και 7 mM NaCl) σε δύο διαφορετικές εποχές καλλιέργειας (Φθινοπώρου-Χειμώνα και Ανοιξιάτικη καλλιέργεια) ως μέσες τιμές μετρήσεων σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Σε κάθε καλλιέργεια, οι μέσοι των διαφορετικών μεταχειρίσεων (n = 4) για κάθε χαρακτηριστικό συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα έχουν στατιστικά σημαντική διαφορά σύμφωνα με το κριτήριο Duncan ( $P \leq 5\%$ ). †Οργανικώς δεσμευμένο.

Φυτ. μέρη	NaCl (mM)	Φθινοπώρου-Χειμώνα καλλιέργεια							Ανοιξιάτικη καλλιέργεια						
		N†	P	K	Ca	Mg	Cl	Na	N†	P	K	Ca	Mg	Cl	Na
Φύλλα	0,7	4,52a	0,89a	5,48a	6,18a	1,21b	0,39c	0,09b	4,75a	0,69a	5,00a	6,02a	1,18a	0,39c	0,07b
	3	4,45a	0,81ab	5,29a	6,23a	1,32a	1,85b	0,11b	4,53a	0,62b	4,24b	6,05a	1,15a	0,70c	0,09b
	5	4,36a	0,79b	5,00a	6,12a	1,28ab	2,54a	0,13ab	4,47a	0,61b	3,95bc	6,17a	1,13a	2,00b	0,12ab
	7	4,28a	0,77b	5,12a	5,97a	1,27ab	2,68a	0,16a	4,38a	0,59b	3,28c	6,22a	1,25a	3,29a	0,14a
Βλαστός	0,7	2,64a	0,90a	8,81a	3,22a	0,92ab	2,53d	0,34c	3,22a	0,97a	10,6a	2,48b	0,74c	2,11c	0,19c
	3	2,65a	0,89a	8,73a	3,29a	0,98a	4,65c	0,53c	2,75b	0,83b	10,2a	2,67ab	0,84ab	5,07b	0,89bc
	5	2,49b	0,86a	8,67a	3,20a	0,86b	5,54b	1,41b	2,76b	0,80b	10,0a	2,86a	0,87a	6,89a	1,65ab
	7	2,53ab	0,84a	8,37a	2,75a	0,86b	6,22a	1,79a	2,68b	0,74b	9,25a	2,68ab	0,79bc	7,77a	2,45a
Ρίζα	0,7	3,85a	0,90a	2,36a	2,19a	0,84a	0,64d	1,46d	3,89a	1,22a	4,31a	1,25a	0,80a	1,07d	1,51c
	3	3,88a	0,97a	2,22a	1,61b	0,74b	1,90c	2,80c	3,89a	1,18a	3,36b	1,26a	0,59b	2,52c	2,57b
	5	3,90a	0,95a	2,34a	1,76b	0,63c	2,40b	3,23b	4,04a	1,21a	3,95ab	1,18a	0,60b	3,36b	2,72ab
	7	3,94a	0,96a	2,36a	1,49b	0,59c	2,95a	3,72a	4,05a	1,19a	3,74ab	1,24a	0,56b	4,31a	3,45a
Καρπός	0,7	5,56a	1,18a	7,38a	0,46c	0,46b	0,25c	0,07d	4,83a	0,99a	5,43a	0,34b	0,35a	0,35a	0,07b
	3	5,51a	1,22a	7,83a	0,55b	0,50a	0,36b	0,11c	4,72a	0,96a	5,42a	0,40a	0,35a	0,38a	0,09b
	5	5,43a	1,21a	7,51a	0,67a	0,49ab	0,42a	0,14b	4,81a	0,96a	5,74a	0,38ab	0,35a	0,42a	0,11ab
	7	5,60a	1,20a	7,61a	0,54bc	0,49ab	0,47a	0,18a	4,83a	1,00a	5,52a	0,41a	0,36a	0,42a	0,13a

### 7.3.5. Αύξηση, απόδοση, ποιότητα και ανταλλαγή αερίων κατά τη φωτοσύνθεση

Η υψηλή συγκέντρωση άλατος (δηλ. 7 mM NaCl) στο αρδευτικό νερό συνοδεύτηκε με σημαντικούς περιορισμούς στην συνολική παραγωγή ξηρής βιομάζας, τη συνολική καρπική απόδοση, την εμπορεύσιμη παραγωγή και το μέσο βάρος καρπού, ανεξαρτήτως εποχής ανάπτυξης των φυτών (Πίνακας 7.3). Το μέσο βάρος καρπού, περιορίστηκε επίσης από τη μέτρια αλατότητα (δηλ. 5 mM NaCl) στο πείραμα της Άνοιξης (Πίνακας 7.3). Από την άλλη, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του καρπού όπως η ξηρή ουσία (μ.ο. 6,0%), τα διαλυτά στερεά (μ.ο. 5,9 °Brix), το pH (μ.ο. 6,3), η ογκομετρούμενη οξύτητα (μ.ο. 0,1% citric acid), το ασκορβικό οξύ (AA, μ.ο. 1,1 mg AA [100 g v.β.]<sup>-1</sup>), οι ολικές φαινόλες (μ.ο. 0,32 mg Gallic Acid [g v.β.]<sup>-1</sup>), η συνολική αντιοξειδωτική ικανότητα εκτιμώμενη με τη δοκιμή αντιοξειδωτικής ισχύς αναγωγής σιδήρου (FRAP τιμές, μ.ο. 0,35 μmol AA [g v.β.]<sup>-1</sup>), και την ικανότητα εκκαθάρισης ελευθέρων ριζών (DPPH τιμές, μ.ο. 5,6 mg ισοδύναμα AA [100g v.β.]<sup>-1</sup>), η περιεκτικότητα σε νιτρικά (μ.ο. 450 mg NO<sub>3</sub> [kg v.β.]<sup>-1</sup>) και η συγκέντρωση των αναγωγικών σακχάρων (12,2 mg Glucose + Fructose [g v.β.]<sup>-1</sup>, λεπτομερή αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται) δεν διαφοροποιήθηκαν από τις μεταχειρίσεις αλατότητας ή την περίοδο καλλιέργειας. Εντούτοις, η αλατότητα επηρέασε ορισμένες μεταβλητές της ανταλλαγής αερίων κατά τη φωτοσύνθεση (Πίνακας 7.3). Ειδικότερα, αυξάνοντας την αλατότητα σε μέτριες και υψηλές συγκεντρώσεις (δηλ. 5 και 7 mM NaCl) προκάλεσε μείωση στον καθαρό ρυθμό αφομοίωσης του CO<sub>2</sub> και τη στοματική αγωγιμότητα (Πίνακας 7.3). Αυτό ήταν επίσης αλήθεια για το ρυθμό διαπνοής, αλλά μόνο για την υψηλή συγκέντρωση του άλατος. Από την άλλη, η συγκέντρωση CO<sub>2</sub> στους μεσοκυττάριους χώρους παρέμεινε αμετάβλητη από τις επεμβάσεις αλατότητας που μελετήθηκαν (Πίνακας 7.3).

**Πίνακας 7.3.** Παραγωγή ξηρής βιομάζας (ΞΒΜ, g/φυτό), ολική καρπική απόδοση (ΟΚΑ, g/φυτό), εμπορεύσιμη παραγωγή (ΕΜΠ, g/φυτό), μέσο βάρος καρπού (ΜΒΚ, g/καρπό), καθαρός ρυθμός αφομοίωσης CO<sub>2</sub> (Α, μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), στοματική αγωγιμότητα (g<sub>s</sub>, mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), CO<sub>2</sub> στους μεσοκυττάριους χώρους (C<sub>i</sub>, μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>), ρυθμός διαπνοής (E, mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), σε υδροπονική NFT καλλιέργεια κολοκυθιάς όπως επηρεάζονται από διάφορα επίπεδα αλατότητας στο αρδευτικό νερό (0,7, 3, 5 και 7 mM NaCl) σε δύο διαφορετικές εποχές καλλιέργειας (Φθινοπώρου-Χειμώνα/Φ-Χ και Ανοιξιάτικη/Α καλλιέργεια).

	ΞΒΜ	ΟΚΑ	ΕΜΠ	ΜΒΚ	Α	g <sub>s</sub>	C <sub>i</sub>	E
<b>Φ-Χ καλ/γεια</b>								
<b>(mM NaCl)</b>								
0,7	375a	1857a	1407a	170a	12,2a	0,533a	328a	6,39a
3	357a	1718ab	1279ab	166a	12,0ab	0,381ab	306a	5,22a
5	350a	1644ab	1279ab	163ab	10,9b	0,331b	306a	4,93ab
7	308b	1461b	1071b	153b	9,2b	0,234b	278a	3,57b
<b>Α καλ/γεια</b>								
<b>(mM NaCl)</b>								
0,7	960a	4537a	3902a	120a	12,7a	1,177a	349a	6,17a
3	932a	3956ab	3434ab	112ab	12,7a	0,908ab	346a	5,93a
5	824ab	3461ab	3140ab	102b	11,1b	0,780b	342a	5,74ab
7	662b	3145b	2671b	101b	10,7b	0,778b	336a	5,69b

Σε κάθε καλλιέργεια, οι μέσοι των διαφορετικών μεταχειρίσεων (n = 4) για κάθε χαρακτηριστικό συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα έχουν στατιστικά σημαντική διαφορά σύμφωνα με το κριτήριο Duncan (P ≤ 5%).



**Εικόνα 7.2.** Μονάδα παρασκευής και δοχεία συλλογής/συμπλήρωσης του θρεπτικού διαλύματος σε πειραματική καλλιέργεια κολοκυθιάς σε NFT.

#### 7.4. Συζήτηση

Η μείωση της κατανάλωσης νερού από τα φυτά κολοκυθιάς στην εργασία αυτή, λόγω της βαθμιαίας αύξησης της συγκέντρωσης αλατότητας στο περιβάλλον των ριζών, είναι γνωστή επίδραση της αλατότητας στα καλλιεργούμενα είδη (Munns, 2002). Η αρνητική επίδραση της αλατότητας στην απορρόφηση νερού συνοδεύτηκε με περιορισμούς στην αύξηση, ως παραγωγή ξηρής βιομάζας και καρπική απόδοση, σε συμφωνία με προηγούμενες αναφορές (π.χ. Munns, 2002). Εντούτοις, η μείωση της αύξησης ήταν εντονότερη από τη μείωση της κατανάλωσης νερού σε ορισμένες περιπτώσεις, το οποίο υποδηλώνει ότι η αλατότητα δεν επηρέασε στον ίδιο βαθμό διαπνοή και φωτοσύνθεση, υποδεικνύοντας σε μια άμεση επίδραση του NaCl στο μηχανισμό αφομοίωσης του άνθρακα. Πράγματι, οι μετρήσεις της ανταλλαγής αερίων κατά τη φωτοσύνθεση δηλ. καθαρός ρυθμός φωτοσύνθεσης, στοματική αγωγιμότητα, συγκέντρωση CO<sub>2</sub> στους μεσοκυττάριους χώρους και ρυθμός διαπνοής (Πίνακας 7.3), αποδεικνύουν ότι η παρατηρούμενη μείωση της αύξησης στην υψηλή συγκέντρωση αλατότητας δεν ήταν απλώς αποτέλεσμα περιορισμών στη λειτουργία των στομάτων στα φύλλα. Παρόμοιες συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> (C<sub>i</sub>) παρά τη σημαντική μείωση σε g<sub>s</sub> και E (Πίνακας 7.3), όπως παρατηρήθηκε στη μέση και υψηλή μεταχείριση αλατότητας, δείχνει μειωμένη αγωγιμότητα του μεσοφύλλου σε συνδυασμό με τη ρύθμιση του ανοίγματος των στοματικών πόρων (Flexas and Medrano, 2002, Parida and Das, 2005). Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι ο συνδυασμός στοματικών και μη στοματικών παραγόντων περιορίσει την αφομοίωση CO<sub>2</sub> από τα φυτά κολοκυθιάς σε συνθήκες αλατότητας. Επίσης, αυτά τα αποτελέσματα είναι σε ταύτιση με τα ευρήματα των Savvas et al. (2009), οι οποίοι βρήκαν να περιορίζεται ο ρυθμός αφομοίωσης του άνθρακα σε υδροπονική καλλιέργεια φυτών κολοκυθιάς σε αλατούχες συνθήκες, ως αποτέλεσμα αναστολής βιοχημικών διεργασιών σε επίπεδο χλωροπλαστών. Η φωτοσυνθετική δραστηριότητα έχει συχνά συσχετιστεί με τη παραγωγή βιομάζας και την καρπική απόδοση στα καλλιεργούμενα φυτά

(Ashraf and Harris, 2013) και η αναστολή της αύξησης που παρατηρείται σε πολλά φυτά ως αποτέλεσμα έκθεσης στην αλατότητα είναι συχνά αποτέλεσμα περιορισμού της φωτοσυνθετικής απόδοσης των φυτών (Rouphael et al., 2012). Από την άλλη, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του καρπού δεν διαφοροποιήθηκαν σημαντικά από την αλατότητα, το οποίο δείχνει ότι οι μεταβολίτες ήταν επαρκείς σε όλες τις περιπτώσεις ώστε να διατηρηθεί η ποιότητα στους καρπούς. Όντως, τα φυτά κολοκυθιάς διατήρησαν τα επίπεδα και τις αναλογίες των θρεπτικών στοιχείων σε όλους τους φυτικούς ιστούς (Πίνακας 7.2) ενώ ακόμη σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπέρασαν τα μέσα επίπεδα επάρκειας (Rouphael et al., 2004, Rouphael and Colla, 2009). Αυτό υποδηλώνει ότι οι μηχανισμοί απορρόφησης και μεταφοράς των θρεπτικών στοιχείων στα φυτά κολοκυθιάς δεν επηρεάστηκαν από την βαθμιαία αύξηση της αλατότητας στα επίπεδα που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία. Λαμβάνοντας επίσης υπόψη ότι πολλές εργασίες έχουν δείξει στο παρελθόν ότι σε αλατούχες συνθήκες ωσμωτικές, τοξικές και θρεπτικές επιδράσεις, συνδέονται κυρίως με τη μειωμένη απόδοση των φυτών (Orsini et al., 2013), μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στο παρόν, κυρίως ωσμωτικές ή/και τοξικές επιδράσεις συνδέονταν με τη μειωμένη αύξηση και απόδοση. Η επίδραση της αυξημένης αλατότητας στην κατανάλωση νερού έχει αναφερθεί προηγουμένως. Τα φυτά κολοκυθιάς, τα οποία θεωρούνται ότι είναι τυπικά φυτά που αποκλείουν το  $\text{Na}^+$  (Edelstein et al., 2011), πράγματι ήταν ικανά να συγκρατήσουν σημαντικές ποσότητες ιόντων  $\text{Na}^+$  στις ρίζες και τους βλαστούς, και με αυτό τον τρόπο μειώθηκε η μεταφορά τους στα φωτοσυνθετικά ενεργά φύλλα (Πίνακας 7.2) υπό συνθήκες αυξημένης εξωτερικής συγκέντρωσης  $\text{NaCl}$  (Tester and Davenport, 2003). Εντούτοις, η δυνατότητα των φυτών να αποκλείουν τα ιόντα  $\text{Cl}^-$  από τα φύλλα ήταν πολύ μικρή (τα χλωριόντα απορροφούνται ελεύθερα από τα φυτά κολοκυθιάς, Rouphael et al., 2006, Savvas et al., 2009) παρά μια μικρή συγκράτηση τους στους βλαστούς, δείχνοντας ότι το αρνητικό αποτέλεσμα στην απόδοση και τη φωτοσύνθεση των φυτών ήταν κυρίως συνυφασμένο με τη

συσσώρευση του  $\text{Cl}^-$  (Πίνακας 7.2) στα μεταβολικά ενεργά φύλλα, όπως άλλωστε αναφέρεται και σε προηγούμενες σχετικές εργασίες (Neocleous and Vasilakakis, 2007, Savvas et al., 2009). Πράγματι, ο ρυθμός μεταφοράς του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  στα φύλλα και η δυνατότητα διαμερισματοποίησης τους στα χυμοτόπια είναι στενά συνδεδεμένα με το βαθμό αντοχής των φυτών στην αλατότητα (Munns, 2002).

Τα αποτελέσματα έδειξαν μια βαθμιαία επιβράδυνση του ρυθμού συσσώρευσης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον της ρίζας των φυτών κολοκυθιάς στα τελευταία στάδια της καλλιέργειας (τις τελευταίες δύο δειγματοληψίες δηλ. 60 – 80 ημέρες μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων), ακολουθώντας νωρίτερα μια περίοδο έντονης συσσώρευσης (Σχήμα 7.1). Παρόμοια πορεία συσσώρευσης των αλάτων έχει αναφερθεί και σε άλλες καλλιέργειες (Varlagas et al., 2010) συμπεριλαμβανομένων των κολοκυνθοειδών αγγούρι και πεπόνι καλλιεργούμενα σε κλειστά υδροπονικά συστήματα (Savvas et al., 2005a, b, Neocleous and Savvas, 2016). Το συγκεκριμένο μοτίβο δείχνει ότι η σταδιακή εξισορρόπηση μεταξύ της συγκέντρωσης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  στο χρησιμοποιούμενο αρδευτικό νερό με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις απορρόφησης τους από τα φυτά (δηλ. τις αναλογίες απορρόφησης  $\text{Na}^+/\text{νερό}$  και  $\text{Cl}^-/\text{νερό}$ ), επιβραδύνουν και τελικά μηδενίζουν τους ρυθμούς συσσώρευσης των αλάτων στο διάλυμα ανακύκλωσης (Σχήμα 7.1). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.2, οι συγκεντρώσεις απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  αυξήθηκαν με την αύξηση των συγκεντρώσεών τους στο διάλυμα απορροής, και κατ' επέκταση στο περιβάλλον των ριζών. Εντούτοις, η αύξηση της συγκέντρωσης απορρόφησης του  $\text{Cl}^-$  ήταν εντονότερη αρχικά σύμφωνα με τη γενική διαπίστωση ότι το  $\text{Cl}^-$  είναι ένα στοιχείο το οποίο απορροφάται χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία από τα φυτά κολοκυθιάς και μεταφέρεται σε ολόκληρο το φυτό, ενώ, το  $\text{Na}^+$  κυρίως συγκρατείται στο κατώτερο μέρος του φυτού και τη ρίζα όπως επίσης έχει αναφερθεί από τον Edelstein et al. (2011).



Η σχέση που συνδέει τις εξωτερικές συγκεντρώσεις με τις συγκεντρώσεις απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  αποδείχτηκε ότι είναι εκθετικής μορφής του τύπου  $C_{xu} = aC_{xs}^b$ , (όπου  $C_{xu}$  = συγκεντρώσεις απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$ ,  $C_{xs}$  = συγκεντρώσεις του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  στο κλειστό σύστημα,  $a$  και  $b$  = παράμετροι του μοντέλου εξαρτώμενες από το καλλιεργούμενο είδος), όπως φαίνεται από τις πολύ υψηλές τιμές των συντελεστών προσδιορισμού ( $R^2$ , Σχήμα 7.2). Συνεπώς, από τα δεδομένα φαίνεται ότι σε πλήρως κλειστά υδροπονικά συστήματα καλλιέργειας κολοκυθιάς (cv. Anita F1) η σχέση μεταξύ της εξωτερικής και της συγκέντρωσης απορρόφησης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  μπορεί να περιγραφεί ακριβέστερα μέσω εκθετικής παρά γραμμικής εξίσωσης (Sonneveld et al., 1999). Στην εργασία αυτή, η βαθμονόμηση του μοντέλου βασίστηκε στα πειραματικά δεδομένα της Ανοιξιάτικης (Α) καλλιέργειας κολοκυθιάς, ενώ για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα μιας δεύτερης καλλιέργειας την περίοδο Φθινοπώρου-Χειμώνα (Φ-Χ), όπως προτείνεται στη βιβλιογραφία (Carmassi et al., 2005). Στην πραγματικότητα, η ανάπτυξη των μαθηματικών σχέσεων και βαθμονόμηση του μοντέλου έδωσε πολύ υψηλές τιμές συντελεστών προσδιορισμού ( $R^2$ ) τόσο για το  $\text{Cl}^-$  όσο και για το  $\text{Na}^+$  (Σχήμα 7.2), δίνοντας έτσι τη δυνατότητα χρήσης του προσομοιώματος για διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του μοντέλου, οι θεωρητικά υπολογιζόμενες τιμές (από το μοντέλο) συγκρίθηκαν με μετρημένες τιμές από καλλιέργεια κολοκυθιάς σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες (Φ-Χ, Σχήμα 7.3). Η γενική ικανότητα πρόβλεψης του μοντέλου αποδείχτηκε αρκετά ικανοποιητική, παρόλο που παρατηρήθηκαν αποκλίσεις σε ορισμένες περιπτώσεις (Σχήμα 7.3). Οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν στη χαμηλή συγκέντρωση  $\text{NaCl}$  στο αρδευτικό νερό (0,7 mM, Σχήμα 7.3) μπορούν να αποδοθούν στη χρησιμοποίηση των ίδιων σταθερών του μοντέλου  $a$  και  $b$ , για ένα μεγάλο εύρος εξωτερικών συγκεντρώσεων  $\text{NaCl}$  (Savvas et al., 2007). Εντούτοις, λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα όλων των μεταχειρίσεων, η κλίση της ευθύγραμμης συσχέτισης όπως και οι τιμές

των συντελεστών παλινδρόμησης ( $R^2$ ), μεταξύ εκτιμώμενων και μετρημένων τιμών, επιβεβαίωσε ότι η εκθετική εξίσωση ( $C_{xu} = aC_{xs}^b$ ) και οι παράμετροι του μοντέλου που προσδιορίστηκαν ( $a = 1,046$  και  $0,314$  και  $b = 0,443$  και  $0,698$ , για το  $Cl^-$  και το  $Na^+$ , αντίστοιχα) παρέχουν σημαντική ακρίβεια στις προβλέψεις για ένα ευρύ φάσμα εξωτερικών συγκεντρώσεων NaCl και για όλη τη διάρκεια καλλιέργειας της κολοκυθιάς (Σχήμα 7.4). Συνεπώς, το μοντέλο πρόβλεψης συσσώρευσης αλάτων το οποίο αναπτύχθηκε στην εργασία αυτή, διασφαλίζεται ότι είναι ένα αξιόπιστο εμπειρικό μοντέλο που μπορεί να εφαρμοστεί σε εμπορικές υδροπονικές καλλιέργειες κολοκυθιάς, με τη δυνατότητα να προβλέπει με αποδεκτή ακρίβεια τη συσσώρευση  $Na^+$  και  $Cl^-$  στο περιβάλλον της ρίζας σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού.

