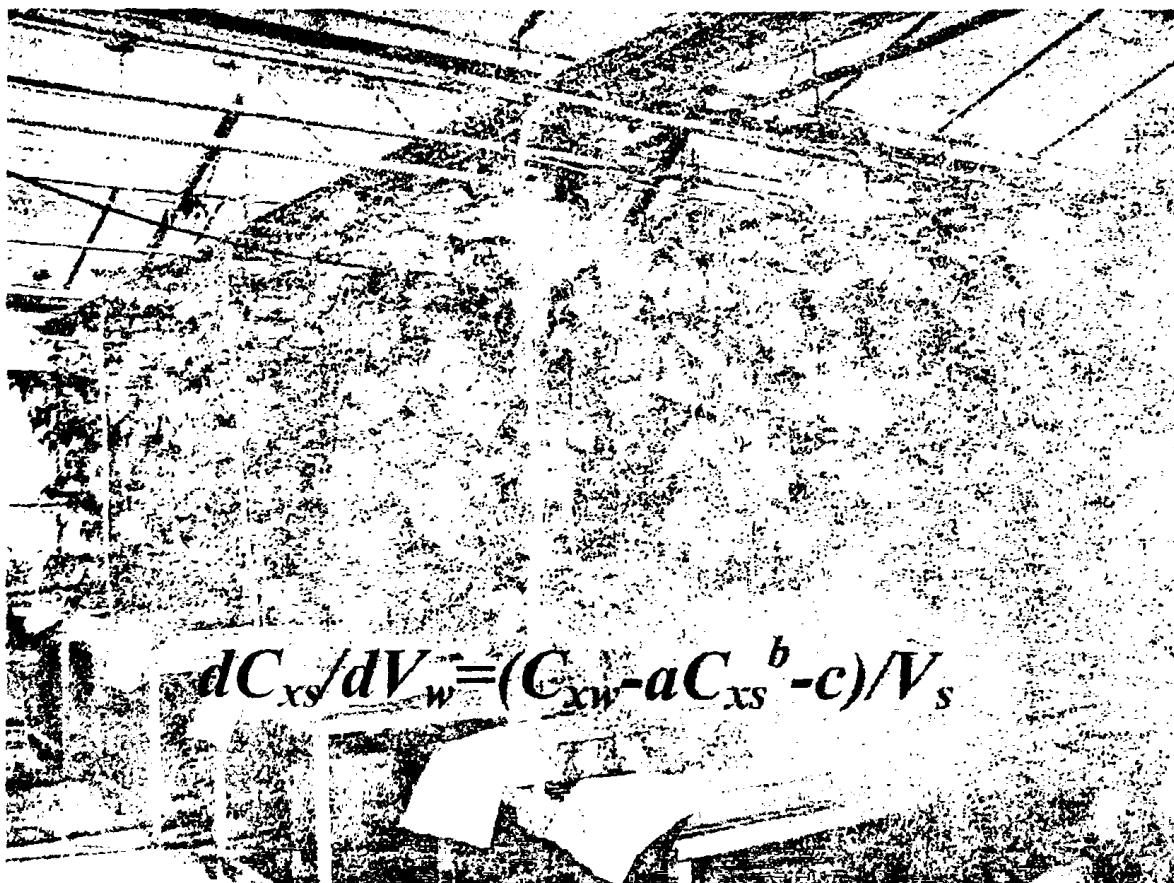


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:
“ΑΓΡΟΧΗΜΕΙΑ ΚΑΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ”
ΤΜΗΜΑ: ΧΗΜΕΙΑΣ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Ανάπτυξη και έλεγχος αξιοπιστίας ενός μαθηματικού μοντέλου για
την πρόβλεψη του ρυθμού συσσώρευσης αλάτων στο ανακυκλούμενο
θρεπτικό διάλυμα σε μια καλλιέργεια φασολιού σε κλειστό
υδροπονικό σύστημα

ΜΑΝΤΖΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΑΡΤΑ 2006



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:
“ΑΓΡΟΧΗΜΕΙΑ ΚΑΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ”
ΤΜΗΜΑ: ΧΗΜΕΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Ανάπτυξη και έλεγχος αξιοπιστίας ενός μαθηματικού μοντέλου για
την πρόβλεψη του ρυθμού συσσώρευσης αλάτων στο
ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα σε μια καλλιέργεια φασολιού σε
κλειστό υδροπονικό σύστημα

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Σάββας Δημήτριος (επιβλέπων) Επίκουρος καθηγητής Γ. Π. Α.