Ο προσδιορισμός των μέσων αναμενόμενων συγκεντρώσεων απορρόφησης (ΣΑ) για ένα συγκεκριμένο καλλιεργούμενο είδος είναι το πρώτο βήμα για την κατάρτιση θρεπτικών διαλυμάτων για κλειστά υδροπονικά συστήματα όπως επανειλημμένα έχει αναφερθεί. Στην παρούσα εργασία, τα φυτά στα πρώτα στάδια της καλλιέργειας είχαν αυξημένες ανάγκες σε θρεπτικά στοιχεία συγκριτικά με τις ανάγκες σε νερό, με αποτέλεσμα οι ΣΑ αρχικά να είναι αυξημένες σε σχέση με αυτές που εκτιμήθηκαν στα κατοπινά στάδια της καλλιέργειας. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι τα φυτά στην αρχή ενώ έχουν αυξημένες θρεπτικές ανάγκες λόγω του έντονου ρυθμού αύξησης (μεταβολισμού), ταυτόχρονα λόγω του μικρού τους μεγέθους η κατανάλωση του νερού είναι χαμηλή (Neocleous and Savvas, 2015). Είναι καλά γνωστό ότι σε αλατούχες συνθήκες το ιόντα  $Cl^-$  ανταγωνίζονται την πρόσληψη των  $NO_3^-$  ιόντων (Grattan and Grieve, 1999). Πράγματι, η ΣΑ (δηλ. η αναλογία απορρόφησης θρεπτικού στοιχείου προς νερό) του αζώτου N μειώθηκε με την αύξηση της αλατότητας στην παρούσα εργασία, υποδεικνύοντας την ανταγωνιστική επίδραση του  $Cl^-$  στην απορρόφηση του N. Εντούτοις, η επίδραση της αλατότητας στις ΣΑ των υπόλοιπων επιλεγμένων μακροθρεπτικών ήταν σχετικά μικρότερη (K, Ca και Mg, A καλλιέργεια), ή ανύπαρκτη (P),

υποδηλώνοντας ασθενέστερα φαινόμενα ανταγωνισμού μεταξύ του  $\text{Na}^+$  και της απορρόφησης των μακροκατιόντων. Η σχετική σταθερότητα στις ΣΑ σε ορισμένες περιπτώσεις, εντούτοις, δεν υποδηλώνει ότι δεν υπάρχουν μεταβολές στις ποσότητες των θρεπτικών στοιχείων που απορροφούνται για την παραγωγή φυτομάζας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ρυθμοί απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων και νερού επηρεάζονται με παρόμοιο τρόπο από τους κλιματικούς παράγοντες και έτσι οι χρονικές διακυμάνσεις της αναλογίας πρόσληψης στοιχείου προς νερό (ΣΑ) είναι πολύ μικρότερες από τις διακυμάνσεις που παρουσιάζουν ξεχωριστά οι ρυθμοί πρόσληψης τους (Magán et al., 2005, Thompson et al., 2013). Επομένως, οι μέσες ΣΑ των μακροστοιχείων που προσδιορίστηκαν στην παρούσα εργασία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατάστρωση θρεπτικών διαλυμάτων για κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιά κάτω από συνθήκες αλατότητας.

## **7.5. Συμπεράσματα**

Το εμπειρικό μοντέλο που βαθμονομήθηκε και αξιολογήθηκε σε καλλιέργεια κολοκυθιάς σε συστήματα με ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος, επιτυχώς προσομοίωσε τις συγκεντρώσεις  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον της ρίζας συσχετίζοντας τις με την αθροιστική κατανάλωση νερού από τα φυτά. Οι αναλογίες πρόσληψης των επιλεγμένων μακροστοιχείων (δηλ. N, P, K, Ca και Mg) και νερού (αναφέρονται ως συγκεντρώσεις απορρόφησης - ΣΑ), προσδιορίστηκαν σε συνθήκες βαθμιαίας αύξησης της αλατότητας στο περιβάλλον της ρίζας, με σκοπό την καλύτερη διαχείριση του σχήματος θρέψης της καλλιέργειας κάτω από αυτές τις συνθήκες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε συνθήκες υψηλής αλατότητας τα φυτά κολοκυθιάς συγκρατούν και συσσωρεύουν το  $\text{Na}^+$  στο κατώτερο μέρος του φυτού και τις ρίζες, ενώ το  $\text{Cl}^-$  ελεύθερα απορροφάται και μεταφέρεται μέσω του ρεύματος της διαπνοής σε ολόκληρο το φυτό επηρεάζοντας αρνητικά τις μεταβολικές διεργασίες. Εντούτοις, η φυτική αύξηση, η απόδοση, τα ποιοτικά

χαρακτηριστικά των καρπών και η ανταλλαγή αερίων κατά τη φωτοσύνθεση, υποδηλώνουν ότι αρδευτικά νερά με συγκέντρωση NaCl που δεν υπερβαίνει τα 3 mM, δεν αυξάνουν την αλατότητα στο ριζόστρωμα σε επιβλαβή επίπεδα για την καλλιέργεια και συνεπώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς.

Τα πιο πάνω αποτελέσματα (δηλ. μοντελοποίηση της χρήσης αλατούχου νερού σε συνδυασμό με την επιλογή της καλλιέργειας), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προώθηση διαχειριστικών πρακτικών που συμβάλλουν στην αποτελεσματικότερη χρήση νερού και λιπασμάτων στα θερμοκήπια χωρίς απώλειες στη γεωργική παραγωγή, σε περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από έλλειψη καλής ποιότητας νερού (Neocleous and Savvas, 2017).



**Εικόνα 7.3.** Ανάπτυξη και καρποφορία καλλιέργειας κολοκυθιάς σε σύστημα με συνεχή και πλήρη ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος υπό συνθήκες αλατότητας.

## **8. ΚΕΦΑΛΑΙΟ V. «Συσχέτιση συσσώρευσης Ca με την αθροιστική κατανάλωση νερού σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς, και οι επιδράσεις της στην απορρόφηση μακροθρεπτικών, την αύξηση, την παραγωγή, την ποιότητα και τη φωτοσύνθεση»**

### **8.1. Εισαγωγή**

Στα κλειστά υδροπονικά συστήματα όπου γίνεται συνεχής και πλήρης ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος, εκτός από τα άλατα του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$ , συχνά η συσσώρευση στο διάλυμα ανακύκλωσης ορισμένων δισθενών θρεπτικών στοιχείων όπως π.χ. το  $\text{Ca}^{2+}$ , μπορεί να οφείλεται σε αυξημένες συγκεντρώσεις στο νερό άρδευσης (βλέπε επίσης Κεφάλαιο I) που υπερβαίνουν τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις απορρόφησης (δηλ. την αναλογία απορρόφηση στοιχείου προς νερό, Sonneveld and Voogt, 2009) από τα φυτά. Ο λόγος είναι γιατί στα θερμά και ξηρά κλίματα της Μεσογειακής λεκάνης ο ρυθμός διαλυτοποίησης του εδαφικού ασβεστίου είναι αυξημένος με αποτέλεσμα όχι σπάνια αντίστοιχα υψηλές συγκεντρώσεις να παρατηρούνται στο εδαφικό νερό και κατ' επέκταση και στα αρδευτικά νερά (Σάββας, 2012, Neocleous and Savvas, 2013b). Έτσι αν δεν υπάρχει εναλλακτική πηγή νερού άρδευσης για την παρασκευή θρεπτικών διαλυμάτων, το πρόβλημα της συσσώρευσης υπερβολικών συγκεντρώσεων  $\text{Ca}^{2+}$  στο κλειστό σύστημα αντιμετωπίζεται, όπως και στην περίπτωση του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$ , με την περιοδική απόρριψη του θρεπτικού διαλύματος μειώνοντας την αποδοτικότητα χρήσης νερού και λιπασμάτων (Katsoulas et al., 2015). Επομένως η εφαρμογή των συστημάτων της κλειστής καλλιέργειας από τους καλλιεργητές θερμοκηπίων στην περιοχή της Μεσογείου, όπου τα νερά χαρακτηρίζονται από υψηλές συγκεντρώσεις  $\text{Na}^+$  αλλά και  $\text{Ca}^{2+}$  προϋποθέτει τη χρήση κατάλληλων μαθηματικών προσομοιωμάτων σε συστήματα υποστήριξης απόφασης (DSS) για την καλύτερη διαχείριση της καλλιέργειας. Σε πολλά είδη κηπευτικών όπως φασόλι, αγγούρι, πιπεριά και τομάτα

(βλέπε υποενότητα 2.11) όπως και για τις καλλιέργειες πεπονιάς και κολοκυθιάς (Κεφάλαια II και IV, Neocleous and Savvas, 2016, 2017) έχουν αναπτυχθεί και αξιολογηθεί εμπειρικά μοντέλα συσσώρευσης της αλατότητας σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια και έχει αποδειχτεί ότι οι σχέσεις αυτές είναι εκθετικής μορφής για τα ιόντα του νατρίου ( $\text{Na}^+$ ) και του χλωρίου ( $\text{Cl}^-$ ). Εντούτοις, στη βιβλιογραφία δεν υπάρχουν παρόμοιες πληροφορίες σχετικά με ανάπτυξη μαθηματικών προσομοιωμάτων για τη συσσώρευση  $\text{Ca}^{2+}$  σε κλειστά υδροπονικά συστήματα.

Η εκτός εδάφους καλλιέργεια κολοκυθιάς είναι ιδιαίτερα σημαντική στην περιοχή της Μεσογείου και φαίνεται να δίνει υψηλότερες αποδόσεις από τις καλλιέργειες στο έδαφος (Rouphael et al., 2004). Επίσης λόγω του μικρού μεγέθους και του σύντομου καλλιεργητικού κύκλου, το κολοκύθι μπορεί να καλλιεργηθεί εύκολα σε συστήματα υδροκαλλιέργειας τύπου NFT. Στα συστήματα αυτά η προσθήκη θρεπτικών στοιχείων και νερού γίνεται αυτοματοποιημένα (Savvas, 2002a, b) με την προσθήκη ενός θρεπτικού διαλύματος κατάλληλου για κλειστά συστήματα με βάση τις μέσες αναμενόμενες συγκεντρώσεις απορρόφησης (βλέπε υποενότητες 2.7 και 2.8), οι οποίες όμως θα πρέπει να αναπροσαρμόζονται με βάση τις ιδιαιτερότητες του κλίματος και της χημικής σύστασης του αρδευτικού νερού (Adams, 2002).

Με βάση τα πιο πάνω, στόχος της εργασίας ήταν η περιγραφή της μαθηματικής σχέσης που συνδέει τη συγκέντρωση του  $\text{Ca}^{2+}$  στο διάλυμα ριζοστρώματος και της αντίστοιχης αναλογίας απορρόφησης  $\text{Ca}^{2+}$ /νερό (συγκέντρωση απορρόφησης). Χρησιμοποιήθηκαν προηγούμενα καθορισμένες εξισώσεις που αναπτύχθηκαν για την περιγραφή της συσσώρευσης των αλάτων σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα (βλέπε υποενότητα 2.11 και Κεφάλαια II και IV). Επίσης μελετήθηκε πώς επηρεάζονται οι μέσες συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) των μακροθρεπτικών (δηλ. N, P, K, Ca και Mg) από τη σταδιακή συσσώρευση  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας στις Μεσογειακές κλιματικές

συνθήκες. Τέλος, μετρήθηκαν συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων στα φύλλα, παραγωγή βιομάζας, καρπική απόδοση, ποιότητα καρπών και φωτοσυνθετικές παράμετροι ως παράγοντες απόκρισης της καλλιέργειας.

## **8.2. Υλικά και Μέθοδοι**

### **8.2.1. Συνθήκες ανάπτυξης της καλλιέργειας**

Τα πειράματα διεξήχθησαν σε θερμοκήπιο του Ινστιτούτου Γεωργικών Ερευνών της Κύπρου όπως περιγράφεται στην υποενότητα 3.1. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε η ίδια ποικιλία κολοκυθιάς (*Cucurbita pepo* cv. Anita F<sub>1</sub>) όπως στο Κεφάλαιο IV, το ίδιο σύστημα καλλιέργειας και τεχνικής ανακύκλωσης του θρεπτικού διαλύματος όπως και ανάπτυξης του φυτικού υλικού. Η έναρξη των μεταχειρίσεων έγινε αμέσως μετά τη μεταφύτευση των νεαρών φυτών στα κανάλια υδροπονίας (10 φυτά/κανάλι) και διήρκεσε από τις 4 Απριλίου μέχρι τις 27 Ιουνίου 2016 (Άνοιξης-Καλοκαιριού/Α-Κ καλλιέργεια) που τερματίστηκε το πείραμα και από τις 14 Σεπτεμβρίου 2016 μέχρι τις 22 Δεκεμβρίου 2016 (Φθινοπώρου-Χειμώνα/Φ-Χ καλλιέργεια). Η διαχείριση του θρεπτικού διαλύματος βασιζόταν σε προγραμματισμένη προσθήκη θρεπτικών στοιχείων αντί της προσθήκης τους με βάση τη ρύθμιση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας - EC (βλέπε υποενότητες 2.8 και 3.2). Για το σκοπό αυτό, παρασκευαζόταν θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης ειδικό για κολοκύθι σε κλειστό υδροπονικό σύστημα, με τέσσερις διαφορετικές συγκεντρώσεις Ca<sup>2+</sup> ως πειραματικές επεμβάσεις (Πίνακας 8.1).

**Πίνακας 8.1.** Σύνθεση των θρεπτικών διαλυμάτων διαφορετικών μεταχειρίσεων  $\text{Ca}^{2+}$  στο πείραμα.

Παράμετρος	A	B	C	D
EC ( $\text{dS m}^{-1}$ )*	1,70	2,00	2,31	2,61
$\text{K}^+$ (mM)	6,00	6,00	6,00	6,00
$\text{Ca}^{2+}$ (mM)	1,50	3,00	4,50	6,00
$\text{Mg}^{2+}$ (mM)	2,10	2,10	2,10	2,10
$\text{NO}_3^-$ (mM)	10,50	11,50	12,50	13,50
$\text{NH}_4^+$ (mM)	1,10	1,10	1,10	1,10
$\text{SO}_4^{2-}$ (mM)	1,07	2,07	3,07	4,07
$\text{H}_2\text{PO}_4^-$ (mM)	1,25	1,25	1,25	1,25

Η συγκέντρωση των μικροστοιχείων, δηλ. Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo ήταν 10, 10, 5, 0,8, 30, 0,5,  $\mu\text{M}$ , αντίστοιχα, σε όλες τις μεταχειρίσεις θρεπτικών διαλυμάτων.\*EC, ηλεκτρική αγωγιμότητα (electrical conductivity).

Φυσιολογικές και αγρονομικές μετρήσεις έγιναν μόνο στο πρώτο πείραμα (A-K) ενώ το δεύτερο πείραμα (Φ-X) είχε σκοπό την αξιολόγηση της δυνατότητας του μοντέλου να προβλέπει με ικανοποιητική ακρίβεια τη συσσώρευση του  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας (πείραμα επαλήθευσης). Η συγκομιδή των καρπών γινόταν όταν οι καρποί αποκτούσαν εμπορεύσιμο μέγεθος ( $\geq 10$  cm) με τμήμα του ποδίσκου ενώ άρχισε και τερματίστηκε στις 28 Απριλίου 2016 και 27 Ιουνίου 2016 στο A-K πείραμα και 15 Οκτωβρίου 2016 και 22 Δεκεμβρίου 2016 στο Φ-X πείραμα, αντίστοιχα.



**Εικόνα 8.1.** Φυτά κολοκυθιάς δεμένα κατακόρυφα με σπάγκο σε καλλιέργεια NFT.



### 8.2.2. Περιγραφή του μοντέλου

Τα ιόντα  $\text{Ca}^{2+}$  στο διάλυμα ριζοστρώματος ακολούθησαν ένα παρόμοιο πρότυπο συσσώρευσης με αυτό που βρέθηκε για το  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς (σιγμοειδής αύξηση). Ως εκ τούτου, για την ανάπτυξη μαθηματικής σχέσης που συνδέει τη συγκέντρωση του  $\text{Ca}^{2+}$  στο διάλυμα ριζοστρώματος ( $C_{Cas}$ ) και της αντίστοιχης αναλογίας απορρόφησης  $\text{Ca}^{2+}$ /νερό από τα φυτά (συγκέντρωση απορρόφησης,  $C_{Cau}$ ), χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες μαθηματικές εξισώσεις που προτείνονται για την περιγραφή της συσσώρευσης της αλατότητας  $\text{NaCl}$  σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα κολοκυθιάς (Κεφάλαιο IV, Neocleous and Savvas, 2017), δηλ.  $C_{Cau} = aC_{Cas}^b$  (1) και  $C_{Cau} = mC_{Cas}$  (2). Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις αυτές και ακολουθώντας το ίδιο σκεπτικό όπως προηγουμένως, οι τιμές  $a$ ,  $b$  και  $m$  υπολογίστηκαν εφαρμόζοντας μη γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης στα δεδομένα της Α-Κ καλλιέργειας. Ακολούθως χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις (1) και (2) για να επιλυθούν οι αντίστοιχες διαφορικές εξισώσεις που συνδέουν τη συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας με την αθροιστική κατανάλωση νερού από τα φυτά όπως και στην περίπτωση του  $\text{NaCl}$  (βλέπε υποενότητες 2.11. και 5.2.3). Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των παραμέτρων  $a$ ,  $b$  και  $m$ , οι θεωρητικά υπολογιζόμενες (εκτιμώμενες) τιμές συγκρίθηκαν με αυτές που προέκυψαν από μετρήσεις σε καλλιέργειες κάτω από διαφορετικές συνθήκες ανάπτυξης (Φ-Χ καλλιέργεια). Για την στατιστική αξιολόγηση, υπολογίστηκαν οι συντελεστές παλινδρόμησης ( $R^2$ ) της εκθετικής και γραμμικής μορφής του μοντέλου και η δυαδική συσχέτιση (1:1 relationship) μεταξύ εκτιμώμενων και μετρημένων τιμών που προέκυψαν από όλες τις μεταχειρίσεις.

### 8.2.3. Δεδομένα και αναλύσεις

Δείγματα από το διάλυμα ανακύκλωσης και το διάλυμα συμπλήρωσης του θρεπτικού διαλύματος της κάθε υδροπονικής μονάδας, λαμβάνονταν στην αρχή και στο

τέλος ενός χρονοδιαστήματος 20 ημερών, δηλ., 0-20, 20-40, 40-60 και 60-80 ημέρες μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων (HMEM) και στα δύο πειράματα (επιπλέον δειγματοληψία έγινε 80-100 HMEM στο Φ-Χ πείραμα). Οι μέσες συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) των θρεπτικών στοιχείων (δηλ.  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $H_2PO_4^-$ ), υπολογίστηκαν με βάση την απομάκρυνση τους από το θρεπτικό διάλυμα ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην υποενότητα 3.5. Με βάση τη βιβλιογραφία, η απομάκρυνση των θρεπτικών στοιχείων από το θρεπτικό διάλυμα σε καλλιέργειες NFT, θεωρείται αξιόπιστη μέθοδος εκτίμησης της απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων από την καλλιέργεια (Pardossi et al., 2004, Neocleous and Savvas, 2015). Οι επιμέρους ΣΑ που υπολογίστηκαν χρησιμοποιήθηκαν ακολούθως για να υπολογιστούν οι μέσες ΣΑ των μακροθρεπτικών για ολόκληρη την καλλιεργητική περίοδο. Επίσης την ίδια περίοδο δειγματοληψίας με τα θρεπτικά διαλύματα συγκομίστηκαν ολόκληρα φυτά, τα οποία διαχωρίστηκαν σε φύλλα, βλαστούς, ρίζες και καρπούς, όπου προσδιορίστηκαν οι συγκεντρώσεις των μακροθρεπτικών N, P, K, Ca και Mg, με την αντίστοιχη μεθοδολογία που περιγράφεται στην υποενότητα 3.5.

#### **8.2.4. Μετρήσεις**

Οι μετρήσεις (A-K καλλιέργεια) έγιναν στα πιο πρόσφατα πλήρη αναπτυγμένα φύλλα από την κορυφή σε δύο τυχαία επιλεγμένα φυτά για κάθε επανάληψη δύο εβδομάδες πριν το τέλος του πειράματος και οι καρποί από κάθε πειραματική μονάδα μετρούνταν και ζυγίζονταν όταν αποκτούσαν εμπορεύσιμο μέγεθος (μεγαλύτερο των 10 cm). Σε οκτώ αντιπροσωπευτικούς καρπούς από κάθε μεταχείριση προσδιορίστηκαν ορισμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Η επίδραση της αυξημένης συγκέντρωσης  $Ca^{2+}$  των θρεπτικών διαλυμάτων (δηλ. 1,5, 3,0, 4,5 και 6,0 mM) στη φωτοσυνθετική δραστηριότητα των φυτών [δηλ. καθαρός ρυθμός φωτοσύνθεσης (A), στοματική αγωγιμότητα ( $g_s$ ), συγκέντρωση  $CO_2$  στους

μεσοκυττάρους χώρους (Ci), και ρυθμός διαπνοής (E)], παράμετροι χλωροφύλλης (φωτοχημική απόδοση του φωτοσυστήματος II, δείκτης Fv/Fm), ρυθμός μεταφοράς ηλεκτρονίων (ETR), υδατικές σχέσεις (υδατικό δυναμικό φύλλων,  $\Psi_w$ ), καρπική απόδοση (ολική, εμπορεύσιμη και μέσο βάρος καρπού) και ποιοτικά χαρακτηριστικά (διαλυτά στερεά, pH, ογκομετρούμενη οξύτητα, ξηρή ουσία, ασκορβικό οξύ, ολικές φαινολικές ουσίες, συνολική αντιοξειδωτική ικανότητα, αναγωγικά σάκχαρα, συγκέντρωση νιτρικών), αξιολογήθηκε όπως περιγράφεται αναλυτικά στη γενική μεθοδολογία στην υποενότητα 3.6 όπως και στις εργασίες Neocleous et al. (2014) και Neocleous and Savvas (2015). Η επίδραση της συγκέντρωσης  $Ca^{2+}$  στα θρεπτικά διαλύματα στην αύξηση των φυτών προσδιορίστηκε μετρώντας την παραγωγή ξηρού βάρους σε οκτώ φυτά για κάθε μεταχείριση στο τέλος των πειραμάτων, λαμβάνοντας υπόψη και όλα τα κλαδέματα μέχρι την ημερομηνία αυτή. Εμπορεύσιμοι θεωρήθηκαν οι καρποί με αποδεκτό χρώμα και ποιότητα και μη εμπορεύσιμοι οι ατελώς ή κακώς σχηματισμένοι.

Η μέση ημερήσια θερμοκρασία και σχετική υγρασία στο θερμοκήπιο διατηρήθηκε μεταξύ 15-30°C (μ.ο. 25,7°C στην καλλιέργεια A-K και 23,6°C στην καλλιέργεια Φ-X) και 60-80% (μ.ο. 66,5%), αντίστοιχα. Η ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία είχε μέσες τιμές 14,6 MJ m<sup>-2</sup> και 23,7 MJ m<sup>-2</sup> στο Φ-X και A-K πείραμα, αντίστοιχα.

#### **8.2.5. Στατιστική επεξεργασία**

Το πειραματικό σχέδιο που εφαρμόστηκε και στα δύο πειράματα θερμοκηπίου ήταν το τυχαίοποιημένο σχέδιο πλήρων ομάδων. Εφαρμόστηκαν τέσσερις μεταχειρίσεις θρεπτικών διαλυμάτων οι οποίες αντιστοιχούσαν σε τέσσερις διαφορετικές συγκεντρώσεις  $Ca^{2+}$  στο νερό άρδευσης (1,5, 3, 4,5 και 6 mM), οι οποίες τοποθετήθηκαν τυχαία σε τέσσερις διαφορετικές ομάδες. Ανάλυση διασποράς (Analysis of variance, ANOVA) των πειραματικών δεδομένων έγινε με το στατιστικό πακέτο SAS (Version 9.2, SAS Institute

Inc., Cary, NC, USA) και τα γραφήματα σχεδιάστηκαν με τη βοήθεια του πακέτου GraphPad Prism (Version 5.0, GraphPad Software, San Diego California, USA). Ανάλυση παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή των πειραματικών δεδομένων.

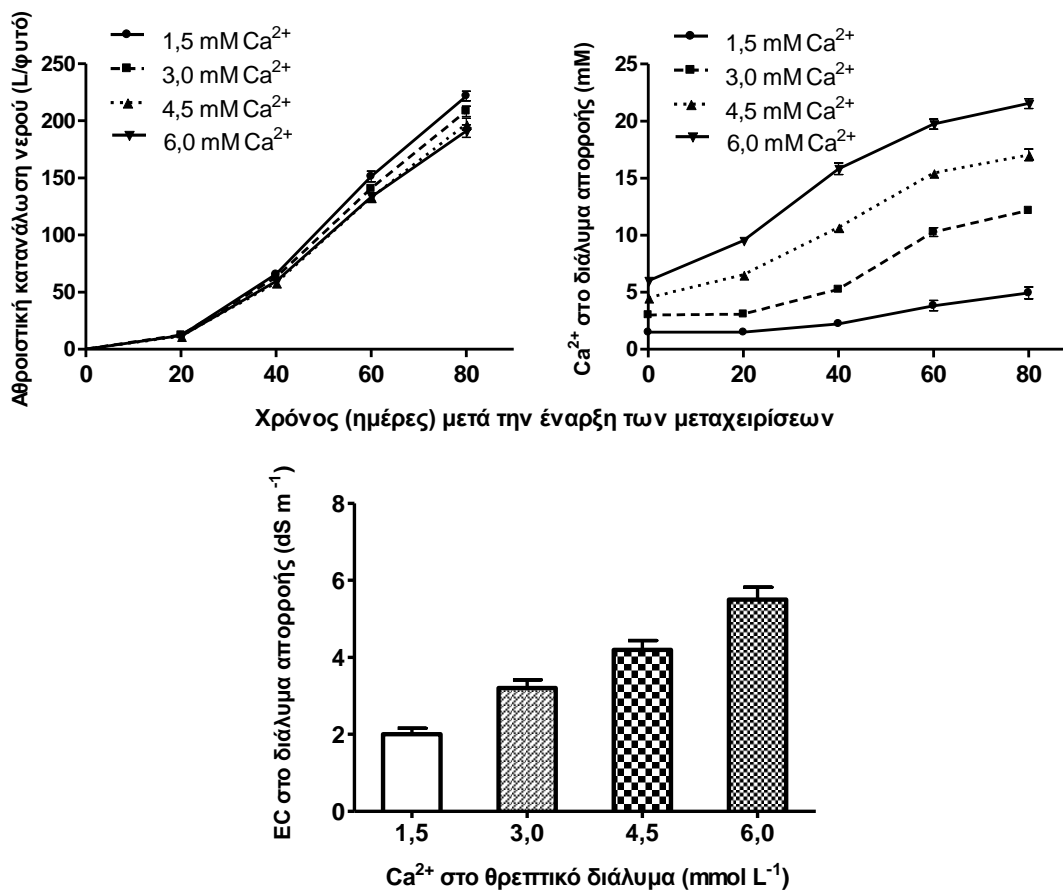
### 8.3. Αποτελέσματα

#### 8.3.1. Κατανάλωση νερού, συγκέντρωση $\text{Ca}^{2+}$ και ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)

Όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 8.1, η κατανάλωση νερού από τα φυτά μειώθηκε στις υψηλότερες συγκεντρώσεις  $\text{Ca}^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα (δηλ. 4,5 και 6 mM), ειδικότερα την τελευταία χρονική περίοδο δειγματοληψίας. Επίσης τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συγκεντρώσεις του  $\text{Ca}^{2+}$  στο διάλυμα απορροής, επομένως στο περιβάλλον της ρίζας, ακολουθούν μια σιγμοειδή καμπύλη αύξησης σε συνάρτηση με το χρόνο. Η ίδια πορεία μεταβολής (σιγμοειδής αύξηση) παρατηρήθηκε σχεδόν σε όλες τις μεταχειρίσεις  $\text{Ca}^{2+}$  κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου και ο ρυθμός συσσώρευσης του  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον των ριζών ενώ αρχικά ήταν αργός, στη συνέχεια έγινε εντονότερος μέχρι και την 60<sup>η</sup> ημέρα από την έναρξη της ανακύκλωσης (Σχήμα 8.1). Μετά την 60<sup>η</sup> ημέρα η περαιτέρω συσσώρευση του  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας μειώθηκε μέχρι που ελαχιστοποιήθηκε ώστε τελικά οι συγκεντρώσεις να τείνουν να σταθεροποιηθούν σε ορισμένα μέγιστα επίπεδα, ανάλογα με την πειραματική μεταχείριση. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις  $\text{Ca}^{2+}$  που παρατηρήθηκαν στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου ήταν περίπου 5, 12, 17 και 22 mM, για τις συγκεντρώσεις 1,5, 3, 4,5 και 6 mM  $\text{Ca}^{2+}$  αντίστοιχα (Σχήμα 8.1). Επίσης, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (electrical conductivity, EC) στο διάλυμα απορροής, επομένως στο περιβάλλον της ρίζας, σταδιακά αυξήθηκε με τη συνεχή ανακύκλωση και την εξέλιξη της καλλιέργειας (λεπτομερή αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται), όπου κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 1,7 – 3 dS m<sup>-1</sup> (1,5 mM  $\text{Ca}^{2+}$ ), 2,0 – 4,7

$\text{dS m}^{-1}$ , ( $3 \text{ mM Ca}^{2+}$ ),  $2,3 - 5,6 \text{ dS m}^{-1}$ , ( $4,5 \text{ mM Ca}^{2+}$ ) και  $2,6 - 7,2 \text{ dS m}^{-1}$ , ( $6 \text{ mM Ca}^{2+}$ ).

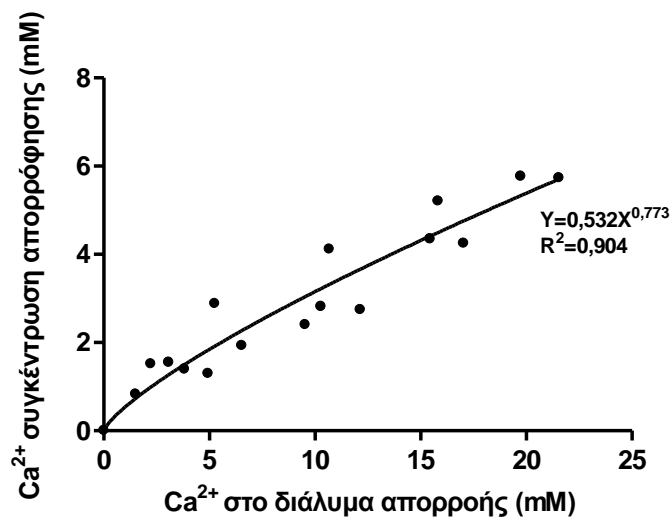
Αντίστοιχα, οι μέσες τιμές της EC παρουσιάζονται στο κάτω γράφημα στο Σχήμα 8.1.



**Σχήμα 8.1.** Πορεία μεταβολής της αθροιστικής κατανάλωσης νερού, της συγκέντρωσης  $\text{Ca}^{2+}$  στο διάλυμα απορροής σε συνάρτηση με το χρόνο (ημέρες μετά την έναρξη των μεταχειρίσεων) και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) στο διάλυμα απορροής κολοκυθιάς καλλιεργούμενης σε κλειστό υδροπονικό σύστημα – NFT, όπως επηρεάστηκαν από διαφορετικές συγκεντρώσεις  $\text{Ca}^{2+}$  στο αρδευτικό νερό (1,5, 3, 4,5 και 6 mM) που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή θρεπτικού διαλύματος την περίοδο της Άνοιξης-Καλοκαιριού (Α-Κ). Οι κατακόρυφες μπάρες υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα του μέσου τεσσάρων μετρήσεων ( $n = 4$ ) και μπορεί να είναι μικρότερες από τα σύμβολα.

### 8.3.2. Βαθμονόμηση και έλεγχος αξιοπιστίας του μοντέλου

Το μοντέλο βαθμονομήθηκε με πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από την καλλιέργεια κολοκυθιάς Άνοιξης-Καλοκαιριού (Α-Κ). Τα ζεύγη τιμών που χρησιμοποιήθηκαν, προέκυψαν από όλες τις πειραματικές μεταχειρίσεις  $\text{Ca}^{2+}$  (1,5, 3, 4,5 και 6 mM  $\text{Ca}^{2+}$ ) και για όλη την καλλιεργητική περίοδο. Στα δεδομένα εφαρμόστηκε μη γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης θεωρώντας ότι η τομή (intercept) στη σχέση είναι μηδέν (η απορρόφηση ασβεστίου από τα φυτά είναι μηδέν όταν η συγκέντρωση στη ρίζα είναι μηδέν), χρησιμοποιώντας ως πρότυπες τις εξισώσεις, (1) και (2). Ο συντελεστής προσδιορισμού ( $R^2$ ) που προέκυψε όταν τα δεδομένα είχαν περιγραφεί μέσω της εκθετικής εξίσωσης ήταν 0,904 ενώ ο συντελεστής προσδιορισμού ( $R^2$ ) της γραμμικής σχέσης ήταν 0,874. Τα αποτελέσματα έδειξαν (λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές προσδιορισμού), ότι η σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης του  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας και της αντίστοιχης αναλογίας απορρόφησης  $\text{Ca}^{2+}$ /νερό μπορεί να περιγραφεί καλύτερα μέσω της εκθετικής εκδοχής της εξίσωσης (Σχήμα 8.2).

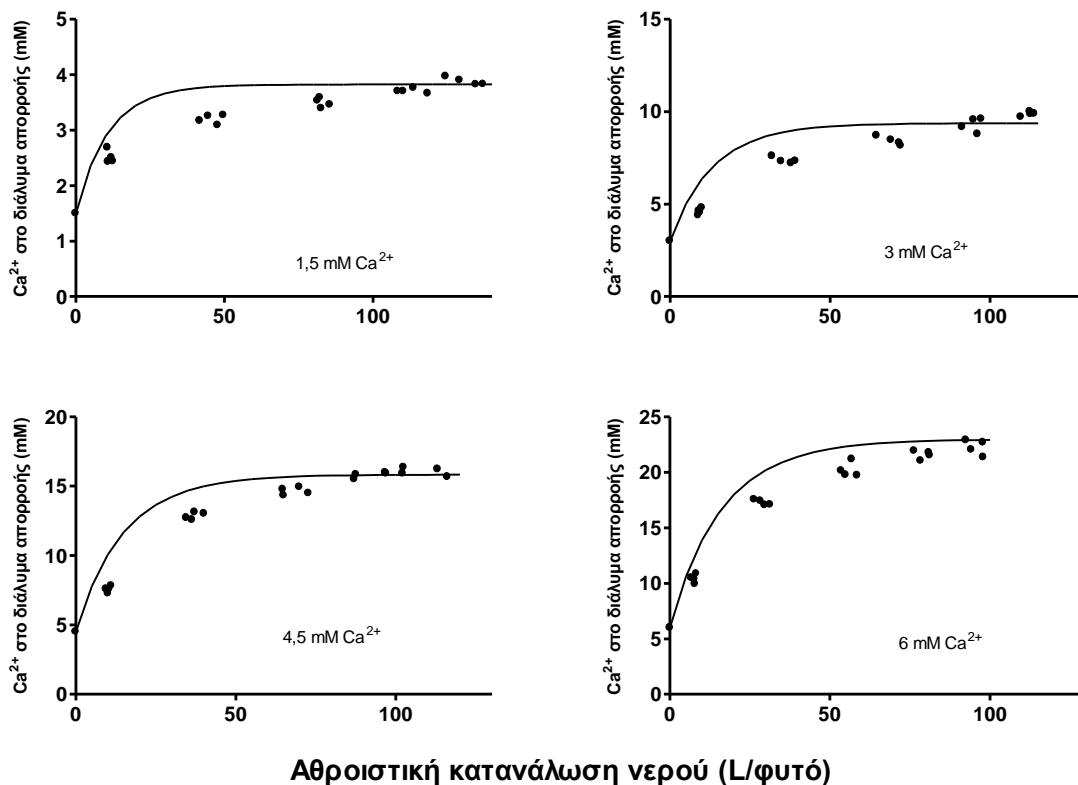


**Σχήμα 8.2.** Σχέση (η σχέση βασίζεται στο καλύτερο προσομοίωμα) που συνδέει τις συγκεντρώσεις  $\text{Ca}^{2+}$  στο διάλυμα απορρόφησης και τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις απορρόφησης  $\text{Ca}^{2+}$  σε κλειστό υδροπονικό σύστημα – NFT καλλιέργειας κολοκυθιάς την περίοδο της Άνοιξης-Καλοκαιριού (Α-Κ). Τα σύμβολα υποδηλώνουν μέσες μετρημένες τιμές ( $n = 4$ ) για τέσσερα διαφορετικά επίπεδα συγκέντρωσης  $\text{Ca}^{2+}$  (1,5, 3, 4,5 και 6 mM) στο αρδευτικό νερό. Οι κατακόρυφες μπάρες υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα του μέσου και μπορεί να είναι μικρότερες από τα σύμβολα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1) ως πρότυπη, η τιμή που προσδιορίστηκε για την παράμετρο  $a$  ήταν 0,532 και η τιμή του  $b$  ήταν 0,773. Στην πραγματικότητα, η βαθμονόμηση του μοντέλου έδωσε συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ ) με αρκετά υψηλή τιμή (Σχήμα 8.2), δίνοντας έτσι τη δυνατότητα χρήσης του για την εκτίμηση της συσσώρευσης  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς. Η ακρίβεια στις προβλέψεις του μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.3. Οι καμπύλες στο Σχήμα 8.3 συμβολίζουν εκτιμώμενες τιμές χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους  $a$  και  $b$  για την επίλυση της αντίστοιχης διαφορικής εξίσωσης, ακολουθώντας το ίδιο σκεπτικό, όπως στην περίπτωση του NaCl (βλέπε υποενότητες 2.11. και 5.2.3), ώστε να γίνει δυνατή η προσομοίωση των συγκεντρώσεων του  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού από τα φυτά κολοκυθιάς. Ταυτόχρονα, τα

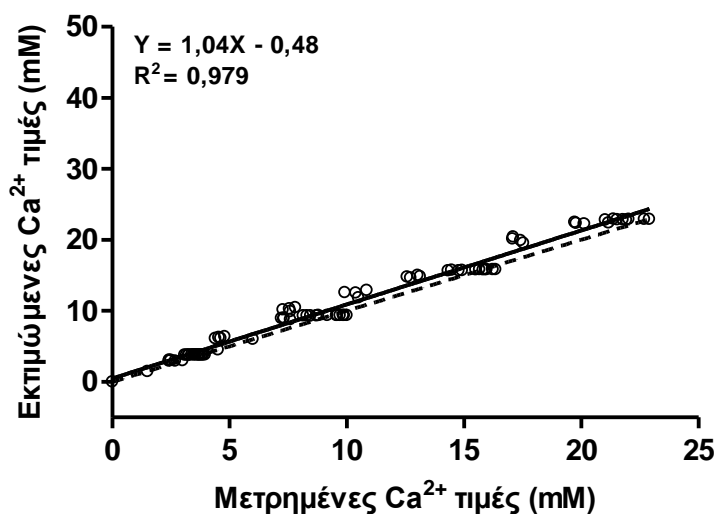
σύμβολα στο Σχήμα 8.3 απεικονίζουν μετρημένες τιμές κατά τη διάρκεια του πειράματος Φθινοπώρου-Χειμώνα (Φ-Χ). Από το Σχήμα 8.3 φαίνεται ότι η βαθμονόμηση της εκθετικής εκδοχής του μοντέλου για το  $\text{Ca}^{2+}$ , έδωσε τη δυνατότητα να εκτιμηθούν με ικανοποιητική ακρίβεια οι μετρούμενες τιμές για ένα μεγάλο εύρος εξωτερικών συγκεντρώσεων  $\text{Ca}^{2+}$  και διαφορετικές κλιματικές συνθήκες.





**Σχήμα 8.3.** Συγκεντρώσεις  $\text{Ca}^{2+}$  στο διάλυμα απορροής σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού. Τα δεδομένα έχουν ληφθεί από καλλιέργεια κολοκυθιάς σε τελείως κλειστό υδροπονικό σύστημα – NFT, με διαφορετικές συγκεντρώσεις  $\text{Ca}^{2+}$  στο αρδευτικό νερό (1,5, 3, 4,5 και 6 mM) που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή θρεπτικού διαλύματος συμπλήρωσης. Σε κάθε διάγραμμα, οι γραμμές συμβολίζουν εκτιμώμενες τιμές (από το μοντέλο) χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της Άνοιξης-Καλοκαιριού (Α-Κ), ενώ τα σύμβολα απεικονίζουν μετρημένες τιμές στην καλλιέργεια Φθινόπωρο-Χειμώνα (Φ-Χ).

Για τη στατιστική αξιολόγηση της δυνατότητας πρόβλεψης της εκθετικής μορφής του μοντέλου, οι εκτιμώμενες και μετρημένες τιμές χρησιμοποιήθηκαν (ως ζεύγη τιμών) σε γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης και τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ των δύο (η κλίση της ευθείας και ο συντελεστής παλινδρόμησης πολύ κοντά στη μονάδα, Σχήμα 8.4).

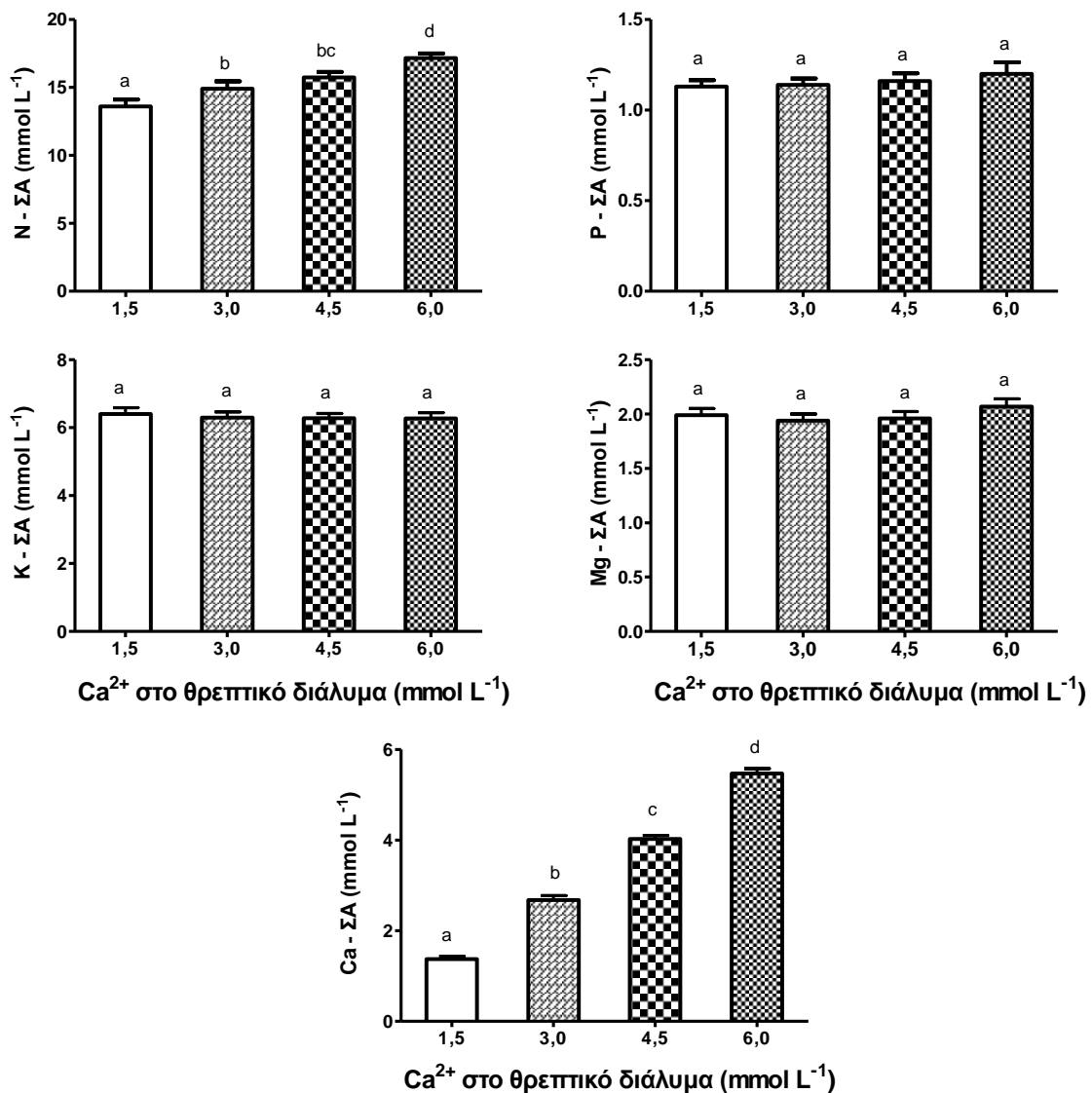


**Σχήμα 8.4.** Σύγκριση μεταξύ θεωρητικά υπολογιζόμενων (εκτιμώμενες) τιμών και αυτών που προέκυψαν από μετρήσεις (μετρημένες) των συγκεντρώσεων του Ca<sup>2+</sup> στο διάλυμα απορροής σε κλειστή υδροπονική-NFT καλλιέργεια κολοκυθιάς με τη χρήση αρδευτικού νερού με τέσσερις διαφορετικές συγκεντρώσεις Ca<sup>2+</sup> (1,5, 3, 4,5 και 6 mM). Η ευθεία γραμμή αντιπροσωπεύει τη γραμμική σχέση παλινδρόμησης μεταξύ εκτιμώμενων και μετρημένων τιμών, ενώ η διακεκομμένη γραμμή την ένα-προς-ένα σχέση (1:1 relationship) μεταξύ των δύο. Η εξίσωση της ευθείας και ο συντελεστής παλινδρόμησης απεικονίζονται.