Αλπμάνης Τριαντάφυλλος Καθηγητής Παν/μίου Ιωαννίνων

Μάνος Γεώργιος Καθηγητής Τ. Ε. Ι. Ηπείρου

ΜΑΝΤΖΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Άρτα 2006



1. The first step is to identify the problem. This involves understanding the current situation and the goals that need to be achieved.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε υδροπονική εγκατάσταση καλλιεργήθηκαν φασόλια (*Phaseolus vulgaris* L.) σε τέσσερις διαφορετικές μεταχειρίσεις, σε κάθε μία εκ των οποίων τα θρεπτικά διαλύματα παρασκευάζονταν με τη χρήση αρδευτικού νερού με διαφορετική συγκέντρωση NaCl (0,8, 3,0, 6,0 και 9,0 mM). Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε 12 ανεξάρτητα μεταξύ τους, κλειστά υδροπονικά συστήματα (τρεις επαναλήψεις σε κάθε μεταχείριση). Κάθε υδροπονικό σύστημα αποτελούνταν από δύο κανάλια καλλιέργειας και σε κάθε κανάλι εγκαταστάθηκαν 80 φυτά φασολιού. Καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος τα διαλύματα απορροής συλλέγονταν και ανακυκλώνονταν. Οι ποσότητες των θρεπτικών στοιχείων που χρειαζόταν για την αναπλήρωση αυτών που απορροφούσαν τα φυτά εκχύνονταν αυτόματα μέσω ειδικού προγράμματος Η/Υ και ήταν οι ίδιες σε όλες τις μεταχειρίσεις. Αρχικά, η ανακύκλωση των διαλυμάτων απορροής είχε σαν αποτέλεσμα τη γρήγορη αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) στο περιβάλλον των ριζών (όπως αυτή μετρούνταν στα διαλύματα απορροής) λόγω της συσσώρευσης NaCl. Περίπου 60 – 70 ημέρες μετά την έναρξη της ανακύκλωσης όμως, ο ρυθμός αύξησης της EC μειώθηκε και τελικά μηδενίστηκε, οπότε η EC έφθασε σε μία μέγιστη τιμή, η οποία εξαρτώνταν από τη συγκέντρωση του NaCl στο νερό άρδευσης. Παρόμοια με την EC, οι συγκεντρώσεις των ιόντων Na και Cl στο περιβάλλον των ριζών (όπως αυτές μετρούνταν στα διαλύματα απορροής) αυξήθηκαν γρήγορα στην αρχή. Η αύξηση αυτή είχε σαν αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης νερού και την αύξηση των αναλογιών απορρόφησης Na/νερό και Cl/νερό από τα φυτά στις μεταχειρίσεις με τα υψηλότερα επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης. Καθώς οι αναλογίες απορρόφησης των δύο ιόντων εξισορροπήθηκαν με την αναλογία NaCl/νερό στο νερό άρδευσης οι συγκεντρώσεις των ιόντων Na και Cl στο χώρο των ριζών έφτασαν στα μέγιστα επίπεδα για κάθε μεταχείριση. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις των ιόντων Na και Cl στο χώρο των ριζών και οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις του NaCl στο νερό άρδευσης κάθε μεταχείρισης χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστεί η σχέση μεταξύ των εξωτερικών συγκεντρώσεων NaCl και των αναλογιών απορρόφησης Na/νερό και Cl/νερό. Η σχέση για το Na αποδείχθηκε εκθετική, ενώ για το Cl γραμμική. Οι σχέσεις