### 8.3.3. Συγκεντρώσεις απορρόφησης των μακροστοιχείων N, P, K, Ca και Mg

Τα δεδομένα από τη χημική ανάλυση του θρεπτικού διαλύματος έδειξαν ότι η μέση συγκέντρωση απορρόφησης (ΣΑ) του αζώτου (N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) από τα φυτά ήταν μεγαλύτερη στη μεταχείριση με την υψηλότερη συγκέντρωση ασβεστίου (6 mM Ca<sup>2+</sup>) και μικρότερη στη μεταχείριση με τη χαμηλότερη συγκέντρωση ασβεστίου (1,5 mM Ca<sup>2+</sup>), αντικατοπτρίζοντας τη διαφορετική συγκέντρωση νιτρικού αζώτου (NO<sub>3</sub>-N) στις μεταχειρίσεις των θρεπτικών διαλυμάτων (Πίνακας 8.1, Σχήμα 8.5). Στις μεταχειρίσεις θρεπτικού διαλύματος 3,0 και 4,5 mM Ca<sup>2+</sup>, η ΣΑ του N κυμάνθηκε σε ενδιάμεσα επίπεδα από τις άλλες δύο μεταχειρίσεις και ήταν στατιστικά ίδια. Οι μέσες τιμές ΣΑ του P, K και Mg όπως υπολογίστηκαν με τα δεδομένα του θρεπτικού διαλύματος, δεν διαφοροποιήθηκαν

στατιστικά ανάμεσα στις μεταχειρίσεις  $\text{Ca}^{2+}$  που μελετήθηκαν, ακολουθώντας ουσιαστικά τα επίπεδα συγκέντρωσης στο χορηγούμενο θρεπτικό διάλυμα (Πίνακας 8.1, Σχήμα 8.5). Εντούτοις, όπως και στην περίπτωση του N, η μέση ΣΑ του Ca αυξήθηκε ακολουθώντας την αύξηση της συγκέντρωσης του  $\text{Ca}^{2+}$  στα πειραματικά θρεπτικά διαλύματα (Πίνακας 8.1), όπου όσο υψηλότερη ήταν η συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  στο χορηγούμενο θρεπτικό διάλυμα τόσο υψηλότερη ήταν η ΣΑ (Σχήμα 8.5). Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δεδομένα, οι μέσες ΣΑ (mM) του N (15,3), P (1,16), K (6,3), Ca (3,40) και Mg (2,0) είχαν μικρές διαφορές ανάμεσα στο βλαστικό και αναπαραγωγικό στάδιο (λεπτομερή στοιχεία δεν παρουσιάζονται), ενώ συγκλίνουν στις μέσες τιμές (ΣΑ) οι οποίες προσδιορίστηκαν σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς υπό συνθήκες αλατότητας NaCl (Κεφάλαιο IV, Neocleous and Sannas, 2017). Αξιοσημείωτο, οι ΣΑ του N και Ca εμφανίζονται σχετικά αυξημένες σε σχέση με τις τιμές που προσδιορίστηκαν για θερμοκήπια των χωρών της Βόρειας Ευρώπης.



**Σχήμα 8.5.** Μέσες τιμές συγκέντρωσης απορρόφησης (ΣΑ) μακροστοιχείων (N, P, K, Mg και Ca, mmol L<sup>-1</sup>) σε NFT καλλιέργειας κολοκυθιάς για όλη τη διάρκεια του πειράματος, όπως επηρεάζονται από τις μεταχειρίσεις θρεπτικών διαλυμάτων με διαφορετική συγκέντρωση Ca<sup>2+</sup> (1,5, 3, 4,5 και 6 mM, Πίνακας 8.1), την περίοδο της Άνοιξης-Καλοκαιριού (Α-Κ). Διαφορετικά γράμματα πάνω από τις στήλες των δεδομένων δείχνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μέσων τιμών (n = 4) σε επίπεδο σημαντικότητας P ≤ 5% σύμφωνα με το κριτήριο Duncan. Οι κατακόρυφες μπάρες υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα του μέσου.

#### 8.3.4. Συγκεντρώσεις μακροθρεπτικών στους φυτικούς ιστούς

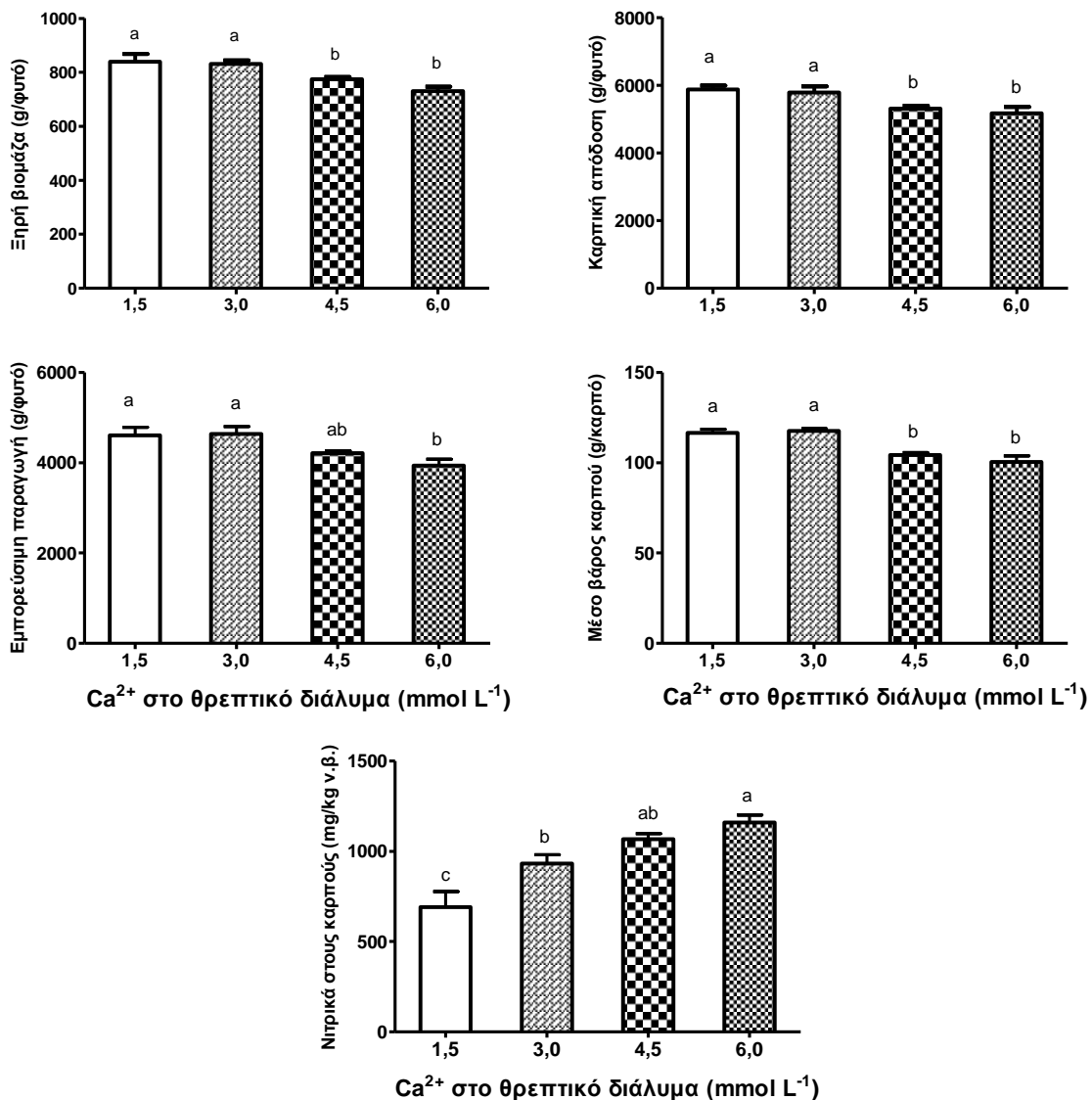
Η χημική ανάλυση των φυτικών ιστών έδειξε ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις Ca μετρήθηκαν στα φύλλα και ακολούθως στη ρίζα και στους βλαστούς, ενώ οι χαμηλότερες τιμές προσδιορίστηκαν στους καρπούς (Πίνακας 8.2). Επίσης η συγκέντρωση του Ca στα διάφορα φυτικά μέρη αυξήθηκε ακολουθώντας την αύξηση της συγκέντρωσης Ca στο θρεπτικό διάλυμα (Πίνακες 8.1 και 8.2). Η αύξηση στη συγκέντρωση αζώτου (N) στους φυτικούς ιστούς και ειδικότερα στα φύλλα και τους καρπούς, αντανakλούσε σε μικρότερο βαθμό την αύξηση της περιεκτικότητας του N στο θρεπτικό διάλυμα, ανάλογα με τη μεταχείριση  $Ca^{2+}$  (Πίνακες 8.1 και 8.2). Εντούτοις, οι συγκεντρώσεις P, K στα φύλλα μειώθηκαν στη μέση και υψηλή συγκέντρωση  $Ca^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας (δηλ. 4,5 και 6 mM), ενώ στην υψηλότερη συγκέντρωση  $Ca^{2+}$  το K μειώθηκε επίσης στο βλαστό (Πίνακας 8.2). Από τα θρεπτικά στοιχεία που προσδιορίστηκαν στους φυτικούς ιστούς το Mg δεν επηρεάστηκε σε καμιά περίπτωση από την αύξηση της συγκέντρωσης  $Ca^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας. Από τα δεδομένα του Πίνακα 8.2, οι μέσες συγκεντρώσεις των N, P, K, Ca και Mg ανήλθαν σε 49,9, 7,7, 65,0, 49,6 και 12,9 mg (g ξ.β.)<sup>-1</sup> στα φύλλα, 57,0, 12,5, 69,9, 6,4 και 5,2 mg (g ξ.β.)<sup>-1</sup> στους καρπούς, 31,2, 8,4, 87,4, 17,5 και 7,1 mg (g ξ.β.)<sup>-1</sup> στους βλαστούς και 36,9, 15,2, 48,2, 31,7 και 10,6 mg (g ξ.β.)<sup>-1</sup> στις ρίζες, αντίστοιχα.

**Πίνακας 8.2.** Συγκεντρώσεις μακροστοιχείων (N, P, K, Ca και Mg), ως ποσοστά επί τους εκατό του ξηρού βάρους (% ξ.β.), στα φύλλα (Φ), βλαστό (B), καρπό (K) και ρίζα (P) σε φυτά κολοκυθιάς καλλιεργούμενα σε κλειστό υδροπονικό σύστημα - NFT όπως επηρεάζονται από διάφορα επίπεδα συγκέντρωσης  $Ca^{2+}$  στο αρδευτικό νερό (1,5, 3, 4,5 και 6 mM) ως μέσες τιμές μετρήσεων σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Οι μέσοι των διαφορετικών μεταχειρίσεων (n = 4) για κάθε χαρακτηριστικό συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα έχουν στατιστικά σημαντική διαφορά σύμφωνα με το κριτήριο Duncan ( $P \leq 5\%$ ). †Οργανικώς δεσμευμένο.

Ca <sup>2+</sup> (mM)	N†				P				K				Ca				Mg			
	Φ	B	K	P	Φ	B	K	P	Φ	B	K	P	Φ	B	K	P	Φ	B	K	P
1,5	4,87b	2,89	5,46b	3,63ab	0,79a	0,93	1,29	1,42	7,12a	9,29a	7,06	4,81	3,33c	1,20c	0,44c	2,01c	1,38	0,73	0,55	1,02
3,0	4,96b	3,10	5,62ab	3,78ab	0,79a	0,88	1,26	1,56	6,87a	8,66ab	7,07	4,66	4,54b	1,46cb	0,59cb	3,09bc	1,34	0,71	0,53	1,15
4,5	4,99ab	3,18	5,82ab	3,90a	0,76b	0,85	1,24	1,54	6,05b	8,80ab	6,87	4,86	5,87a	1,97ab	0,72ab	3,23b	1,24	0,69	0,50	1,05
6,0	5,16a	3,33	5,92a	3,47b	0,73c	0,90	1,21	1,56	5,97b	8,21b	6,98	4,98	6,09a	2,35a	0,82a	4,36a	1,21	0,69	0,49	1,05

### 8.3.5. Αύξηση, απόδοση, ποιότητα και ανταλλαγή αερίων κατά τη φωτοσύνθεση

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.6, η μέση και υψηλή συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης (δηλ. 4,5 και 6 mM  $\text{Ca}^{2+}$ ) είχε ως αποτέλεσμα περιορισμούς στην ολική παραγωγή ξηρής βιομάζας από τα φυτά, τη συνολική καρπική απόδοση, την εμπορεύσιμη παραγωγή, όπως και στο μέσο βάρος του καρπού (Σχήμα 8.6). Επίσης η περιεκτικότητα των καρπών σε νιτρικά ιόντα αυξήθηκε ακολουθώντας την αύξηση της συγκέντρωσης  $\text{Ca}^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα και της συνοδευόμενης αύξησης των νιτρικών (Πίνακας 1, Σχήμα 8.6). Εντούτοις, οι διαφορές στη σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος δεν επηρέασαν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του καρπού που μετρήθηκαν όπως την ξηρή ουσία (μ.ο. 5,6%), τα διαλυτά στερεά (μ.ο. 5,4 °Brix), το pH (μ.ο. 6,3), την ογκομετρούμενη οξύτητα (μ.ο. 0,1% citric acid), το ασκορβικό οξύ (AA, μ.ο. 140 mg L<sup>-1</sup>), τις ολικές φαινόλες (μ.ο. 0.26 mg Gallic Acid [g ν.β.]<sup>-1</sup>), τη συνολική αντιοξειδωτική ικανότητα εκτιμώμενη με τη δοκιμή αντιοξειδωτικής ισχύς αναγωγής σιδήρου (FRAP τιμές, μ.ο. 0.30 μmol AA [g ν.β.]<sup>-1</sup>), και τη συγκέντρωση των αναγωγικών σακχάρων (13.3 mg Glucose + Fructose [g ν.β.]<sup>-1</sup>, λεπτομερή αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται).



**Σχήμα 8.6.** Παραγωγή βιομάζας ξηρού βάρους, καρπική απόδοση, εμπορεύσιμη παραγωγή, μέσο βάρος καρπού και περιεκτικότητα των καρπών σε νιτρικά, σε υδροπονικό σύστημα - NFT καλλιέργειας κολοκυθιάς, όπως επηρεάζονται από τις διαφορετικές μεταχειρίσεις θρεπτικών διαλυμάτων με διαφορετική συγκέντρωση Ca<sup>2+</sup> (1,5, 3, 4,5 και 6 mM, βλέπε Πίνακα 8.1), την περίοδο της Άνοιξης-Καλοκαιριού (Α-Κ). Διαφορετικά γράμματα πάνω από τις στήλες των δεδομένων δείχνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μέσων τιμών (n = 4) σε επίπεδο σημαντικότητας P ≤ 5% σύμφωνα με το κριτήριο Duncan. Οι κατακόρυφες μπάρες υποδηλώνουν το τυπικό σφάλμα του μέσου.



Εντούτοις, η συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα επηρέασε ορισμένες μεταβλητές της ανταλλαγής αερίων κατά τη φωτοσύνθεση. Ειδικότερα, στα φυτά που μεταχειρίστηκαν με την υψηλότερη συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  (δηλ. 6 mM  $\text{Ca}^{2+}$ ) παρατηρήθηκε σημαντική μείωση στον καθαρό ρυθμό αφομοίωσης του  $\text{CO}_2$  ( $A$ ,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) και τη στοματική αγωγιμότητα ( $g_s$ ,  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) (Πίνακας 8.3). Τα δεδομένα αυτά, συμφωνούν με τις παραμέτρους φωτοχημείας των φύλλων που μετρήθηκαν, όπως η φωτοχημική απόδοση του PS II (δείκτης  $F_v/F_m$ ), ο ρυθμός μεταφοράς ηλεκτρονίων (ETR,  $\mu\text{mol e}^- \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) αλλά και το υδατικό δυναμικό των φύλλων ( $\Psi_w$ , -MPa) όπου παρατηρήθηκαν επίσης σημαντικές μειώσεις στα πιο πάνω χαρακτηριστικά στη μεταχείριση θρεπτικού διαλύματος με την υψηλότερη συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  (Πίνακας 8.3). Ωστόσο, η μείωση του ρυθμού διαπνοής ( $E$ ,  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) όσο και η συγκέντρωση  $\text{CO}_2$  στους μεσοκυττάριους χώρους ( $C_i$ ,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ) δεν είχαν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις πειραματικές επεμβάσεις που μελετήθηκαν (Πίνακας 8.3).

**Πίνακας 8.3.** Καθαρός ρυθμός αφομοίωσης  $\text{CO}_2$  ( $A$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), στοματική αγωγιμότητα ( $g_s$ ,  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $\text{CO}_2$  στους μεσοκυττάριους χώρους ( $C_i$ ,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ), ρυθμός διαπνοής ( $E$ ,  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), φθορισμός χλωροφύλλης ( $F_v/F_m$ ), ρυθμός μεταφοράς ηλεκτρονίων (ETR,  $\mu\text{mol e}^- \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) και υδατικό δυναμικό φύλλων ( $\Psi_w$ , -MPa) όπως επηρεάζονται από διάφορα επίπεδα συγκέντρωσης  $\text{Ca}^{2+}$  στο αρδευτικό νερό (1,5, 3, 4,5 και 6 mM) σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς.

	A	$g_s$	$C_i$	E	$F_v/F_m$	ETR	$\Psi_w$
$\text{Ca}^{2+}$ (mM)							
1,5	21,3a	0,531a	279a	6,46a	0,81a	169a	1,29a
3,0	21,1a	0,514ab	278a	6,37a	0,80a	168a	1,47ab
4,5	19,9ab	0,458ab	278a	5,71a	0,79ab	165ab	1,65bc
6,0	19,3b	0,416b	273a	5,62a	0,77b	163b	1,95c

Οι μέσοι των διαφορετικών μεταχειρίσεων ( $n = 4$ ) για κάθε χαρακτηριστικό συνοδευόμενοι από διαφορετικά μικρά γράμματα έχουν στατιστικά σημαντική διαφορά σύμφωνα με το κριτήριο Duncan ( $P \leq 5\%$ ).

#### 8.4. Συζήτηση

Στην παρούσα εργασία οι μεταχειρίσεις του θρεπτικού διαλύματος με τις δύο υψηλότερες συγκεντρώσεις  $\text{Ca}^{2+}$  (δηλ. 4,5 και 6 mM) αύξησαν τις μέσες τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) στο περιβάλλον της ρίζας σε υψηλότερα επίπεδα (4,2 και 5,5  $\text{dS m}^{-1}$ , αντίστοιχα, Σχήμα 8.1) από τα επιθυμητά για την καλλιέργεια (Sonneveld and Straver, 1994, De Pascale et al., 2013), λόγω κυρίως της συσσώρευσης του  $\text{Ca}^{2+}$  στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα (Σχήμα 8.1). Αποτέλεσμα ήταν τα φυτά να εκτεθούν σε συνθήκες ωσμωτικής καταπόνησης (osmotic effect, De Pascale et al., 2013) με περιορισμούς στην κατανάλωση νερού (physiological drought, Σχήμα 8.1), τη συνολική παραγωγή ξηρής βιομάζας, την καρπική απόδοση και το μέσο βάρος των καρπών (Munns, 2002, Σχήμα 8.6). Σε πολλά είδη φυτών η μείωση του υδατικού δυναμικού των φύλλων ( $\Psi_w$ ) λόγω ωσμωτικών περιορισμών, έχει συσχετισθεί στο παρελθόν με τη μείωση της στοματικής αγωγιμότητας ( $g_s$ ), του φωτοσυνθετικού ρυθμού (A) και εντέλει της αύξησης του φυτού (Lawlor, 2002, Parida and Das, 2005). Πράγματι, στην εργασία αυτή το χαμηλότερο υδατικό δυναμικό των φύλλων ( $\Psi_w$ ) ήταν συνυφασμένο με φωτοσυνθετικούς περιορισμούς (A) ιδιαίτερα στην υψηλότερη συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα (Πίνακας 8.3). Εντούτοις, παρά τη σημαντική μείωση στη στοματική αγωγιμότητα των φύλλων ( $g_s$ ) μετρήθηκαν παρόμοιες συγκεντρώσεις  $\text{CO}_2$  στους μεσοκυττάριους χώρους (Ci), ενώ η μείωση του ρυθμού διαπνοής (E) δεν ήταν σημαντική (Πίνακας 8.3). Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η μείωση του ρυθμού φωτοσύνθεσης δεν ήταν απλά αποτέλεσμα περιορισμού του στοματικού ανοίγματος στα φύλλα αλλά υπήρξαν θέματα αναστολής βιοχημικών διεργασιών σε επίπεδο χλωροπλαστών (Flexas, et al., 2004, Sannas et al., 2009). Παρόλο που η απορρόφηση των μεταλλικών ιχνοστοιχείων (Fe, Mn, Zn, Cu) δεν αξιολογήθηκε στην παρούσα εργασία, η σημασία τους για την κανονική λειτουργία των φωτοσυστημάτων και της αλυσίδας μεταφοράς ηλεκτρονίων, ενδεχομένως να μπορούσε να περιοριστεί από φαινόμενα

ανταγωνισμού από δισθενή μακροστοιχεία όπως π.χ. στη συγκεκριμένη περίπτωση την υψηλή συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας (Σάββας, 2012). Επίσης, μειώθηκε η φωτοχημική απόδοση του φωτοσυστήματος II (δείκτης Fv/Fm) και ο ρυθμός μεταφοράς ηλεκτρονίων (ETR) στα φυτά κολοκυθιάς που μεταχειρίστηκαν με την υψηλότερη συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα (Πίνακας 8.3), γεγονός το οποίο ενισχύει την άποψη ότι πιθανότερο υπήρξαν φωτοσυνθετικοί περιορισμοί σε επίπεδο χλωροπλαστών (Sánchez-Rodríguez et al., 1997, Flexas et al., 1999). Συνοψίζοντας, η αρνητική επίδραση της αλατότητας στην απορρόφηση νερού, λόγω αυξημένης συγκέντρωσης μακροστοιχείων (δηλ.  $\text{Ca}^{2+}$ ) στο διάλυμα ανακύκλωσης, συνοδεύτηκε με περιορισμούς στη φωτοσυνθετική δραστηριότητα σε επίπεδο χλωροπλαστών, και εντέλει περιορισμούς στην παραγωγή φυτικής βιομάζας και την καρπική απόδοση (Ashraf and Harris, 2013). Από τα πιο πάνω αποτελέσματα, προκύπτει ότι η ευαισθησία στην αύξηση της EC πέρα από τα ανώτατα επιτρεπτά όρια στην κολοκυθιά, μπορεί να οφείλεται είτε στην αυξημένη συγκέντρωση NaCl στο διάλυμα (quality of salts), όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία από τους Savvas et al. (2009) αλλά και στο προηγούμενο Κεφάλαιο, είτε στην αυξημένη συγκέντρωση θρεπτικών μακροστοιχείων όπως στην παρούσα εργασία (quantity of salts).