αυτές χρησιμοποιήθηκαν σε ένα προϋπάρχον μαθηματικό μοντέλο, το οποίο προβλέπει τις συγκεντρώσεις των ιόντων Na και Cl στο περιβάλλον των ριζών ως συνάρτησή με την αθροιστική κατανάλωση νερού από τα φυτά. Οι καμπύλες που προβλέφθηκαν από το μοντέλο ήταν ελλειψοειδείς, με μια αρχική, γρήγορη αύξηση των συγκεντρώσεων των ιόντων Na και Cl στο περιβάλλον των ριζών, η οποία ακολουθούνταν από μια σταδιακή εξισορρόπηση καθώς η κατανάλωση νερού από τα φυτά αυξάνονταν. Οι προβλέψεις του μοντέλου ήταν πιο ακριβείς στις μεταχειρίσεις με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις NaCl στο νερό άρδευσης, ενώ και στις μεταχειρίσεις με χαμηλές συγκεντρώσεις NaCl οι προβλέψεις του μοντέλου θεωρούνται αποδεκτές για εμπορικά υδροπονικά συστήματα. Οι συγκεντρώσεις των ιόντων Na και Cl στα νεαρά φύλλα δείχνουν ότι το φασόλι αποκλείει έντονα τα ιόντα Na από την ανώτερη κόμη του φυτού, ενώ αυτό συμβαίνει σε πολύ μικρότερο βαθμό με το χλώριο. Οι συγκεντρώσεις των μακροκατιόντων (K, Ca και Mg) τόσο στο περιβάλλον των ριζών όσο και στα νεαρά φύλλα των φυτών δεν επηρεάσθηκαν από τη σταδιακή αύξηση της αλατότητας, ενώ αντίθετα η βλαστική ανάπτυξη μειώθηκε σε βαθμό ανάλογο με αυτόν που παρατηρήθηκε όταν φυτά φασολιού εκτέθηκαν σε αντίστοιχα, αλλά σταθερά, επίπεδα αλατότητας. Η συνολική παραγωγή μειώθηκε με την αύξηση της αλατότητας, τόσο λόγω μείωσης του μέσου βάρους των καρπών, όσο και λόγω μείωσης του αριθμού των καρπών ανά φυτό.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

1.1. Υδροπονία	1
1.1.1. Ορισμός	1
1.1.2. Ιστορική αναδρομή	1
1.1.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των υδροπονικών καλλιεργειών	3
1.1.4. Συστήματα υδροπονίας	5
1.1.4.1. Καλλιέργεια σε καθαρό θρεπτικό διάλυμα	6
1.1.4.2. Καλλιέργεια σε στερεά υποστρώματα	7
1.1.5. Υποστρώματα υδροπονίας	7
1.1.5.1. Ιδιότητες υποστρωμάτων	7
1.1.5.2. Υλικά υποστρωμάτων	10
1.1.5.3. Ελαφρόπετρα	10
1.1.6. Ποιότητα νερού	12
1.1.7. Θρεπτικά διαλύματα	12
1.1.7.1. Θρεπτικά ανόργανα στοιχεία	12
1.1.7.2. Χρησιμοποιούμενα λιπάσματα	14
1.1.7.3. Βασικές αρχές σύνθεσης θρεπτικών διαλυμάτων	16
1.1.7.4. Παροχή θρεπτικών στοιχείων σε κλειστά υδροπονικά συστήματα	24
1.2. Αλατότητα	26
1.2.1. Ορισμός	26
1.2.2. Δημιουργία υψηλής αλατότητας	26
1.2.3. Προβλήματα που προκαλεί η αλατότητα στα καλλιεργούμενα φυτά	27
1.2.3.1. Μείωση του υδατικού δυναμικού στο περιβάλλον των ριζών	27
1.2.3.2. Επίδραση της αλατότητας στην απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων	28
1.2.3.3. Επίδρασεις της αλατότητας (των ιόντων Na και Cl) στα φυτά	31

1.2.4. Μηχανισμοί αντιμετώπισης της αλατότητας	33
1.2.4.1. Μηχανισμοί αντιμετώπισης της μείωσης του υδατικού δυναμικού στο περιβάλλον των ριζών	33
1.2.4.2. Μηχανισμοί αποκλεισμού ιόντων Na και Cl	34
1.2.5. Επιδράσεις της αλατότητας στην παραγωγή	35
1.3 Η καλλιέργεια του νωπού φασολιού	39
1.3.1. Βοτανικοί χαρακτήρες	39
1.3.2. Απαιτήσεις του φυτού	40
1.4. Τοποθέτηση του θέματος	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	44
2.1. Περιγραφή της πειραματικής εγκατάστασης	44
2.1.1. Το θερμοκήπιο	44
2.1.2. Το υδροπονικό σύστημα	44
2.1.3. Το διάλυμα τροφοδοσίας	47
2.2. Περιγραφή του πειράματος	51
2.2.1. Η καλλιέργεια	51
2.2.2. Σχεδιασμός του πειράματος	52
2.2.3. Δειγματοληψίες - Αναλύσεις	55
	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	
3.1. Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)	58
3.2. Συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- στο περιβάλλον των ριζών	59
3.3. Κατανάλωση νερού	63
3.4. Αναλογίες απορρόφησης Na/νερό και Cl/νερό	65
3.5. Μοντέλο συσχέτισης συσώρευσης Na^+ και Cl^- με κατανάλωση νερού	68
3.6. Συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- στα φύλλα	74
3.7. Συγκέντρωσεις K^+ , Ca^{2+} Mg^{2+} στο περιβάλλον των ριζών	76
3.8. Συγκεντρώσεις K^+ , Ca^{2+} Mg^{2+} στα φύλλα	78
3.9. Βλαστική ανάπτυξη φυτών	80
3.10. Παραγωγή καρπών	82

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ	85
4.1. Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)	85
4.2. Συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- στο περιβάλλον των ριζών	86
4.3. Κατανάλωση νερού	87
4.4. Αναλογίες απορρόφησης Na /νερό και Cl /νερό	87
4.5. Μοντέλο συσχέτισης συσώρευσης Na^+ και Cl^- με κατανάλωση νερού	88
4.6. Συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- στα φύλλα	92
4.7. Συγκέντρωσεις K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} στο περιβάλλον των ριζών	93
4.8. Συγκεντρώσεις K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} στα φύλλα	94
4.9. Βλαστική ανάπτυξη φυτών	96
4.10. Παραγωγή καρπών	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	100
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	101



Σχήμα 1.1. Το πρότυπο που εκφράζει τη σχέση μεταξύ της παραγωγής μιας καλλιέργειας και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο μέσο ανάπτυξης (Savvas, 2001).

38

Σχήμα 2.1. Κάτοψη της εγκατάστασης του υδροπονικού συστήματος με τις 12 πειραματικές μονάδες και ο τρόπος τυχαιοποίησής τους. 1) Δοχείο παρασκευής θρεπτικού διαλύματος. 2) Βαρέλια διαλύματος τροφοδοσίας. 3) Κανάλια καλλιέργειας. 4) Βαρέλια διαλύματος απορροής. 5) Δοχεία πυκνών διαλυμάτων λιπασμάτων. 6) Η/Υ ελέγχου του συστήματος.

45

Σχήμα 3.1. Αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο διάλυμα απορροής, λόγω της συσσώρευσης του NaCl , σε καλλιέργεια φασολιού σε κλειστό υδροπονικό σύστημα στα τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης. Σε κάθε γραφική παράσταση χρησιμοποιούνται διαφορετικά σύμβολα για κάθε επανάληψη, ενώ οι γραμμές αντιστοιχούν σε καμπύλες μη γραμμικής παλινδρόμησης που παρουσιάζουν τη βέλτιστη αντιστοιχία με τις μετρούμενες τιμές.

58

Σχήμα 3.2. Αύξηση της συσσώρευσης του Na στο περιβάλλον των ριζών (mM), στη διάρκεια του χρόνου, σε καλλιέργεια φασολιού σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης. Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις μετρήσεις των συγκεντρώσεων Na και οι γραμμές σε καμπύλες μη γραμμικής παλινδρόμησης που παρουσιάζουν τη βέλτιστη αντιστοιχία με τις μετρούμενες τιμές.

60

Σχήμα 3.3. Αύξηση της συσσώρευσης του Cl στο περιβάλλον των ριζών (mM), στη διάρκεια του χρόνου, σε καλλιέργεια φασολιού σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης. Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις μετρήσεις των συγκεντρώσεων Cl και οι γραμμές σε καμπύλες μη γραμμικής παλινδρόμησης που παρουσιάζουν τη βέλτιστη αντιστοιχία με τις μετρούμενες τιμές.