Η απουσία δυσμενών επιπτώσεων της αύξησης της EC στο διάλυμα ανακύκλωσης στη μεταχείριση θρεπτικού διαλύματος 3,0 mM  $\text{Ca}^{2+}$  συγκρινόμενη με τη μεταχείριση μάρτυρα (1,5 mM  $\text{Ca}^{2+}$ ), στην αύξηση και απόδοση των φυτών, μπορεί να αποδοθεί (i) στη μικρότερη αύξηση της EC (μέση τιμή EC 3,2 dS m<sup>-1</sup>) σε σχέση με το μάρτυρα (μέση τιμή EC 2.0 dS m<sup>-1</sup>, Σχήμα 8.1), (ii) από το γεγονός ότι δεν έγινε απότομα αλλά βαθμιαία (δυνατότητα ωσμωρύθμισης, Savvas et al., 2005, Bar-Yosef, 2008) και (iii) σε συνδυασμό με τη δυνατότητα του ασβεστίου να ενισχύει την υδραυλική αγωγιμότητα της ρίζας (υδατοπορίνες, Silber and Bar-Tal, 2008). Για την αγγουριά όπου προτείνονται παρόμοιες τιμές EC στο διάλυμα τροφοδοσίας και ριζοστρώματος όπως στην κολοκυθιά (Sonneveld and Straver,

1994), τιμές EC μεταξύ 1,4-3,0 dS m<sup>-1</sup> δεν φαίνεται να διαφοροποιούνται σημαντικά ως προς την επίδραση τους στην παραγωγή (Adams, 2002), ενώ οι Roupael et al. (2006) και Bar-Yosef (2008) αναφέρουν τιμές-κατώφλι αλατότητας για το κολοκύθι και το αγγούρι (threshold EC values) γύρω στο 4 dS m<sup>-1</sup> όταν ο χρόνος έκθεσης στην αλατότητα είναι σχετικά μικρός.

Μια μικρή αύξηση της ολικής συγκέντρωσης των αλάτων (EC) στη ρίζα των φυτών (NaCl enriched solution) πάνω από τα επιθυμητά επίπεδα για την καλλιέργεια έχει βρεθεί σε προηγούμενες εργασίες ότι μπορεί να βελτιώσει ορισμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά των καρπών σε πολλά είδη κηπευτικών (Adams, 2002, Silber and Bar-Tal, 2008, Sonneveld and Voogt, 2009) όπως και στην κολοκυθιά (Roupael et al., 2006). Εντούτοις, στην παρούσα εργασία η συσσώρευση Ca<sup>2+</sup> στο θρεπτικό διάλυμα ανακύκλωσης και η αύξηση της αλατότητας στο διάλυμα ανακύκλωσης (nutrient induced EC), δεν επηρέασε τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που μελετήθηκαν, υποδηλώνοντας ότι υπήρχε μεταβολική επάρκεια για τη διατήρηση της ποιότητας σε όλες τις περιπτώσεις. Σε αυτά τα πλαίσια, αναφέρεται από τους Schnitzel and Gruda (2002) ότι οι περιβαλλοντικές συνθήκες έδειξαν να έχουν σημαντικότερο ρόλο στην παραγωγή και την ποιότητα σε καλλιέργεια NFT πεπονιού σε σχέση με μικρές διαφοροποιήσεις στη σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος. Αξιοσημείωτο, παρόλο που το κολοκύθι δεν συγκεντρώνει μεγάλες ποσότητες νιτρικών στους καρπούς (Gianquinto et al., 2013), μειονέκτημα μπορεί να θεωρηθεί η αύξηση της περιεκτικότητας των καρπών σε νιτρικά, αυξανόμενη της εξωτερικής συγκέντρωσης Ca<sup>2+</sup>, λόγω της συνεπακόλουθης αύξησης της συγκέντρωσης νιτρικών για τη διατήρηση της ισορροπίας κατιόντων-ανιόντων στα πειραματικά θρεπτικά διαλύματα (Πίνακας 8.1, Σχήμα 8.6).

Ο ρυθμός συσσώρευσης του Ca<sup>2+</sup> στο περιβάλλον των ριζών αρχικά ήταν αργός, στη συνέχεια έγινε περισσότερο έντονος αλλά προς το τέλος της καλλιέργειας ελαχιστοποιήθηκε με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις των ιόντων Ca<sup>2+</sup> να τείνουν να σταθεροποιηθούν σε κάποια

μέγιστα επίπεδα, ανάλογα με τη μεταχείριση θρεπτικού διαλύματος (Σχήμα 8.1). Το πρότυπο αυτό της σταδιακής συσσώρευσης των ιόντων του  $\text{Ca}^{2+}$  σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα είναι πανομοιότυπο με την πορεία συσσώρευσης του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{Cl}^-$  σε κλειστά υδροπονικά συστήματα όπως έχει αναφερθεί σε αρκετά φυτά θερμοκηπίου, όπως ανθοκομικά (Sonneveld et al., 1999) και λαχανοκομικά είδη (Savvas et al., 2005, Varlagas et al., 2010, Neocleous and Savvas, 2016), καθώς επίσης και στο κολοκύθι όπως περιγράφεται στην παρούσα διατριβή στο Κεφάλαιο IV (Neocleous and Savvas, 2017). Το συγκεκριμένο μοτίβο συσσώρευσης δείχνει ότι όταν οι συγκεντρώσεις ορισμένων ιόντων αυξάνονται στο περιβάλλον των ριζών (π.χ.  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ), αυξάνεται και η συγκέντρωση απορρόφησης τους από τα φυτά (δηλ. η αναλογία απορρόφησης ιόντος/νερό, Sonneveld and Voogt, 2009) μέχρι να προσεγγίσει την αντίστοιχη αναλογία εισόδου τους (συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  ή  $\text{Na}^+$  στο θρεπτικό διάλυμα που εισέρχεται στο κλειστό σύστημα) και ως εκ τούτου οι συγκεντρώσεις των αλάτων στο διάλυμα ανακύκλωσης να μην αυξάνονται περαιτέρω (βλέπε π.χ. Σχήματα 8.2 και 8.3). Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, η συγκέντρωση του  $\text{Ca}^{2+}$  στο αρδευτικό νερό που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος, επέβαλε ανάλογη αύξηση των συγκεντρώσεων  $\text{Ca}^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα ανακύκλωσης ώστε εντέλει περίπου να εξισωθούν οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις απορρόφησης  $\text{Ca}^{2+}$  με τις αναλογίες εισόδου  $\text{Ca}^{2+}$ /νερό. Σύμφωνα με τα ανωτέρω, οι μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν τη συσσώρευση της αλατότητας  $\text{NaCl}$  σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα θα μπορούσαν να διευρυνθούν και για την περιγραφή της συσσώρευσης του  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας μετά από την κατάλληλη παραμετροποίηση τους.

Η εφαρμογή ανάλυσης παλινδρόμησης στα πειραματικά δεδομένα με στόχο τη δημιουργία εμπειρικής σχέσης που συνδέει τη συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας με τη συγκέντρωση απορρόφησης του  $\text{Ca}^{2+}$  από τα φυτά κολοκυθιάς, απεκάλυψε ότι η εκθετικής μορφής εξίσωση του τύπου  $C_{\text{Cau}} = \alpha C_{\text{Cas}}^b$ , (όπου  $C_{\text{Cau}}$  = συγκέντρωση

απορρόφησης του  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $C_{Cas}$  = συγκέντρωση του  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας,  $a$  και  $b$  = σταθερές εξαρτώμενες από το καλλιεργούμενο είδος), υπερείχε της γραμμικής σχέσης με βάση τις τιμές των συντελεστών προσδιορισμού ( $R^2$ ). Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα όλων των μεταχειρίσεων, υπολογίστηκαν συγκεκριμένες τιμές για τις σταθερές  $a$  και  $b$  που για το  $a$  ήταν 0,532 και για το  $b$  ήταν 0,773 (Σχήμα 8.2). Με βάση τα πιο πάνω, στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε και βαθμονομήθηκε η ακόλουθη εξίσωση για την πρόβλεψη συσσώρευσης του  $\text{Ca}^{2+}$  σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς (cv. Anita F<sub>1</sub>):

$$C_{Cau} = 0,532C_{Cas}^{0,773}, R^2 = 0,904.$$

Από τα πιο πάνω, είναι φανερό ότι η βαθμονόμηση του μοντέλου έδωσε αρκετά υψηλή τιμή του συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ ), δίνοντας έτσι τη δυνατότητα χρήσης του μοντέλου για την προσομοίωση της συσσώρευσης  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας κλειστής υδροπονικής καλλιέργειας κολοκυθιάς σε συνάρτηση με μια μόνο παράμετρο, την αθροιστική κατανάλωση νερού από τα φυτά. Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του μοντέλου (επαλήθευση), οι θεωρητικά υπολογιζόμενες τιμές (από το μοντέλο) συγκρίθηκαν με μετρημένες τιμές από καλλιέργεια κολοκυθιάς σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες (Φ-Χ, Σχήμα 8.3) όπως καθορίζεται να γίνει στη βιβλιογραφία (Carmassi et al., 2005). Η ικανότητα πρόβλεψης του μοντέλου αποδείχτηκε αρκετά ικανοποιητική λαμβάνοντας υπόψη ότι η δυαδική συσχέτιση (ζεύγη τιμών) έδωσε κλίση της ευθείας και συντελεστή παλινδρόμησης πολύ κοντά στη μονάδα (Σχήμα 8.4).

Συνοψίζοντας, το μοντέλο πρόβλεψης της συσσώρευσης των αλάτων  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}$  στο περιβάλλον της ρίζας σε μια σειρά από καλλιέργειες θερμοκηπίου (Sonneveld and Voogt, 2009) αλλά και στο κολοκύθι (Κεφάλαιο IV, Neocleous and Savvas, 2017), από τα δεδομένα της εργασίας αυτής συμπεραίνεται ότι μπορεί να διευρυνθεί ως ένα αξιόπιστο εμπειρικό μοντέλο, για την εκτίμηση με αποδεκτή ακρίβεια της συσσώρευσης  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού, σε υδροπονική καλλιέργεια

κολοκυθιάς (cv. Anita F<sub>1</sub>), δεδομένου ότι γίνεται η κατάλληλη βαθμονόμηση (παραμετροποίηση) του.

Ο προσδιορισμός των μέσων συγκεντρώσεων απορρόφησης (ΣΑ) αποκάλυψε ότι η αύξηση των εξωτερικών συγκεντρώσεων Ca<sup>2+</sup> οδήγησε σε ανάλογη αύξηση της μέσης ΣΑ του Ca<sup>2+</sup> από τα φυτά κολοκυθιάς (Σχήμα 8.5). Παράλληλα, η μέση ΣΑ του N έδειξε ότι επηρεάστηκε από τη διαφοροποίηση της συγκέντρωσης του N στο θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης με αποτέλεσμα τα πιο πάνω δεδομένα να συνάδουν με την άποψη ότι, όταν οι εξωτερικές συγκεντρώσεις των ιόντων αυξάνονται, αυξάνονται και οι ΣΑ τους από τα φυτά (Rouphael and Colla, 2009, Sonneveld and Voogt, 2009). Εντούτοις, οι μέσες ΣΑ του P, K και Mg δεν διαφοροποιήθηκαν από τις πειραματικές μεταχειρίσεις Ca<sup>2+</sup> και σε αδρές γραμμές αντανakλούσαν τις συγκεντρώσεις τους στο θρεπτικό διάλυμα συμπλήρωσης (Σχήμα 8.5, Πίνακας 8.1). Αυτό ενδεχομένως να μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι πιθανά φαινόμενα ανταγωνισμού της απορρόφησης των υπόλοιπων μακροκατιόντων από το αυξημένο Ca<sup>2+</sup>, ήταν ασθενέστερα σε σχέση με τη διατήρηση της λειτουργικότητας των μηχανισμών απορρόφησης των θρεπτικών μακροστοιχείων από τα φυτά κολοκυθιάς λόγω (i) της ικανότητας του Ca<sup>2+</sup> να διατηρεί τη δομική ακεραιότητα και περατότητα των πλασματικών μεμβρανών (Sonneveld and Voogt, 2009) και (ii) της ικανότητας των φυτών της επιλεκτικής απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων με βάση τις απαιτήσεις τους παρά με βάση τη συγκέντρωσή τους στο θρεπτικό διάλυμα εντός μιας περιορισμένης κλίμακας τιμών (Marschner, 1995). Επίσης είναι γνωστό ότι η απορρόφηση των μονοσθενών ανιόντων από τη ρίζα όπως τα νιτρικά και τα φωσφορικά πραγματοποιείται πολύ αποτελεσματικά με ενεργή απορρόφηση από το περιβάλλον της ρίζας ακόμη και σε χαμηλές εξωτερικές συγκεντρώσεις (Savvas, 2002b). Παρόμοιες μέσες τιμές ΣΑ για κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς έχουν προσδιοριστεί στην εργασία που περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο IV ενδυναμώνοντας την υιοθέτηση των εν λόγω αποτελεσμάτων στην

κατάσθρωση θρεπτικών διαλυμάτων για κλειστά συστήματα καλλιέργειας στις Μεσογειακές συνθήκες.

Σχεδόν παράλληλη πορεία με τις ΣΑ είχαν επίσης και τα επίπεδα συγκεντρώσεων των μακροστοιχείων στους φυτικούς ιστούς (Πίνακας 8.2), υποδηλώνοντας ότι οι ρυθμοί απορρόφησης και μεταφοράς των θρεπτικών στοιχείων στα φυτά έχουν άμεση συσχέτιση με τις συγκεντρώσεις τους στο εξωτερικό διάλυμα εντός μιας κλίμακας τιμών (Sonneveld and Voogt, 2009). Έτσι η συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  στους φυτικούς ιστούς αυξήθηκε με την αύξηση του  $\text{Ca}^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα με τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις φυσιολογικά να εμφανίζονται στα φύλλα καθώς είναι γνωστό ότι το  $\text{Ca}^{2+}$  μεταφέρεται μέσω των ξυλωδών αγγείων με ανοδική κίνηση από τις ρίζες στην κυρίως διαπνέουσα επιφάνεια (Adams, 2002). Αντίστοιχα, παρατηρήθηκε και αύξηση της συγκέντρωσης N στα φύλλα. Αντίθετα, η σχετική μείωση των επιπέδων του K στα φύλλα, υποδηλώνει ότι ο ρυθμός μεταφοράς του  $\text{K}^+$  στα φύλλα έχει άμεση συσχέτιση με την αναλογία συγκεντρώσεων  $\text{K}^+ : \text{Ca}^{2+}$  στο ριζόστρωμα, το οποίο έχει επισημανθεί και στο Κεφάλαιο I. Εντούτοις η υψηλή συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  δεν προκάλεσε διαταραχή στις συγκεντρώσεις και την κατανομή των υπόλοιπων μακροστοιχείων στα διάφορα φυτικά μέρη οι οποίες βρίσκονται σε παρόμοια επίπεδα με αυτές που αναφέρονται στο Κεφάλαιο IV αλλά και προηγούμενες αναφορές (Mills and Jones, 1996, Gianquinto et al., 2013). Τα πιο πάνω επιβεβαιώνουν τη διαπίστωση ότι στα επίπεδα που εξετάστηκαν η διατήρηση της λειτουργικότητας της εκλεκτικής απορρόφησης των κυτταρικών μεμβρανών, υπερνίκησε ενδεχομένως έντονα φαινόμενα ανταγωνισμού από την αύξηση  $\text{Ca}^{2+}$  στο θρεπτικό διάλυμα και στους ιστούς με τα επιλεγμένα μακροστοιχεία (N, P, K και Mg), αποφεύγοντας διαταραχές στη θρεπτική κατάσταση του φυτού. Παρόμοια αποτελέσματα σχετικά με την ευεργετική επίδραση του  $\text{Ca}^{2+}$  στη θρεπτική ισορροπία των φυτών σε συνθήκες αλατότητας έχουν επισημανθεί από πολλούς ερευνητές (π.χ. Adams, 2002,



Sonneveld and Voogt, 2009) όπως και στην παρούσα διατριβή στο Κεφάλαιο I σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια πεπονιάς (Neocleous and Savvas, 2015).

Δεδομένου ότι οι χρονικές διακυμάνσεις της αναλογίας πρόσληψης στοιχείου προς νερό (ΣΑ) είναι πολύ μικρότερες από τις διακυμάνσεις που παρουσιάζουν ξεχωριστά οι ρυθμοί πρόσληψης τους (Sonneveld, 2002, Savvas et al., 2013), οι μέσες ΣΑ των θρεπτικών μακροστοιχείων που προσδιορίστηκαν στην παρούσα εργασία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως χρήσιμο εργαλείο στην κατάστροση θρεπτικών διαλυμάτων για κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς κάτω από τις ιδιαιτερότητες της χημικής σύστασης του αρδευτικού νερού στις Μεσογειακές συνθήκες.

## 8.5. Συμπεράσματα

Η εφαρμογή ενός εμπειρικού μοντέλου που περιγράφει τη συσσώρευση της αλατότητας NaCl σε κλειστά υδροπονικά συστήματα, διευρύνθηκε και αξιολογήθηκε σε κλειστή καλλιέργεια κολοκυθιάς όπου επιτυχώς προσομοίωσε τις συγκεντρώσεις  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας συσχετίζοντας τις, με την αθροιστική κατανάλωση νερού από τα φυτά. Οι αναλογίες πρόσληψης των επιλεγμένων θρεπτικών μακροστοιχείων (δηλ. N, P, K, Ca και Mg) προς νερό (αναφέρονται ως συγκεντρώσεις απορρόφησης, ΣΑ), προσδιορίστηκαν υπό συνθήκες βαθμιαίας αύξησης της συγκέντρωσης ιόντων  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας, με σκοπό την κατάστροση κατάλληλων θρεπτικών διαλυμάτων για κλειστά συστήματα στις Μεσογειακές κλιματικές συνθήκες. Επίσης, τα αποτελέσματα από τους φυσιολογικούς και αγρονομικούς παράγοντες των φυτών που εξετάστηκαν, έδειξαν ότι σε συνθήκες υπερβολικής συγκέντρωσης  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας (17-22 mM), τα φυτά κολοκυθιάς υφίστανται ωσμωτική καταπόνηση και η φωτοσυνθετική δραστηριότητα επηρεάζεται αρνητικά σε επίπεδο χλωροπλαστών. Εντούτοις, όταν η συγκέντρωση στο νερό άρδευσης δεν υπερβαίνει τα 3 mM  $\text{Ca}^{2+}$ , τότε δεν αυξάνεται η αλατότητα στο διάλυμα ανακύκλωσης σε

επιβλαβή επίπεδα για την καλλιέργεια (μέση τιμή EC 3,2 dS m<sup>-1</sup>) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια για την κατάστροση θρεπτικών διαλυμάτων.

Τα πιο πάνω αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα υποστήριξης απόφασης (decision support systems) για την προώθηση διαχειριστικών πρακτικών που συμβάλλουν στην αποτελεσματικότερη χρήση νερού και λιπασμάτων στα θερμοκήπια χωρίς απώλειες στη γεωργική παραγωγή, σε περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από έλλειψη καλής ποιότητας νερού.



**Εικόνα 8.2.** Ανάπτυξη φύλλων, καρπών και ρίζας σε πειραματική καλλιέργεια NFT κολοκυθιάς, υπό συνθήκες αυξημένης συγκέντρωσης ασβεστίου στο αρδευτικό νερό.

## Γενική Συζήτηση – Συμπεράσματα

Η Μεσόγειος θεωρείται ότι θα αποτελέσει την περιοχή που θα βιώσει τις μεγαλύτερες συνέπειες της κλιματικής αλλαγής (IPCC, 2014). Ως αποτέλεσμα, αναμένεται μείωση της διαθεσιμότητας και υποβάθμιση της ποιότητας των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, καθώς επίσης και αύξηση της διάβρωσης και αλάτωσης του εδάφους (Iglesias et al., 2007). Ως εκ τούτου οι ταχέα μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες θα αποτελέσουν (ή αποτελούν ήδη) πρόκληση για την ικανότητα των γεωργικών συστημάτων να παράγουν επαρκή τρόφιμα υψηλής ποιότητας σε περιορισμένες εκτάσεις, ενισχύοντας την πίεση για αποτελεσματικότερη χρήση των θρεπτικών στοιχείων και του νερού.

Τα τελευταία χρόνια, έχει επανειλημμένα αναφερθεί στη βιβλιογραφία ότι η καλλιέργεια των κηπευτικών καλλιεργειών σε κλειστά υδροπονικά συστήματα, συνιστά έναν τρόπο σημαντικής εξοικονόμησης νερού και λιπασμάτων στα θερμοκήπια ενώ ταυτόχρονα παρέχει καλύτερες δυνατότητες προστασίας του περιβάλλοντος (π.χ. αποτρέπεται η ρύπανση των υπογείων υδάτων με νιτρικά και φωσφορικά ιόντα), με συνέπεια την εκδήλωση ενός αυξανόμενου ενδιαφέροντος από πλευράς καλλιεργητών και επιστημόνων (Savvas, 2002, Bar-Yosef, 2008, Sonneveld and Voogt, 2009, Katsoulas et al., 2015). Επίσης η εφαρμογή των κλειστών υδροπονικών συστημάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα χρήσιμο εργαλείο στην στρατηγική αντιμετώπισης των προκλήσεων της κλιματικής αλλαγής, ιδιαίτερα στη Νότιο και Νότιο-Ανατολική Ευρώπη και φαίνεται ότι μπορεί να αποτελέσει κοινή πρακτική στα συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους αν αναπτυχθούν κατάλληλες τεχνολογίες και διαχειριστικές πρακτικές (Katsoulas et al., 2015).