61

Σχήμα 3.4. Αθροιστική κατανάλωση νερού ανά φυτό κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας φασολιού σε κλειστό υδροπονικό σύστημα σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης. Τα σύμβολα αντιστοιχούν στην κατανάλωση νερού τις ημέρες δειγματοληψίας διαλύματος απορροής στις τρεις επαναλήψεις και οι γραμμές σε καμπύλες μη γραμμικής παλινδρόμησης που παρουσιάζουν τη βέλτιστη αντιστοιχία με τις μετρούμενες τιμές.

63

Σχήμα 3.5. Αναλογία απορρόφησης ιόντων Na (διακεκομμένη γραμμή) και Cl (συνεχής γραμμή) ως προς την απορρόφηση νερού (C_{xu}) συναρτήσει της συγκέντρωσής τους στο περιβάλλον των ριζών (C_{xs}) σε καλλιέργεια φασολιού σε κλειστό υδροπονικό σύστημα. Τα σύμβολα αντιστοιχούν σε μετρηθέντα ζεύγη τιμών (C_{xu} , C_{xs}) σε δύο επαναλήψεις κάθε μεταχείρισης και οι γραμμές σε καμπύλες μη γραμμικής παλινδρόμησης για το Na^+ και γραμμικής παλινδρόμησης για το Cl^- .

67

Σχήμα 3.6. Συγκέντρωση Na^+ στο περιβάλλον των ριζών συναρτήσει της αθροιστικής κατανάλωσης νερού από τα φυτά κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας φασολιού σε κλειστό υδροπονικό σύστημα σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης. Σε κάθε γράφημα οι γραμμές αντιστοιχούν στις προβλεπόμενες από το μοντέλο τιμές και τα σύμβολα στις τιμές που μετρήθηκαν στην επανάληψη που δε χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των παραμέτρων a και b .

69

Σχήμα 3.7. Συγκέντρωση Cl^- στο περιβάλλον των ριζών συναρτήσει της αθροιστικής κατανάλωσης νερού από τα φυτά κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας φασολιού σε κλειστό υδροπονικό σύστημα σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης. Σε κάθε γράφημα οι συνεχείς γραμμές αντιστοιχούν στις προβλεπόμενες από το μοντέλο τιμές όταν η παράμετρος a' υπολογίστηκε με μη γραμμική ανάλυση της παλινδρόμησης με τη χρήση της εξίσωσης (6). Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στις προβλεπόμενες από το μοντέλο τιμές όταν η παράμετρος a' υπολογίστηκε με μη γραμμική ανάλυση της παλινδρόμησης με τη χρήση της εξίσωσης (12), ενώ τα σύμβολα υποδηλώνουν μετρηθείσες τιμές που δε χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της παραμέτρου a' .

72

Σχήμα 3.8. Συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- στα νεαρά φύλλα φυτών φασολιού που καλλιεργήθηκαν σε κλειστό υδροπονικό σύστημα σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης.

75

Σχήμα 3.9. Συγκεντρώσεις K^+ , Ca^{+2} , και Mg^{+2} στο διάλυμα απορρόφησης καλλιέργειας φασολιού σε κλειστό υδροπονικό σύστημα σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης.

77

Σχήμα 3.10. Συγκεντρώσεις K^+ , Ca^{+2} , και Mg^{+2} στα νεαρά φύλλα φυτών φασολιού που καλλιεργήθηκαν σε κλειστό υδροπονικό σύστημα σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης.

78



Σχήμα 3.11. Νωπό και ξηρό βάρος υπέργειων τμημάτων φυτών φασολιού που καλλιεργήθηκαν σε κλειστό υδροπονικό σύστημα σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης.

Σχήμα 3.12. Ολικό βάρος καρπών, συνολικός αριθμός καρπών και μέσο βάρος καρπών στη διάρκεια της καλλιέργειας φυτών φασολιού σε κλειστό υδροπονικό σύστημα σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης.