Μια από τις σημαντικότερες δυσκολίες στα κλειστά συστήματα υδροπονίας παρουσιάζει η συμπλήρωση του θρεπτικού διαλύματος απορροής με τις κατάλληλες ποσότητες θρεπτικών στοιχείων και νερού. Στα συστήματα με συνεχή επανακυκλοφορία του θρεπτικού διαλύματος, οι ποσότητες θρεπτικών στοιχείων και νερού που εισάγονται στο

σύστημα θα πρέπει να είναι ίσες με αυτές που απορροφώνται από τα φυτά, δηλαδή τις μέσες αναμενόμενες συγκεντρώσεις απορρόφησης – ΣΑ (uptake concentrations – UCs, μάζα θρεπτικού στοιχείου ανά μονάδα όγκου νερού που απορροφάται από τα φυτά για μια μακρά περίοδο ανάπτυξης των φυτών), ώστε τα φυτά να τροφοδοτούνται επαρκώς με θρεπτικά στοιχεία αλλά ταυτόχρονα να μην συσσωρεύονται στο διάλυμα ανακύκλωσης (De Kreij, 1995, Adams, 2002, Sonneveld and Voogt, 2009). Οι ΣΑ έχουν επίσης πολύ μεγάλη αξία στην ανάπτυξη μαθηματικών προσομοιωμάτων και την αυτοματοποίηση της τροφοδοσίας του θρεπτικού διαλύματος στις υδροπονικές καλλιέργειες γιατί παρουσιάζουν χρονική σταθερότητα συγκριτικά με τους ρυθμούς πρόσληψης των θρεπτικών στοιχείων (πρόσληψη στη μονάδα του χρόνου) (Sonneveld, 2002). Τέτοιες αναλογίες μεταξύ των κύριων θρεπτικών στοιχείων (N, P, K, Ca και Mg) και νερού (ΣΑ) έχουν προσδιορισθεί κυρίως κάτω από τις συνθήκες των Βόρειων Ευρωπαϊκών χωρών (De Kreij et al., 1999, Adams, 2002, Sonneveld, 2002, Sonneveld and Straver, 1994, Sonneveld and Voogt, 2009), ενώ στις Μεσογειακές κλιματικές συνθήκες που χαρακτηρίζονται από τις ιδιαιτερότητες του κλίματος (ηλιοφάνεια, θερμοκρασία) και της χημικής σύστασης των αρδευτικών νερών, υπάρχει περιορισμένος αριθμός ερευνητικών δεδομένων (Bar-Yosef, 2008, Massa et al., 2010, Savvas et al., 2013). Συνεπώς, η απάντηση στο ερώτημα πως μεταβάλλονται οι ΣΑ θρεπτικών και μη-θρεπτικών ιόντων (δηλ. οι συνθήκες θρέψης των φυτών) από την αλατότητα, το στάδιο ανάπτυξης και την εποχή καλλιέργειας σε κλειστά υδροπονικά συστήματα με συνεχή και πλήρη ανακύκλωση των απορροών, ερευνητικά δεν έχει ολοκληρωθεί (Neocleous and Savvas, 2016).

Όπως έχει αναφερθεί, ο προσδιορισμός κατάλληλων τιμών ΣΑ των θρεπτικών στοιχείων σε αλατούχα περιβάλλοντα, είναι πρωταρχικής και πρακτικής σημασίας για τις καλλιέργειες σε κλειστά υδροπονικά συστήματα. Οι γεωργοί αναγκάζονται να χρησιμοποιούν ολοένα και περισσότερο αλατούχα νερά για σκοπούς άρδευσης σε ξηρές και

ημίξηρες περιοχές, υπό το πρίσμα των μειωμένων βροχοπτώσεων και της έλλειψης καλής ποιότητας φρέσκου νερού. Αν και η ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος είναι γνωστό ότι δεν μειώνει τις αποδόσεις και τη διατροφική αξία του προϊόντος (Raviv et al., 1998, Savvas and Gizas, 2002), είναι συχνά συνυφασμένη με την ανάπτυξη ορισμένων σημαντικών προβλημάτων λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης αλάτων στο φυσικό νερό άρδευσης και κατ' επέκταση στα θρεπτικά διαλύματα (Bar-Yosef, 2008, Massa et al., 2010, Thompson et al., 2013). Έχει αναφερθεί ότι παρόλο που τα άλατα που κυριαρχούν στα νερά άρδευσης των περιοχών αυτών είναι κυρίως το NaCl, επίσης Ca, Mg, όξινα ανθρακικά και θειικά άλατα περιέχονται πολύ συχνά σε υψηλές συγκεντρώσεις (Savvas and Lenz, 2000, Neocleous and Savvas, 2013a, b, 2015). Συνεπώς, η βαθμιαία συσσώρευση των ανόργανων αλάτων στο διάλυμα ανακύκλωσης αναπόφευκτα θα εκθέσει τα φυτά σε αλατούχο καταπόνηση (Pardossi et al., 2004, Bar-Yosef, 2008). Εντούτοις, η ανώτατη επιτρεπτή τιμή αλατότητας σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα δεν θα πρέπει απλά να ταυτίζεται με τις γνωστές από τη βιβλιογραφία τιμές-κατώφλι αλατότητας για την καλλιέργεια ως μια σταθερή συγκέντρωση αλάτων στο ριζόστρωμα, διότι τα φυτά στην πρώτη περίπτωση (βαθμιαία αύξηση της αλατότητας) μπορούν να ρυθμίζουν το ωσμωτικό τους δυναμικό (Sonneveld et al., 1999, Bar-Yosef, 2008). Όπως αναφέρεται περιληπτικά στις επιμέρους εργασίες της διατριβής, για να αποφευχθεί ή τουλάχιστο να ελαχιστοποιηθεί η συσσώρευση των αλάτων στο διάλυμα ανακύκλωσης, κατάλληλα προσομοιώματα και στρατηγικές έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν (Baas et al., 1995, Sonneveld, 2002, Carmassi et al., 2003, Kempkes and Stanghellini, 2003, Silberbush et al., 2005, Savvas et al., 2007, 2008, Bar-Yosef, 2008). Τα γενικά εμπειρικά μοντέλα για την προσομοίωση των αλάτων σε παραγωγικές καλλιέργειες σε κλειστά υδροπονικά συστήματα, περιλαμβάνουν μεταβλητές που μπορούν εύκολα να μετρηθούν (π.χ. η κατανάλωση νερού από τα φυτά) με αποτέλεσμα να είναι ευκολότερα στην εφαρμογή τους και με επαρκή ακρίβεια (Σάββας, 2012). Εντούτοις, για να είναι αξιόπιστα τα

μοντέλα (μαθηματικές σχέσεις) αυτά θα πρέπει να έχουν βαθμονομηθεί και επαληθευθεί από αξιόπιστα πειραματικά δεδομένα (Carmassi et al., 2005).

Όταν είδη με μέτρια αντοχή στην αλατότητα καλλιεργούνται σε κλειστά υδροπονικά συστήματα, η χρήση λογισμικών προγραμμάτων υποστήριξης απόφασης (γνωστά ως Decision Support Systems, DSS) σε συνθήκες πραγματικού χρόνου, μπορεί να επιμηκύνει την πλήρη και συνεχή ανακύκλωση του ίδιου θρεπτικού διαλύματος (Carmassi et al., 2005, Varlagas et al., 2010, Katsoulas et al., 2015). Η καλλιέργεια της πεπονιάς (*Cucumis melo* L.) και της κολοκυθιάς (*Cucurbita pepo* L.) είναι ευρύτατα διαδεδομένες στη λεκάνη της Μεσογείου, όπου χαμηλότερης ποιότητας νερά συχνά χρησιμοποιούνται ως πηγή άρδευσης στις καλλιέργειες (Rouphael and Colla, 2005, Bar-Yosef, 2008). Η πεπονιά και η κολοκυθιά είναι λιγότερο ευαίσθητες από τα περισσότερα καρποδοτικά λαχανικά θερμοκηπίου και η καλλιέργεια τους σε κλειστά ή ημί-κλειστά υδροπονικά συστήματα θα μπορούσε να είναι προτιμητέα επιλογή σε αυτές τις περιοχές (Colla et al., 2006, Rouphael et al., 2006, Katsoulas et al., 2015), υπό το πρίσμα της υιοθέτησης πολιτικών πλήρης επαναχρησιμοποίησης των απορροών και της στρατηγικής αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής (IPCC, 2014). Με βάση όλα τα παραπάνω, από την παρούσα διατριβή προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα, ποσοτικές πληροφορίες και προβλέψεις, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτούσια ή να ενσωματωθούν σε συστήματα υποστήριξης απόφασης (π.χ. DSS-Hortimed, SimulHydro) ως εργαλεία για την αυτοματοποίηση της παροχής θρεπτικών στοιχείων και την καλύτερη διαχείριση της συσσώρευσης των αλάτων σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες κηπευτικών σε κλειστά υδροπονικά συστήματα, στις Μεσογειακές συνθήκες.

**I:** Οι διαφορετικές στρατηγικές θρέψης, οι οποίες ακολουθήθηκαν στην πρώτη εργασία με στόχο να ελαχιστοποιηθούν οι θρεπτικές ανισορροπίες στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα, και επομένως στο περιβάλλον των ριζών της πεπονιάς, όταν η συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  στο νερό άρδευσης υπερβαίνει τα συνιστώμενα για την καλλιέργεια

επίπεδα έδειξε ότι η αύξηση του  $K^+$  και  $Mg^{2+}$  σε επίπεδα ανάλογα με την αύξηση του  $Ca^{2+}$  ώστε να διατηρηθεί η συνιστώμενη (επιθυμητή) αναλογία  $K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+}$  δεν συνίσταται στην καλλιέργεια πεπονιάς, καθώς στην παρούσα εργασία αύξησε την EC στο ριζόστρωμα σε επιβλαβή επίπεδα ( $4,62 \text{ dS m}^{-1}$ ) για την καλλιέργεια, και με αυτόν τον τρόπο μειώθηκε η απόδοση σε καρπό κατά 20% λόγω ωσμωτικής καταπόνησης. Τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής δείχνουν ότι οι αμοιβαίες αναλογίες των μακροκατιόντων είναι περισσότερο σημαντικές για την απορρόφηση και μεταφορά των θρεπτικών ιόντων μέσα στο φυτό από ότι οι απόλυτες συγκεντρώσεις τους στο θρεπτικό διάλυμα. Ειδικότερα, η αναλογία  $K^+ : Ca^{2+}$  αποδείχτηκε περισσότερο σημαντική για τη μεταφορά του  $K^+$  στα φύλλα πεπονιάς από την απόλυτη συγκέντρωση  $K^+$  στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας. Διαφορές στις μέσες συγκεντρώσεις απορρόφησης ( $\Sigma A$ ) των μακροστοιχείων και τη μοριακή αναλογία απορρόφησης  $K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+}$ , διαπιστώθηκαν με την πρόοδο της καλλιέργειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι χρησιμοποιώντας διαφορετικές συνθέσεις θρεπτικού διαλύματος σε μακροστοιχεία για τουλάχιστον τρία διακριτά στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας, διασφαλίζονται οι αναγκαίες ποσότητες τροφοδοσίας των θρεπτικών στοιχείων και ελαχιστοποιούνται προβλήματα προοδευτικής συσσώρευσης των μακροκατιόντων στο περιβάλλον των ριζών, όταν η πεπονιά καλλιεργείται σε κλειστά υδροπονικά συστήματα στις Μεσογειακές κλιματικές συνθήκες. Επίσης από την εργασία αποδείχτηκε ότι η εκτίμηση των  $\Sigma A$  των μακροθρεπτικών από την καλλιέργεια, είτε με βάση τις μετρήσεις στο θρεπτικό διάλυμα είτε με βάση τις μετρήσεις στη ξηρή φυτομάζα δίνουν παρόμοια αποτελέσματα και μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό για την πληρέστερη κατάρτιση της σύνθεσης των θρεπτικών διαλυμάτων σε μακροστοιχεία σε κλειστά υδροπονικά συστήματα. Τα κύρια σημεία συνοψίζονται στα εξής:

1. Οι μέσες συγκεντρώσεις απορρόφησης ( $\Sigma A$ ) για N, P, K, Ca και Mg για μια μακρά περίοδο ανάπτυξης των φυτών πεπονιάς ήταν 15,4, 1,31, 5,47, 3,78, και  $1,02 \text{ mmol L}^{-1}$ ,

αντίστοιχα, και στο σύνολο της φυτικής βιομάζας η γραμμομοριακή αναλογία K: Ca: Mg = 0,55: 0,34: 0,11.

2. Η αύξηση της EC στο περιβάλλον των ριζών πεπονιάς από 3,2 σε 4,6 dS m<sup>-1</sup>, οφειλόμενη στη συσσώρευση θρεπτικών στοιχείων στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα, μειώνει την απόδοση σε καρπό κατά περίπου 20% λόγω ωσμωτικής καταπόνησης.
3. Οι δύο μέθοδοι εκτίμησης των μέσων ΣΑ σε υδροπονική καλλιέργεια πεπονιάς τύπου NFT δηλ. με βάση την απομάκρυνση των θρεπτικών στοιχείων από το θρεπτικό διάλυμα και την ανάκτηση των θρεπτικών στοιχείων από τη ξηρή φυτομάζα, είναι αξιόπιστες δεδομένου ότι έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα.

**II:** Ακολούθως στη δεύτερη εργασία για τη βελτιστοποίηση της σύνθεσης των θρεπτικών διαλυμάτων που χορηγούνται σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια πεπονιάς (*Cucumis melo* L.) κάτω από Μεσογειακές κλιματικές συνθήκες, μελετήθηκε το πρόβλημα της σταδιακής συσσώρευσης αλάτων στο διάλυμα ανακύκλωσης ώστε να μπορεί να προβλεφθεί η συγκέντρωση του Na<sup>+</sup> και του Cl<sup>-</sup> στο περιβάλλον των ριζών. Ταυτόχρονα υπολογίστηκαν οι συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) των μακροθρεπτικών. Η συσσώρευση του Na<sup>+</sup> και του Cl<sup>-</sup> ακολούθησε σιγμοειδή πορεία σε συνάρτηση με το χρόνο με τους ρυθμούς συσσώρευσης να μειώνονται βαθμιαία και να μηδενίζονται στα τελικά στάδια της καλλιέργειας. Οι συγκεντρώσεις των αλάτων σταθεροποιήθηκαν σε κάποιο χρονικό σημείο σε ορισμένα μέγιστα επίπεδα ανάλογα με τη μεταχείριση αλατότητας, όταν οι συγκεντρώσεις απορρόφησης από τα φυτά σχεδόν εξισώθηκαν με τις συγκεντρώσεις των αλάτων στο νερό άρδευσης. Αποδείχτηκε ότι τα δεδομένα του πειράματος μπορούσαν να περιγραφούν με μεγαλύτερη ακρίβεια από την εκθετική εξίσωση του τύπου  $C_{xu}=aC_{xs}^b$  (όπου  $C_{xu}$  είναι η αναλογία απορρόφησης Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> / νερό και  $C_{xs}$  η συγκέντρωση του Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> στο περιβάλλον της ρίζας) αφού οι υπολογισθείσες σταθερές του μοντέλου ελέγχθησαν ως προς την αξιοπιστία τους. Η εκθετική μορφή του προσομοιώματος χρησιμοποιήθηκε για τη λύση μιας διαφορικής



εξίσωσης που βασίζεται στο ισοζύγιο μαζών σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα, ώστε να μπορούν να υπολογιστούν οι συγκεντρώσεις  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον της ρίζας σε πραγματικό χρόνο σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού από τα φυτά. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να προσδιορισθεί: 1) πότε θα απορρίπτεται το διάλυμα απορροής με βάση την ανώτατη επιτρεπτή συγκέντρωση αλατότητας στο διάλυμα ριζοστρώματος και 2) ποιο μέρος της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) του θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας στην καλλιέργεια αντιστοιχεί στην αλατότητα λόγω  $\text{NaCl}$  και επομένως ποια πρέπει να είναι η τελική τιμή EC στόχος, ώστε να παρέχονται επαρκείς ποσότητες θρεπτικών στοιχείων στα φυτά. Επίσης, στην εργασία αυτή προσδιορίστηκαν μέσες τιμές ΣΑ των μακροθρεπτικών (δηλ. N, P, K, Ca και Mg) αξιολογώντας τις χρονικές μεταβολές σε όλη την περίοδο ανάπτυξης σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια πεπονιάς (πλήρη και συνεχή ανακύκλωση), κάτω από συνθήκες υψηλής αλατότητας. Τα κύρια σημεία συνοψίζονται στα εξής:

4.  $C_{xu} = 0,178C_{xs}^{0,878}$  (όπου  $C_{xu}$  είναι η αναλογία απορρόφησης  $\text{Na}^+$ / νερό και  $C_{xs}$  η συγκέντρωση του  $\text{Na}^+$  στο περιβάλλον της ρίζας).
5.  $C_{xu} = 0,248C_{xs}^{0,774}$  (όπου  $C_{xu}$  είναι η αναλογία απορρόφησης  $\text{Cl}^-$ / νερό και  $C_{xs}$  η συγκέντρωση του  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον της ρίζας).
6. Οι μέσες ΣΑ του N, P, K, Ca και Mg υπολογίστηκαν ως ακολούθως: (i) 16,8, 1,5, 7,7, 4,7 και 1,1  $\text{mmol L}^{-1}$ , αντίστοιχα (βλαστικό στάδιο – δέσιμο καρπών), (ii) 16,5, 1,5, 7,2, 4,6 και 1,1  $\text{mmol L}^{-1}$ , αντίστοιχα (δέσιμο καρπών – έναρξη δικτύωσης), και (iii) 15,7, 1,4, 6,9, 4,3 και 1,0  $\text{mmol L}^{-1}$ , αντίστοιχα (έναρξη δικτύωσης – συγκομιδή).

**III:** Στην τρίτη εργασία για να ελαχιστοποιηθεί η αρνητική επίδραση της αλατότητας σε καλλιέργειες πεπονιάς σε κλειστά υδροπονικά συστήματα, μελετήθηκε η φυσιολογική επίδραση της βαθμιαίας συσσώρευσης των αλάτων στο διάλυμα ανακύκλωσης στα φυτά. Από τα δεδομένα προέκυψε ότι η παραγόμενη βιομάζα και η καρπική απόδοση επηρεάστηκαν αρνητικά (22% μείωση) στην πεπονιά όταν η αλατότητα στο ανακυκλούμενο

θρεπτικό διάλυμα ανυψώθηκε μέχρι τα 30 (X-A) και 40 (A-K) mM NaCl, ανάλογα με την εποχή καλλιέργειας, λόγω στοματικών περιορισμών που περιόρισαν τη διάχυση του CO<sub>2</sub> στα κύτταρα του φύλλου, ωσμωτικών και ειδικών ιοντικών επιδράσεων των αλάτων. Αντίθετα, η βαθμιαία συσσώρευση της αλατότητας στο περιβάλλον των ριζών σε μέγιστα επίπεδα συγκεντρώσεων 15 (X-A) και 20 (A-K) mM NaCl, δεν είναι επιβλαβή για τη βέλτιστη παραγωγή της ποικιλίας πεπονιού τύπου-Galia που εξετάστηκε, επειδή τα φυτά είναι ικανά να διατηρήσουν τους φυσιολογικούς ρυθμούς αύξησης και παραγωγής επάγοντας διάφορους μηχανισμούς εγκλιματισμού όπως η ωσμωτική προσαρμογή και η διαμερισματοποίηση των αλάτων. Έτσι, φυσιολογικοί μηχανισμοί όπως η απορρόφηση και μεταφορά των θρεπτικών στοιχείων, οι υδατικές σχέσεις (μείωση υδατικού δυναμικού των φύλλων χωρίς αρνητική επίδραση στη φωτοσύνθεση) και ο καθαρός ρυθμός αφομοίωσης του CO<sub>2</sub>, διατηρούνται ακέραιοι και λειτουργικοί, επιτρέποντας τα φυτά να προσαρμόζονται με την πάροδο του χρόνου ρυθμίζοντας την αύξηση και την απόδοση χωρίς να επηρεάζεται αρνητικά η ποιότητα των καρπών. Τα κύρια σημεία συνοψίζονται στα εξής:

7. Οι ρυθμοί συσσώρευσης των αλάτων στο διάλυμα απορροής είναι εντονότεροι την περίοδο που τα φυτά έχουν εντονότερους ρυθμούς αύξησης και διαπνοής και είναι άμεσα συνυφασμένοι με τις συγκεντρώσεις στους φυτικούς ιστούς.
8. Η γραμμική συσχέτιση των συγκεντρώσεων στους φυτικούς ιστούς (% ξ.β.) με τις συγκεντρώσεις Na<sup>+</sup> και Cl<sup>-</sup> στο περιβάλλον των ριζών (mmol L<sup>-1</sup>) έδωσε μέσες τιμές της κλίσης 0,048(0,040), 0,075(0,068), 0,041(0,033) και 0,015(0,016) για Cl<sup>-</sup>(Na<sup>+</sup>) στα φύλλα, βλαστούς, ρίζες και καρπούς, αντίστοιχα.
9. Η χρήση αρδευτικού νερού με συγκέντρωση NaCl που δεν υπερβαίνει τα 2,5 mM σε καλλιέργεια της ποικιλίας πεπονιάς 'Cory' ή ποικιλιών με παρόμοια απόκριση στην αλατότητα, επιτρέπει την πλήρη και συνεχή ανακύκλωση των απορροών σε κλειστό σύστημα καλλιέργεια πεπονιάς (μέγιστα επίπεδα στη ρίζα 15-20 mM NaCl), χωρίς

δυσμενείς επιδράσεις στις φυσιολογικές λειτουργίες του φυτού, την παραγωγή και την ποιότητα.