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

σελίδα

Πίνακας 1.1. Υλικά που χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα σε υδροπονικά συστήματα καλλιέργειας.	10
Πίνακας 1.2. Περιεκτικότητα σε ανόργανα στοιχεία καλής ποιότητας νερού για χρήση στις υδροπονικές καλλιέργειες.	13
Πίνακας 1.3. Μορφές με τις οποίες υφίστανται τα θρεπτικά στοιχεία στα θρεπτικά διαλύματα που χρησιμοποιούνται στις υδροπονικές καλλιέργειες .	14
Πίνακας 1.4. Συνοπτική περιγραφή απλών υδατοδιαλυτών λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή θρεπτικών διαλυμάτων στις υδροπονικές καλλιέργειες.	15
Πίνακας 1.5. Όρια συγκεντρώσεων μακροστοιχείων (mmol/l) και ιχνοστοιχείων (μmol/l) στα θρεπτικά διαλύματα που χρησιμοποιούνται στις υδροπονικές καλλιέργειες.	17
Πίνακας 1.6. Παραδείγματα τυπικών θρεπτικών διαλυμάτων που έχουν παρασκευαστεί για την καλλιέργεια φυτών σε υδροπονικά συστήματα.	19
Πίνακας 1.7. Τιμές ανώτατης επιτρεπτής αλατότητας στο έδαφος και ρυθμού μείωσης της παραγωγής για ορισμένες καλλιέργειες με βάση το μοντέλο των Maas and Hoffman (1977) όπως υπολογίστηκαν από τους Maas and Hoffman (1977) και τον Sonneveld (1988).	38
Πίνακας 2.1. Τα λιπάσματα που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος κατά τη διάρκεια του πειράματος.	48
Πίνακας 2.2. Η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος για την καλλιέργεια φασολιού.	54

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

σελίδα

Εικόνα 2.1. Η εγκατάσταση μιας πειραματικής μονάδας του υδροπονικού συστήματος. Διακρίνονται το μαύρο βαρέλι του διαλύματος τροφοδοσίας, το κόκκινο βαρέλι συλλογής του διαλύματος απορροής και η αντλία μεταφοράς του θρεπτικού διαλύματος από το βαρέλι στα κανάλια καλλιέργειας.

46

Εικόνα 2.2. Η εγκατάσταση αυτόματης παρασκευής θρεπτικών διαλυμάτων, όπου διακρίνονται: η μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου (Α), το δοχείο παρασκευής των θρεπτικών διαλυμάτων (Β), οι περισταλτικές αντλίες έκχυσης των λιπασμάτων (Γ) και τα βαρέλια με τα πυκνά διαλύματα των λιπασμάτων (Δ).

49

Εικόνα 2.3. Η προετοιμασία των καναλιών καλλιέργειας για την εγκατάσταση των φυτών φασολιού.

51

Εικόνα 2.4. Τα φυτά φασολιού κατά τα πρώτα στάδια της καλλιέργειας

52

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

σελίδα

Εικόνα 2.1. Η εγκατάσταση μιας πειραματικής μονάδας του υδροπονικού συστήματος. Διακρίνονται το μαύρο βαρέλι του διαλύματος τροφοδοσίας, το κόκκινο βαρέλι συλλογής του διαλύματος απορροής και η αντλία μεταφοράς του θρεπτικού διαλύματος από το βαρέλι στα κανάλια καλλιέργειας.

46

Εικόνα 2.2. Η εγκατάσταση αυτόματης παρασκευής θρεπτικών διαλυμάτων, όπου διακρίνονται: η μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου (Α), το δοχείο παρασκευής των θρεπτικών διαλυμάτων (Β), οι περισταλτικές αντλίες έκχυσης των λιπασμάτων (Γ) και τα βαρέλια με τα πυκνά διαλύματα των λιπασμάτων (Δ).

49

Εικόνα 2.3. Η προετοιμασία των καναλιών καλλιέργειας για την εγκατάσταση των φυτών φασολιού.

51

Εικόνα 2.4. Τα φυτά φασολιού κατά τα πρώτα στάδια της καλλιέργειας

52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

1.1. ΥΔΡΟΠΟΝΙΑ

1.1.1. Ορισμός

Ο αμερικανός καθηγητής στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας Gericke, το 1937, ήταν ο πρώτος που χρησιμοποίησε τον όρο υδροπονία (hydroponics) για να περιγράψει τις διάφορες μεθόδους ανάπτυξης φυτών σε υγρό μέσο για εμπορικούς σκοπούς. Έκτοτε η έννοια του όρου διευρύνθηκε ώστε να περιλάβει κάθε μέθοδο καλλιέργειας φυτών που πραγματοποιείται απουσία εδάφους, έτσι ώστε σήμερα, οι περισσότεροι συγγραφείς, τόσο στη διεθνή όσο και στην ελληνική βιβλιογραφία να χρησιμοποιούν τον όρο ως συνώνυμο του “εκτός εδάφους καλλιέργεια” (soiless culture).