**IV:** Για την εκτίμηση της σχέσης μεταξύ της κατανάλωσης νερού και της συσσώρευσης NaCl σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς (*Cucurbita pepo* L.), και τη μελέτη της επίδρασης της αλατότητας στην απορρόφηση μακροθρεπτικών, φυτά κολοκυθιάς καλλιεργήθηκαν σε κλειστό υδροπονικό σύστημα με τη χρήση αρδευτικού νερού το οποίο περιείχε διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl (0,7, 3, 5 και 7 mM) σε δύο διαφορετικές εποχές καλλιέργειας. Αρχικά περιγράφηκε η μαθηματική σχέση που συνδέει τη συγκέντρωση του Na<sup>+</sup> και του Cl<sup>-</sup> στο διάλυμα ριζοστρώματος (σιγμοειδή πορεία συσσώρευσης με το χρόνο όπως και στην πεπονιά) και των αντίστοιχων αναλογιών απορρόφησης Na<sup>+</sup>/νερό και Cl<sup>-</sup>/νερό (συγκεντρώσεις απορρόφησης, ΣΑ) από τα φυτά. Αποδείχτηκε ότι η εκθετική μορφή της εξίσωσης του τύπου  $C_{xu}=aC_{xs}^b$  (όπου  $C_{xu}$  είναι η αναλογία απορρόφησης Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>/ νερό και  $C_{xs}$  η συγκέντρωση του Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> στο περιβάλλον της ρίζας) μπορεί με επιτυχία να περιγράψει τα πειραματικά δεδομένα και παρέχει σημαντική ακρίβεια στις προβλέψεις για ένα ευρύ φάσμα εξωτερικών συγκεντρώσεων NaCl και για όλη τη διάρκεια καλλιέργειας της κολοκυθιάς. Συνεπώς διασφαλίζεται ότι το μοντέλο (προσομοίωμα) αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των συγκεντρώσεων Na<sup>+</sup> και Cl<sup>-</sup> στο περιβάλλον των ριζών κολοκυθιάς σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού από τα φυτά σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα. Επίσης οι αναλογίες πρόσληψης των επιλεγμένων μακροστοιχείων (δηλ. N, P, K, Ca και Mg) προς νερό (ΣΑ), προσδιορίστηκαν σε συνθήκες βαθμιαίας αύξησης της αλατότητας στο περιβάλλον της ρίζας, ως χρήσιμο εργαλείο για την καλύτερη διαχείριση του σχήματος θρέψης της κολοκυθιάς σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα. Τα χαρακτηριστικά της αύξησης και ανάπτυξης των φυτών (δηλ. παραγωγή βιομάζας, καρπική απόδοση, ποιότητα καρπών και ανταλλαγή αερίων κατά τη φωτοσύνθεση) υποδηλώνουν ότι πηγές νερού με περιεκτικότητα NaCl που δεν

υπερβαίνει τη συγκέντρωση 3 mM μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρασκευή θρεπτικών διαλυμάτων σε υδροπονικές καλλιέργειας κολοκυθιάς με συνεχή και πλήρη ανακύκλωση των απορροών. Τα κύρια σημεία συνοψίζονται στα εξής:

10.  $C_{xu}=0,314C_{xs}^{0,698}$  (όπου  $C_{xu}$  είναι η αναλογία απορρόφησης  $\text{Na}^+$ / νερό και  $C_{xs}$  η συγκέντρωση του  $\text{Na}^+$  στο περιβάλλον της ρίζας).
11.  $C_{xu}=1,046C_{xs}^{0,443}$  (όπου  $C_{xu}$  είναι η αναλογία απορρόφησης  $\text{Cl}^-$ / νερό και  $C_{xs}$  η συγκέντρωση του  $\text{Cl}^-$  στο περιβάλλον της ρίζας).
12. Οι μέσες ΣΑ των μακροθρεπτικών για όλη την καλλιεργητική περίοδο των φυτών κολοκυθιάς σε συνθήκες βαθμιαίας αύξησης της αλατότητας ήταν 14,8, 1,1, 5,6, 3,6, και 1,5 mmol L<sup>-1</sup>, για N, P, K, Ca και Mg αντίστοιχα. Διαχωρίζοντας τα δεδομένα για το βλαστικό και στάδιο καρποφορίας, οι ΣΑ για N, P, K, Ca και Mg ήταν 15,4, 1,2, 6,0, 3,7, και 1,6 mmol L<sup>-1</sup> και 14,3, 1,1, 5,3, 3,3, και 1,4 mmol L<sup>-1</sup>, αντίστοιχα.
13. Τα φυτά κολοκυθιάς συγκρατούν και συσσωρεύουν το  $\text{Na}^+$  στο κατώτερο μέρος του φυτού και τις ρίζες, ενώ το  $\text{Cl}^-$  ελεύθερα απορροφάται και μεταφέρεται μέσω του ρεύματος της διαπνοής σε ολόκληρο το φυτό. Εντούτοις, πηγές νερού με περιεκτικότητα NaCl που δεν υπερβαίνει τη συγκέντρωση 3 mM μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς ιδιαίτερες αρνητικές συνέπειες σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς.

**V:** Στην τελευταία εργασία αλλά όχι τη λιγότερο σημαντική της παρούσας διατριβής, φυτά κολοκυθιάς (*Cucurbita pepo* L.) καλλιεργούμενα σε κλειστό υδροπονικό σύστημα τροφοδοτήθηκαν με θρεπτικό διάλυμα το οποίο περιείχε διαφορετικές συγκεντρώσεις  $\text{Ca}^{2+}$  (1,5, 3, 4,5 και 6 mM). Τα ιόντα  $\text{Ca}^{2+}$  με το χρόνο σταδιακά συσσωρεύτηκαν στο διάλυμα ριζοστρώματος και ακολούθησαν ένα παρόμοιο πρότυπο συσσώρευσης με αυτό που βρέθηκε για το  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς (σιγμοειδής αύξηση). Ως εκ τούτου, χρησιμοποιήθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο βασισμένο σε ισοζύγιο μαζών, το οποίο αναπτύχθηκε προηγουμένως με στόχο την πρόβλεψη της συσσώρευσης της

αλατότητας NaCl σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς. Ειδικότερα καθορίστηκε πειραματικά η σχέση που συνδέει τη συγκέντρωση του  $\text{Ca}^{2+}$  στο διάλυμα ριζοστρώματος και της αντίστοιχης αναλογίας απορρόφησης  $\text{Ca}^{2+}$ / νερό (συγκέντρωση απορρόφησης). Το εμπειρικό αυτό μοντέλο (προσομοίωμα), ακολούθως αξιολογήθηκε ως προς την αξιοπιστία του σε μια δεύτερη καλλιέργεια, και αποδείχτηκε ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των συγκεντρώσεων  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον των ριζών κολοκυθιάς σε συνάρτηση με την αθροιστική κατανάλωση νερού από τα φυτά. Δεύτερος στόχος ήταν να μελετηθεί πως επηρεάζονται οι μέσες συγκεντρώσεις απορρόφησης (ΣΑ) των μακροθρεπτικών (δηλ. N, P, K, Ca και Mg) για μια μακρά περίοδο ανάπτυξης των φυτών από τη σταδιακή συσσώρευση  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας, με στόχο να αποτελέσουν μια καλή βάση στην κατάστρωση κατάλληλων θρεπτικών διαλυμάτων για κλειστά συστήματα, στα θερμοκήπια των Μεσογειακών χωρών. Επίσης, τα φυσιολογικά και αγρονομικά χαρακτηριστικά των φυτών που εξετάστηκαν, ως παράγοντες ανάδρασης της καλλιέργειας, έδειξαν ότι σε συνθήκες υπερβολικής συγκέντρωσης αλάτων  $\text{Ca}^{2+}$  τα φυτά κολοκυθιάς υφίστανται οσμωτική καταπόνηση και η φωτοσυνθετική δραστηριότητα επηρεάζεται αρνητικά σε επίπεδο χλωροπλαστών. Εντούτοις, όταν η συγκέντρωση στο νερό άρδευσης δεν υπερβαίνει τα 3 mM  $\text{Ca}^{2+}$ , τότε δεν αυξάνεται η αλατότητα στο διάλυμα ανακύκλωσης σε επιβλαβή επίπεδα για την καλλιέργεια και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια για την κατάστρωση θρεπτικών διαλυμάτων. Τα κύρια σημεία συνοψίζονται στα εξής:

14.  $C_{Cau}=0,532C_{Cas}^{0,773}$  (όπου  $C_{Cau}$  είναι η αναλογία απορρόφησης  $\text{Ca}^{2+}$ / νερό και  $C_{Cas}$  η συγκέντρωση του  $\text{Ca}^{2+}$  στο περιβάλλον της ρίζας).
15. Οι μέσες ΣΑ των μακροθρεπτικών για όλη την καλλιεργητική περίοδο των φυτών κολοκυθιάς ήταν 15,3, 1,16, 6,3, 3,4, και 2,0 mmol L<sup>-1</sup>, για N, P, K, Ca και Mg αντίστοιχα, με μικρές διαφορές ανάμεσα στο βλαστικό και αναπαραγωγικό στάδιο.

**16.** Η αύξηση της EC στο περιβάλλον των ριζών κολοκυθιάς οφειλόμενη κυρίως στη συσσώρευση  $\text{Ca}^{2+}$  στο διάλυμα ανακύκλωσης (17-22 mM), μειώνει την απόδοση σε καρπό κατά περίπου 15% λόγω ωσμωτικής καταπόνησης. Εντούτοις, αρδευτικό νερό με περιεκτικότητα  $\text{Ca}^{2+}$  που δεν υπερβαίνει τη συγκέντρωση 3 mM, αυξάνει στη συσσώρευση  $\text{Ca}^{2+}$  στο διάλυμα ανακύκλωσης μέχρι 12 mM (μέση τιμή EC στη ρίζα σε  $3,2 \text{ dS m}^{-1}$ ) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια κολοκυθιάς.

Συνοψίζοντας, τα πιο πάνω αποτελέσματα (δηλ. διαχείρισης της θρέψης και η μοντελοποίηση της χρήσης αλατούχου νερού σε συνδυασμό με την επιλογή της καλλιέργειας), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προώθηση διαχειριστικών πρακτικών που συμβάλλουν στην αποτελεσματικότερη χρήση νερού και λιπασμάτων στα θερμοκήπια χωρίς απώλειες στη γεωργική παραγωγή και την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος, σε ευπαθή στην κλιματική αλλαγή περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από έλλειψη καλής ποιότητας νερού.

## **Βιβλιογραφία**

### **Ξενόγλωσση**

- Adams, P. (2002): Nutritional control in hydroponics, in Savvas, D., Passam, H. C. (eds.): Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals. Embryo Publications, Athens, Greece, pp. 211-261.
- An, P., Inanaga, S., Lux, A., Li, X. J., Ali M. E. K., Matsui, T., Sugimoto Y. (2002): Effects of salinity and relative humidity on two melon cultivars differing in salt tolerance. *Biol. Plantarum* 45, 409-415.
- Arnon, D. I., Stout, P. R. (1939): The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiol.* 14, 371-375.
- Ashraf, M. (2009): Biotechnological approach of improving plant salt tolerance using antioxidants as markers. *Biotechnol. Adv.* 27, 84-93.
- Ashraf, M., Harris, P. J. C. (2013): Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica* 51, 163-190.
- Baas, R., Nijssen, H. M. C., Van der Berg, T. J. M., Warmenhoven, M. G. (1995): Yield and quality of carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) and gerbera (*Gerbera jayamesonii* L.) in a closed nutrient system as affected by sodium chloride. *Sci. Hortic.* 61, 273-284.
- Baker, N. R. (2008): Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis in vivo. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59, 89-113.
- Bar-Tal, A., Aloni, B., Karni, L., Oserovotz, J., Hazan, A., Itach, M., Gantz, S., Avidan, A., Posalski, I., Tratkovski, N., Rosenberg, R. (2001a): Nitrogen nutrition of greenhouse pepper. I. Effects of nitrogen concentration and NO<sub>3</sub>:NH<sub>4</sub> ratio on yield, fruit shape, and the incidence of blossom-end rot in relation to plant material composition. *HortScience* 36, 1244-1251.

- Bar-Tal, A., Aloni, B., Karni, L., Rosenberg, R. (2001b): Nitrogen nutrition of greenhouse pepper. II. Effects of nitrogen concentration and  $\text{NO}_3\text{:NH}_4$  ratio on growth, transpiration, and nutrient uptake. HortScience 36, 1252-1259.
- Bar-Tal, A., Feigin, A., Sheinfeld, S., Rosenberg, R., Sternbaum, B., Rylski, I., Pressman, E. (1995): Root restriction and N- $\text{NO}_3$  solution concentration effects on nutrient uptake, transpiration and dry matter production of tomato. Sci. Hortic. 63, 195-208.
- Bar-Yosef, B. (2008): Fertigation management and crops response to solution recycling in semi-closed greenhouses, in Raviv, M., Lieth, J. H. (eds.): Soilless Culture: Theory and Practice. Elsevier, Amsterdam, pp. 341-424.
- Benton Jones, J. Jr. (1997): Hydroponics: A practical guide for the soilless grower. St. Lucie Press, Boca Raton, Florida, U.S.A.
- Benzie, F. F. I., Strain, J. J. (1996): The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "Antioxidant Power". The FRAP assay. Anal. Biochem. 239, 70-76.
- Benzie, F. F. I., Strain, J. J. (1999): Ferric reducing / antioxidant power assay: Direct measure of total antioxidant activity of biological fluids and modified version for simultaneous measurements of total antioxidant power and ascorbic acid concentration. Methods Enzymol. 299, 15-27.
- Bernadac, A., Jean-Baptiste, I., Bertoni, G., Morard, P. (1996): Changes in calcium contents during melon (*Cucumis melo* L.) fruit development. Sci. Hortic. 66, 181-189.
- Bolla, A., Koukourikou-Petridou, M., Voyiatzis, D., Chimonidou, D. (2009): Physiological responses associated to substrate water availability of *Rosa* 'Eurored' plants grown in soilless greenhouse conditions. Sci. Hortic. 121, 80-83.
- Bonhomme, R. (2000): Bases and limits to using 'degree day' units. Eur. J. Agron. 13, 1-10.



- Botía, P., Navarro, J. M., Cerdá, A., Martínez, V. (2005): Yield and fruit quality of two melon cultivars irrigated with saline water at different stages of development. *Eur. J. Agron.* 23, 243-253.
- Bouranis D. L., Kitsaki, C. K., Tzakosta, A. (2004): Differences in nitrate and ammonium homeostasis of reproductive and vegetative shoots of olive tree cv Kalamon during inflorescence development. *J. Plant Nutr.* 27, 797-813.
- Bouranis, D. L., Chorianopoulou, S. M., Bouranis, L. D. (2014): A power function based approach for the assessment of the sulfate deprivation impact on nutrient allocation in young maize plants. *J. Plant Nutr.* 37, 704-722.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., Berset, C. (1995): Use of free radical method to evaluate antioxidant activity. *Food Sci. Technol.* 28, 25-30.
- Butcher, J. C. (1987): *The numerical analysis of ordinary differential equations: Runge-Kutta and general linear methods.* Wiley, New York, U.S.A.
- Calatayud, A., San Bautista, A., Pascual, B., Maroto, J. V., López-Calarza, S. (2013): Use of chlorophyll fluorescence imaging as diagnostic technique to predict compatibility in melon graft. *Sci. Hortic.* 149, 13-18.
- Campbell, W. H. (1999): Nitrate reductase structure, function and regulation: Bridging the gap between biochemistry and physiology *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 50, 277–303.
- Carmassi, G., Incrocci L., Maggini R., Malorgio F., Tognoni F., Pardossi, A. (2005): Modeling salinity build-up in recirculating nutrient solution culture. *J. Plant Nutr.* 28, 431-445.
- Carmassi, G., Incrocci, L., Malorgio, M., Tognoni, F., Pardossi, A. (2003): A simple model for salt accumulation in closed loop hydroponics. *Acta Hortic.* 614, 149-154.

- Carvajal, M., Cerdá, A., Martínez, V. (2000): Does calcium ameliorate the negative effect of NaCl on melon root water transport by regulating aquaporin activity? *New Phytol.* 145, 439-447.
- Carvajal, M., del Amor, F. M., Fernandez-Ballester, G., Martínez, V., Cerdá, A. (1998): Time course of solute accumulation and water relations in muskmelon plants exposed to salt during different growth stages. *Plant Sci.* 138, 103-112.
- Cataldo, D. A., Haroon, M., Schrader, L. E., Youngs, V. L. (1975): Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 6, 71-80.
- Chen, Z., Pottosin, I. I., Cuin, T. A., Fuglsang, A. T., (.....), Shabala, S. (2007): Root plasma membrane transporters controlling  $K^+/Na^+$  homeostasis in salt-stressed barley. *Plant Physiol.* 145, 1714-1725.
- Chrispeels, M. J., Crawford, N. M., Schroeder, J. I. (1999): Proteins for transport of water and mineral nutrients across the membranes of plant cells. *Plant Cell* 11, 661-675.
- Clemens, S., Palmgren, M. G., Krämer, U. (2002): A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends Plant Sci.* 7, 1360-1385.
- Cohen, R., Burger, Y., Horev, C., Porat, A., Edelstein, M. (2005): Performance of Galia-type melons grafted on to *Cucurbita* rootstock in *Monosporascus cannonballus*-infested and non-infested soils. *Ann. Appl. Biol.* 146, 381-387.
- Colla, G., Roupael, Y., Cardarelli, M., Massa, D., Salerno, A., Rea, E. (2006): Yield, fruit quality and mineral composition of grafted melon plants grown under saline conditions. *J. Hortic. Sci. Biotechn.* 81, 146-152.
- Colla, G., Saccardo, F. (2002): Application of systematic variation method for optimizing mineral nutrition of soilless-grown zucchini squash. *J. Plant Nutr.* 26, 1859-1872.

- De Kreij, C. (1995). Latest insights into water and nutrient control in soilless cultivation. *Acta Hortic.* 408, 47-61.
- De Kreij, C., Voogt, W., Baas, R. (1999): Nutrient solutions and water quality for soilless culture. Research Station for Floriculture and Glasshouse Vegetables (PBG), Naaldwijk, The Netherlands, Brochure 196.
- De Pascale, S., Orsini, F., Pardossi, A. (2013): Irrigation water quality for greenhouse horticulture. In: Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops. Principles for Mediterranean Climate Areas. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 169-204.
- Eaton, A. D. (2005): Standard methods for the examination of water and wastewater, 21<sup>st</sup> edn, American Public Health Association, Washington, DC, U.S.A.
- Edelstein, M., Plaut Z., Ben-Hur, M. (2011): Sodium and chloride exclusion and retention by non-grafted and grafted melon and *Cucurbita* plants. *J. Exp. Bot.* 62, 177-184.
- Estefan, G., Sommer, R., Ryan, J. (2013): Methods of Soil, Plant, and Water Analysis: A manual for the West Asia and North Africa region, 3<sup>rd</sup> edn, ICARDA, Beirut, Lebanon.
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., Clark, R. B. (2002): Micronutrients in crop production. *Adv. Agron.* 77, 185-268.
- Fageria, N. K., Moreira, A. (2011): The role of mineral nutrition on root growth of crop plants. *Adv. Agron.* 110, 251-331.
- FAO, (2013): Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops. FAO Plant Production and Protection Paper 217. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Flexas, J., Bota, J., Cifre, J., Escalona, J. M., Galmés, J., Gulías, J., Lefi, E. K., Martínez-Cañellas, S. F., Moreno, M. T., Ribas-Carbó, M., Riera, D., Sampol, B., Medrano, H. (2004): Understanding down-regulation of photosynthesis under water stress: future

- prospects and searching for physiological tools for irrigation management. *Ann. Appl. Biol.* 144, 273-283.
- Flexas, J., Escalona, J. M., Medrano, H. (1999): Water stress induces different levels of photosynthesis and electron transport rate regulation in grapevines. *Plant Cell Environ.* 22, 39–48.
- Flexas, J., Medrano, H. (2002): Energy dissipation in C<sub>3</sub> plants under drought. *Funct. Plant Biol.* 29, 1209-1215.
- Flowers, T. (2006): Plants and salinity - preface. *J. Exp. Bot.* 57 (5), iv-iv. doi: 10.1093/jxb/erj119.
- Flowers, T. J., Colmer, T. D. (2015): Plant salt tolerance: adaptations in halophytes. *Ann. Bot.* 115, 327-331.
- Flowers, T. J. (2004): Improving crop salt tolerance. *J. Exp. Bot.* 55, 307–319.
- Flowers, T. J., Munns, R., Colmer, T. D. (2015): Sodium chloride toxicity and the cellular basis of salt tolerance in halophytes. *Ann. Bot.* 115, 419– 431
- Gassmann, W., Schroeder, J. I. (1994): Inward-rectifying K<sup>+</sup> channels in root hairs of wheat: a mechanism for aluminum-sensitive low-affinity K<sup>+</sup> uptake and membrane potential control. *Plant Physiol.* 105, 1399-1408.
- Gianquinto, G., Muñoz, P., Pardossi, A., Ramazzotti, S., Savvas, D. (2013): Soil fertility and plant nutrition. In: *Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops. Principles for Mediterranean Climate Areas.* Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, pp. 205-269.
- Gierth, M., Mäserb, P. (2007): Potassium transporters in plants — Involvement in K<sup>+</sup> acquisition, redistribution and homeostasis. *FEBS Lett.* 581, 2348–2356.
- Gouaux, E., MacKinnon, R. (2005): Principles of selective ion transport in channels and pumps. *Science* 310, 1461-1465.

- Grattan, S. R., Grieve, C. M. (1999): Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. *Sci. Hortic.* 78, 127–157.
- Graves, C. J. (1983): The nutrient film technique. *Hort. Rev.* 5, 1-44.
- Guo, W., Nazim, H., Liang, Z., Yang, D. (2016): Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. *Crop J.* 4, 83-91.
- Haneklaus, S., Bloem, E., Schnug, E. (2007): Sulfur interactions in crop ecosystems, in Hawkesford, M. J., De Kok, L. J. (eds.): *Sulfur in Plants: An Ecological Perspective*, Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 17-58.
- Hawkesford, M. J. (2007): Sulfur and plant ecology: a central role of sulfate transporters in responses to sulfur availability, in Hawkesford, M. J., De Kok, L. J. (eds.): *Sulfur in Plants: An Ecological Perspective*, Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 1-15.
- He, Y., Zhu, Z., Yang, J., Ni, X., Zhu, B. (2009): Grafting increases the salt tolerance of tomato by improvement of photosynthesis and enhancement of antioxidant enzymes activity. *Environ. Exp. Bot.* 66, 270-278.
- Hoefgen, R., Hesse, H. (2007): Sulfur in plants as part of a metabolic network, in Hawkesford, J., De Kok, L. J. (eds.): *Sulfur in Plants: An Ecological Perspective*, Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 107-142.
- Hsiao, T. C. (1973): Plant responses to water stress. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 24, 519-570.
- Hu, Y., Schmidhalter, U. (2005): Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168, 541-549.
- Iglesias, A., Garrote, L., Flores, F., Moneo, M. (2007): Challenges to manage the risk of water scarcity and climate change in the Mediterranean. *Water Resour. Manag.* 21, 227-288.