Ένας σύγχρονος ορισμός, όπως αναφέρεται από τον Σάββα (1998), αναφέρει ότι υδροπονία καλείται κάθε μέθοδος καλλιέργειας φυτών εκτός εδάφους, βασιζόμενη στη χορήγηση τεχνητά παρασκευασμένων, ανόργανων θρεπτικών διαλυμάτων για την κάλυψη των υδατικών και διατροφικών αναγκών των φυτών με/ή χωρίς τη χρήση κάποιου στερεού υποστρώματος ως μέσου ανάπτυξης των ριζών των φυτών.

1.1.2. Ιστορική αναδρομή

Οι πρώτες προσπάθειες για την καλλιέργεια φυτών εκτός του φυσικού εδάφους ανιχνεύονται ήδη από τα πρώτα χρόνια της ανθρώπινης ιστορίας. Οι Κρεμαστοί Κήποι της Βαβυλώνας, οι Κατακλυζόμενοι (floating) Κήποι που είχαν αναπτύξει οι Αζτέκοι στο Μεξικό και οι Κινέζοι αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων προσπαθειών, ενώ αιγυπτιακά αρχεία που χρονολογούνται αρκετές εκατοντάδες χρόνια προ Χριστού περιγράφουν την ανάπτυξη φυτών σε νερό.

Στα νεώτερα χρόνια (17^ο αιώνας και μετά) η υδροπονία συνδέθηκε στενά με τη Φυσιολογία των φυτών και την προσπάθεια καθορισμού των απαραίτητων για την ανάπτυξη των φυτών στοιχείων. Έτσι αναφέρεται ότι πρώτος ο Βέλγος Jan Van Helmont το 1600 καλλιέργησε, για χρονικό διάστημα 5 ετών, φυτά ιτιάς σε φυτοδοχεία που περιείχαν χώμα και στα οποία



ανανέωνε μόνο το νερό (Schwarz, 1995), ενώ ο Ιρλανδός Robert Boyle το 1666 κατάφερε να αναπτύξει ορισμένα είδη φυτών (*Raphanus aquaticus*, μέντα, κ.λ.π.) σε φυτοδοχεία μόνο με νερό, χωρίς να υπάρχει κάποιο στέρεο μέσο για την ανάπτυξη των ριζών (Σάββας 1998) .

Όλες αυτές οι πρώιμες προσπάθειες όμως ήταν, λίγο πολύ, καταδικασμένες σε αποτυχία αφού η ανάπτυξη της Αναλυτικής Χημείας τις εποχές εκείνες δεν επέτρεπε την αναγνώριση του ρόλου, στη θρέψη των φυτών, των ανόργανων στοιχείων που ήταν διαλυμένα στο νερό. Παρ' όλα αυτά μέχρι τα μέσα του 19^{ου} αιώνα είχε διαπιστωθεί ότι οι φυτικοί ιστοί περιείχαν άνθρακα, υδρογόνο, οξυγόνο και άζωτο και είχε γίνει αντιληπτό ότι τα φυτά μπορούσαν να αναπτυχθούν σε αδρανές μέσο εφόσον αυτό διαβρέχονταν με υδατικό διάλυμα που περιείχε διάφορα ανόργανα στοιχεία.

Η υδροπονία με την πλήρη έννοια του όρου μπορεί να θεωρηθεί ότι εφαρμόστηκε για πρώτη φορά όταν καλλιεργήθηκαν φυτά σε τεχνητό θρεπτικό διάλυμα με καθορισμένη σύσταση σε ανόργανα θρεπτικά στοιχεία, η οποία αντιστοιχούσε στις ανάγκες θρέψης των φυτών. Σύμφωνα με τον Hewitt (1966) πρώτοι οι γερμανοί φυσιολόγοι Sachs και Knor γύρω στο 1860 παρασκεύασαν θρεπτικά