- Incrocci, L., Massa, D., Pardossi, A., Bacci, L., Battista, P., Rapi, B., Romani, M. (2012): A decision support system to optimise fertigation management in greenhouse crops. *Acta Hortic.* 927, 115-122.
- IPCC, (2014): *Climate Change 2014: Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)], Geneva, Switzerland.
- Kalra, Y. P. (1998): *Handbook of reference methods for plant analysis*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Katsoulas N., Elvanidi A., Ferentinos K. P., Kacira M., Bartzanas T., Kittas C. (2016): Crop reflectance monitoring as a tool for water stress detection in greenhouses: A review. *Biosyst. Eng.* 151, 374-398.
- Katsoulas, N., Kittas, C., Dimokas, G., Lykas, Ch. (2006): Effect of irrigation frequency on rose flower production and quality. *Biosyst. Eng.* 93, 237-244.
- Katsoulas, N., Savvas, D., Kitta, E., Bartzanas, T., Kittas, C. (2015): Extension and evaluation of a model for automatic drainage solution management in tomato crops grown in semi-closed hydroponic systems. *Comput. Electron. Agric.* 113, 61-71.
- Kaya, C., Higgs, D., Kirnak, H., Tas, I. (2003): Ameliorative effect of calcium nitrate on cucumber and melon plants drip irrigated with saline water. *J. Plant Nutr.* 26, 1665-1681.
- Kempkes, F., Stanghellini, C. (2003): Modeling salt accumulation in closed system: a tool for management with irrigation water of poor quality. *Acta Hortic.* 614, 143-148.
- King, B. J., Siddiqi, M.Y., Ruth, T. J., Warner, R. L., Glass, A. D. M. (1993): Feedback regulation of nitrate influx in barley roots by nitrate, nitrite, and ammonium. *Plant Physiol.* 102, 1279-1286.
- Koide, R. T., Robichaux, R. H., Morse, S. R., Smith C. M. (1991): Plant water status, hydraulic resistance and capacitance, in Percy R. W., Ehleringer, J., Mooney H. A.,

- Rundel, P. W. (eds.): *Plant Physiological Ecology: Field Methods and Instrumentation*. Chapman and Hall, London, pp. 161-183.
- Larcher, W., (1980): *Physiological plant ecology*, 2<sup>nd</sup> totally revised edn, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Läuchli, A., Grattan, S. R. (2007): Plant growth and development under salinity stress, in Jecks, M. A., Hasegawa, P. A., Jain, S. M. (eds.): *Advances in molecular breeding toward drought and salt tolerant crops*. Springer-Verlag, Amsterdam, The Netherlands, pp. 1-32.
- Lawlor, D. W. (2002): Limitations to photosynthesis in water-stressed leaves: stomata vs. metabolism and the role of ATP. *Ann. Bot.* 89, 871-885.
- Le Bot, J., Adamowicz, S., Robin, P. (1998): Modelling plant nutrition of horticultural crops: a review. *Sci. Hortic.* 74, 47-82.
- Lee, J. M. (1994): Cultivation of grafted vegetables I. Current status, grafting methods, and benefits. *HortScience* 29, 235-239.
- Lichtenthaler, H. K. (1987): Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Meth. Enzymol.* 148, 350-382.
- Lieten, P. (2006): Effect of K:Ca:Mg ratio on performance of 'Elsanta' strawberries grown on peat. *Acta Hortic.* 708, 397-400.
- Magán, J. J., Casas E., Gallardo M., Thompson R. B., Lorenzo P. (2005): Uptake concentrations of a tomato crop in different salinity conditions. *Acta Hortic.* 697, 365-369.
- Magán, J. J., Gallardo, M., Thompson, R. B., Lorenzo, P. (2008): Effects of salinity on fruit yield and quality of tomato grown in soil-less culture in greenhouses in Mediterranean climatic conditions. *Agric. Water Manage.* 95, 1041-1055.
- Marschner, H. (1995): *Mineral Nutrition of Higher Plants*, 2<sup>nd</sup> edn, Academic Press, London, UK.

- Massa, D., Incrocci, L., Maggini, R., Bibbiani, C., Carmassi, G., Malorgio, F., Pardossi, A. (2011): Simulation of crop water and mineral relations in greenhouse soilless culture. *Environ. Modell. Softw.* 26, 711-722.
- Massa, D., Incrocci, L., Maggini, R., Carmassi, G., Campiotti, C. A., Pardossi, A. (2010): Strategies to decrease water drainage and nitrate emission from soilless cultures of greenhouse tomato. *Agric. Water Manage.* 97, 971–980.
- Massa, D., Mattson, N. S., Lieth, H. (2008): An empirical model to simulate sodium absorption in roses growing in a hydroponic system. *Sci. Hortic.* 118, 228-235.
- Mavrogiannopoulos, G. N., Spanakis, J., Tsikalas, P. (1999): Effect of carbon dioxide enrichment and salinity on photosynthesis and yield in melon. *Sci. Hortic.* 79, 51-63.
- Maxwell, K., Johnson, G. N. (2000): Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *J. Exp. Bot.* 345, 659-668.
- McLaughlin, S. B., Wimmer, R. (1999): Transley Review No. 104, Calcium physiology terrestrial ecosystems processes. *New Phytol.* 142, 373-417.
- Mengel, K., Kirkby, E. A. (2001): Principles of plant nutrition, 5<sup>th</sup> edn, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Mills, H. A., Jones, J. Jr. (1996): Plant Analysis Handbook II. Micro-Macro Publishing, Inc., Athens, GA, U.S.A.
- Mimura, T. (1995): Homeostasis and transport of inorganic phosphate in plants. *Plant Cell Physiol.* 36, 1–7.
- Munns, R. (2002): Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell and Environ.* 25, 239-250.
- Navarro, J. M., Botella, M. A., Cerdá, A., Martínez, V. (2000): Effect of salinity × calcium interaction on cation balance in melon plants grown under two regimes of orthophosphate. *J. Plant Nutr.* 23, 991-1006.



- Neocleous, D., Koukounaras, A., Siomos, A. S., Vasilakakis, M. (2014): Assessing the salinity effects on mineral composition and nutritional quality of green and red "baby" lettuce. *J. Food Qual.* 37, 1-8.
- Neocleous, D., Ntatsi, G., Savvas, D. (2017): Physiological, nutritional and growth responses of melon (*Cucumis melo* L.) to a gradual salinity built-up in recirculating nutrient solution. *J. Plant Nutr.* (under press).
- Neocleous, D., Savvas, D. (2013a): Assessment of different strategies to balance high Mg levels in the irrigation water when preparing nutrient solution for soilless strawberry crops. *Eur. J. Hortic. Sci.* 78, 267-274.
- Neocleous, D., Savvas, D. (2013b): Response of hydroponically-grown strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) plants to different K:Ca:Mg ratios in the nutrient solution. *J. Hortic. Sci. Biotechn.* 88, 293-300.
- Neocleous, D., Savvas, D. (2015): Effect of different macronutrient cation ratios on macronutrient and water uptake by melon (*Cucumis melo*) grown in recirculating nutrient solution. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 178, 320–332.
- Neocleous, D., Savvas, D. (2016): NaCl accumulation and macronutrient uptake by a melon crop in a closed hydroponic system in relation to water uptake. *Agric. Water Manage.* 165, 22-32.
- Neocleous, D., Savvas, D. (2017): Simulating NaCl accumulation in a closed hydroponic crop of zucchini: Impact on macronutrient uptake, growth, yield and photosynthesis. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* (doi: 10.1002/jpln.201600338).
- Neocleous, D., Vasilakakis, M. (2007): Effects of NaCl on red raspberry (*Rubus idaeus* L. ‘Autumn Bliss’). *Sci. Hortic.* 112, 282-289.
- Neocleous, D., Vasilakakis, M. (2012): Effects of cultivars and substrates on soilless strawberry production in Cyprus. *Acta Hortic.* 926, 435-440.

- Orsini, F., Sanoubar R., Oztekin G. B., Kappel N., Tepecik M., Quacquarelli C., Tuzel Y., Bona S., Gianquinto, G. (2013): Improved stomatal regulation and ion partitioning boosts salt tolerance in grafted melon. *Funct. Plant Biol.* 40, 628-636.
- Papadopoulos, A. P., Hao, X. (2002): Interactions between nutrition and environmental control in hydroponics, in Savvas, D., Passam, H. C. (eds.): *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*. Embryo Publications, Athens, Greece, pp. 413-445.
- Pardossi, A. P., Giacomet, P., Malorgio, F., Albini, F. M., Murelli, C., Serra, G., Vernieri, P., Tognoni, F. (2000): The influence of growing season on fruit yield and quality of greenhouse melon (*Cucumis melo* L.) grown in nutrient film technique in a Mediterranean climate. *J. Hortic. Sci. Biotechn.* 75, 488-493.
- Pardossi, A., Falossi, F., Malorgio, F., Incrocci, L., Bellocchi, G. (2004): Empirical models of macronutrient uptake in melon plants grown in recirculating nutrient solution culture. *J. Plant Nutr.* 27, 1261-1280.
- Pardossi, A., Malorgio, F., Incrocci, L., Campiotti, C. A., Tognoni, F. (2002): A comparison between two methods to control nutrient delivery to greenhouse melons grown in recirculating nutrient solution culture. *Sci. Hortic.* 92, 89-95.
- Pardossi, A., Malorgio, F., Incrocci, L., Carmassi, G., Maggini, R., Massa, D., Tognoni, F., (2006): Simplified models for the water relations of soilless cultures: What they do or suggest for sustainable water use in intensive horticulture. *Acta Hortic.* 718, 425-434.
- Parida, K. A., Das, B. A. (2005): Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 60, 324-349.
- Plank, C.O. (1992): *Plant Analysis Reference Procedures for the Southern Region of the United States*. Southern Cooperative Series Bulletin 368. University of Georgia, Athens, GA, U.S.A.

- Raviv, M., Krasnovsky A., Medina S., Reuveni R. (1998): Assessment of various control strategies for recirculation of greenhouse effluents under semi-arid conditions. *J. Hortic. Sci.* 73, 485-491.
- Raviv, M., Lieth, J. H. (2008): *Soilless Culture: Theory and Practice*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Rodriguez, J. C., Cantliffe, D. J., Shaw, N. L. (2006): Soilless media and containers for greenhouse production of 'Galia' type muskmelon. *HortScience* 41, 1200-1205.
- Rouphael, Y., Cardarelli, M., Colla, G., Rea, E. (2008): Yield, mineral composition, water relations, and water use efficiency of grafted mini-watermelon plants under deficit irrigation. *HortScience* 43, 730-736.
- Rouphael, Y., Cardarelli, M., Rea, E., Battistelli, A., Colla, G. (2006): Comparison of the subirrigation and drip-irrigation systems for greenhouse zucchini squash production using saline and non-saline nutrient solutions. *Agric. Water Manage.* 82, 99-117.
- Rouphael, Y., Cardarelli, M., Rea, E., Colla, G. (2012): Improving melon and cucumber photosynthetic activity, mineral composition, and growth performance under salinity stress by grafting onto *Cucurbita* hybrid rootstocks. *Photosynthetica* 50, 180-188.
- Rouphael, Y., Colla, G. (2005): Growth, yield, fruit quality and nutrient uptake of hydroponically cultivated zucchini squash as affected by irrigation systems and growing seasons. *Sci. Hortic.* 105, 177-195.
- Rouphael, Y., Colla, G. (2009): The influence of drip irrigation or subirrigation on zucchini squash grown in closed-loop substrate culture with high and low nutrient solution concentrations. *HortScience* 44, 306-311.
- Rouphael, Y., Colla, G., Battistelli, A., Moscatello, S., Proietti, S., Rea, E. (2004): Yield, water requirement, nutrient uptake and fruit quality of zucchini squash grown in soil and closed soilless culture. *J. Hortic. Sci. Biotech.* 79, 423-430.

- Ruiz, J. M., Belakbir, A., López-Cantarero, I., Romero, L. (1997): Leaf-macronutrient content and yield in grafted melon plants. A model to evaluate the influence of rootstock genotype. *Sci. Hortic.* 71, 227-234.
- San Bautista, A., López-Galarza, S., Martínez, A., Pascual, B., Maroto, J. V. (2009): Influences of cation proportions of the nutrient solutions on tipburn incidence in strawberry plants. *J. Plant Nutr.* 32, 1527-1539.
- Sánchez-Rodríguez, J., Martínez-Carrasco, R., Pérez, P. (1997): Photosynthetic electron transport and carbon-reduction-cycle enzyme activities under long-term drought stress in *Casuarina equisetifolia* Forst. & Forst. *Photosynth. Res.* 52, 255-262.
- Savvas, D. (2002a): Automated replenishment of recycled greenhouse effluents with individual nutrients in hydroponics by means of two alternative models. *Biosyst. Eng.* 83, 225-236.
- Savvas, D. (2002b): Nutrient solution recycling, in Savvas, D., Passam, H. C. (eds.): *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*. Embryo Publications, Athens, Greece, pp. 299-343.
- Savvas, D., Adamidis, K. (1999): Automated management of nutrient solutions based on target electrical conductivity, pH, and nutrient concentration ratios. *J. Plant Nutr.* 23, 1415-1432.
- 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. *Biosyst. Eng.* 99, 282-291.
- Savvas, D., Colla, G., Roupael, Y., Schwarz, D. (2010): Amelioration of heavy metal and nutrient stress in fruit vegetables by grafting. *Sci. Hortic.* 127, 156-161.
- Savvas, D., Gianquinto, G. P., Tüzel, Y., Gruda, N. (2013): Soilless Culture. In: *Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops. Principles for Mediterranean*

- Climate Areas. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, pp. 303-354.
- Savvas, D., Giotis, D., Chatzieustratiou, E., Bakea, M., Patakioutas, G. (2009): Silicon supply in soilless cultivations of zucchini alleviates stress induced by salinity and powdery mildew infections. *Environ. Exp. Bot.* 65, 11-17.
- Savvas, D., Gizas, G. (2002): Response of hydroponically grown gerbera to nutrient solution recycling and different nutrient cation ratios. *Sci. Hortic.* 96, 267-280.
- Savvas, D., Kotsiras, A., Meletiou, G., Margariti, S., Tsirogiannis, I. (2005a): Modelling the relationship between water uptake by cucumber and NaCl accumulation in a closed hydroponic system. *HortScience* 40, 802-807.
- Savvas, D., Lenz, F. (2000): Effects of NaCl or nutrient-induced salinity on growth, yield, and composition of eggplants grown in rockwool. *Sci. Hortic.* 84, 37-47.
- Savvas, D., Manos, G. (1999): Automated composition control of nutrient solution in soilless culture systems. *J. Agric. Engin. Res.* 73, 29-33.
- 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. Hortic.* 111, 311-318.
- Savvas, D., Pappa, V. A., Kotsiras, A., Gizas, G. (2005b): NaCl accumulation in a cucumber crop grown in completely closed hydroponic system as influenced by NaCl concentration in irrigation water. *Eur. J. Hortic. Sci.* 70, 217-223.
- Savvas, D., Savva, A., Ntatsi, G., Ropokis, A., Karapanos, I., Krumbein, A., Olympios, C. (2011): Effects of three commercial rootstocks on mineral nutrition, fruit yield, and quality of salinized tomato. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 174, 154-162.

- Savvas, D., Tsirogiannis, I. L., Gizas, G., Petropoulos, N., Koukladas, S., Sigrimis, N. (2006): Exploring a model relating the accumulation of NaCl with the water consumption in closed hydroponic systems. *Acta Hort.* 718, 453-460.
- Scalbert, A., Monties, B., Janin, G. (1989): Tannins in wood: Comparison of different estimation methods. *J. Agric. Food Chem.* 37, 1324-1329.
- Schachtman, D. P., Reid, R. J., Ayling, S. M. (1998): Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. *Plant Physiol.* 116, 447-453.
- Schmidt, W. (1999): Mechanisms and regulation of reduction-based iron uptake in plants. *New Phytol.* 141, 1-26.
- Schnitzler, W. H., Gruda, N. (2002): Hydroponics and product quality, in Savvas, D., Passam, H. C. (eds.): *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*. Embryo Publications, Athens, Greece, pp. 373-414.
- Schreiber, U., Bilger, W., Neubauer, C. (1994): Chlorophyll fluorescence as a noninvasive indicator for rapid assessment of in vivo photosynthesis, in Schulze, E. D., Caldwell, M. M. (eds.): *Ecophysiology of Photosynthesis*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 49-70.
- Schröder, F. G., Lieth, J. H. (2002): Irrigation control in hydroponics, in Savvas, D., Passam, H. C. (eds.): *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*. Embryo Publications, Athens, Greece, pp. 263-298.
- Schwarz, D., Roupael, Y., Colla, G., Venema, J. H. (2010): Grafting as a tool to improve tolerance of vegetables to abiotic stresses: Thermal stress, water stress and organic pollutants. *Sci. Hort.* 127, 162-171.
- Shabala, L., Zhang, J., Pottosin, I., Bose J., (.....), Shabala, S. (2016): Cell-Type-Specific H<sup>+</sup>-ATPase activity in root tissues enables K<sup>+</sup> retention and mediates acclimation of barley (*Hordeum vulgare*) to salinity stress. *Plant Physiol.* 172, 2445-2458.

- Shannon, M. C., Grieve, C. M. (1999): Tolerance of vegetable crops to salinity. *Sci. Hortic.* 78, 5-38.
- Shewmaker, G. E., Johnson, D. A., Mayland, H. F. (2008): Mg and K effects on cation uptake and dry matter accumulation in tall fescue (*Festuca arundinacea*). *Plant Soil* 302, 283-295.
- Shi, H., Quintero, F. J., Pardo, J. M., Zhu, J -K. (2002): The putative plasma membrane Na<sup>+</sup>-H<sup>+</sup> antiporter SOS1 controls long-distance Na<sup>+</sup> transport in plants. *Plant Cell* 14, 465-477.
- Signore, A., Serio, F., Santamaria, P. (2016): A targeted management of the nutrient solution in a soilless tomato crop according to plant needs. *Front. Plant Sci.* 7:391.
- Silber, A., Bar-Tal, A. (2008): Nutrition of substrate-grown plants, in Raviv, M., Lieth, J. H. (eds.): *Soilless Culture: Theory and Practice*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 291-339.
- Silberbush, M., Ben-Asher, J. (2001): Simulation study of nutrient uptake by plants from soilless culture as affected by salinity built up and transpiration. *Plant Soil* 233, 59-69.
- 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 Soil* 271, 309-319.
- Sivritepe, H. Ö., Sivritepe, N., Eriş, A., Turhan, E. (2005): The effects of NaCl pre-treatments on salt tolerance of melons grown under long-term salinity. *Sci. Hortic.* 106, 568-581.
- Sonneveld, C. (2000): Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture. PhD Thesis. University of Wageningen, The Netherlands.
- Sonneveld, C. (2002): Composition of nutrient solution, in Savvas, D., Passam, H. C. (eds.): *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*. Embryo Publications, Athens, Greece, pp. 179-210.
- Sonneveld, C., Baas R., Nijssen, H. M. C., De Hoog, J. (1999): Salt tolerance of flower crops grown in soilless culture. *J. Plant Nutr.* 22, 1033-1048.

- Sonneveld, C., Straver, N. (1994): Nutrient solutions for vegetables and flowers grown in water or substrates. Research Station for Floriculture and Glasshouse Vegetables, Aalsmeer/Naaldwijk, The Netherlands.
- Sonneveld, C., Voogt, W. (1985): Growth and cation absorption of some fruit-vegetable crops grown on rockwool as affected by different cation ratios in the nutrient solution. *J. Plant Nutr.* 8, 585-602.
- Sonneveld, C., Voogt, W. (2009): Plant nutrition of greenhouse crops. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Taiz, L., Zeiger, E. (2002): Plant physiology, 3<sup>rd</sup> edn, Sinauer Associates, Inc., Sunderland, Massachusetts, U.S.A.
- Tedeschi, A., Lavini, A., Riccardi, M., Pulvento, C., d'Andria, R. (2011): Melon crops (*Cucumis melo* L., cv. Tendral) grown in a Mediterranean environment under saline-sodic conditions: Part I. Yield and quality. *Agric. Water Manage.* 98, 1329-1338.
- Tester, N., Davenport, R. (2003): Na<sup>+</sup> tolerance and Na<sup>+</sup> transport in higher plants. *Ann. Bot.* 91, 503-527.
- Thompson, R. B., Gallardo, M., Rodríguez, J. S., Sánchez, J. A., Magán, J. J. (2013): Effect of N uptake concentration on nitrate leaching from tomato grown in free-draining soilless culture under Mediterranean conditions. *Sci. Hortic.* 150, 387-398.
- Tzerakis, K., 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.
- Van Os, E., Gieling, T. H., Lieth, L. H. (2008): Technical equipment in soilless production systems, in Raviv, M., Lieth, J. H. (eds.): *Soilless Culture: Theory and Practice*. Elsevier, Amsterdam, pp. 157-207.



- Varlagas, H., Savvas, D., Mouzakis, G., Liotsos, C., Karapanos, I., Sigrimis, N. (2010): Modelling uptake of  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  by tomato in closed-cycle cultivation systems as influenced by irrigation water salinity. *Agric. Water Manage.* 97, 1242-1250.
- Von Caemmerer, S., Farquhar, G. D. (1981): Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. *Planta* 153, 376-387.
- Wahome, P.K. (2003): Mechanisms of salt (NaCl) stress tolerance in horticultural crops – a mini review. *Acta Hort.* 609, 127-131.
- White, P. J. (1998): Calcium channels in the plasma membrane of root cells. *Ann. Bot.* 81, 173-183.
- White, P. J., Broadley, M. R. (2001): Chloride in soils and its uptake and movement within the plant: a review. *Ann. Bot.* 88, 967–988.
- White, P. J., Broadley, M. R. (2003): Calcium in plants. *Ann. Bot.* 92, 487–511.
- Yamaguchi, T., Blumwald, E. (2005). Developing salt-tolerant crop plants: challenges and opportunities. *Trends Plant Sci.* 10, 615-620.

## **Ελληνική**

- Γκανή-Σπυροπούλου, Κ. (2003): Πρόσληψη και μεταφορά ιόντων. *Φυσιολογία φυτών: από το μόριο στο περιβάλλον* (επιμ. έκδοσης Ρουμπελάκη-Αγγελάκη, Κ. Α.), Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο, σ. 99-122.
- Θερίος, Ι. (1996): *Ανόργανη θρέψη και λιπάσματα*. Εκδόσεις Δεδούση, Θεσσαλονίκη.
- Καραμπουρνιώτης, Γ. Α. (2003): *Φυσιολογία Καταπονήσεων των φυτών: Οι λειτουργίες των φυτών κάτω από αντίξοες συνθήκες*. Εκδόσεις Έμβρυο, Αθήνα.
- Καράταγλης, Σ. (1992): *Φυσιολογία Φυτών*. Εκδόσεις Art of Text, Θεσσαλονίκη.
- Κουκουλάκης, Π. Χ., Παπαδόπουλος, Α. Η. (2003): *Η Ερμηνεία της Φυλλοδιαγνωστικής*. Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα.

- Κωνσταντινίδου, Ε. –Ι. (2003): Φυσιολογία αβιοτικών καταπονήσεων. Φυσιολογία φυτών: από το μόριο στο περιβάλλον (επιμ. έκδοσης Ρουμπελάκη-Αγγελάκη, Κ. Α.), Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο, σ. 555-620.
- Μαυρογιαννόπουλος, Γ. (2006): Υδροπονικές εγκαταστάσεις. Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα.
- Νεοκλέους, Δ. (2014): Εγχειρίδιο Υδροπονίας – Εκπαιδευτικό Κέντρο Υδροπονίας ΠΕ. Εκδόσεις Γραφείου Τύπου και Πληροφοριών, Λευκωσία.
- Ολύμπιος, Χ.Μ. (2001): Η τεχνική της καλλιέργειας των κηπευτικών στο θερμοκήπιο. Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα.
- Σάββας, Δ. (2012): Καλλιέργειες εκτός εδάφους: Υδροπονία, Υποστρώματα. Εκδόσεις ΑγρόΤύπος, Αθήνα.
- Τσέκος, Ι., (2004): Φυσιολογία φυτών: Το κύτταρο ως ενεργητικό σύστημα, φαινόμενα μεταφοράς, μεταβολισμός, αύξηση και ανάπτυξη, μοριακή φυσιολογία, 2<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη.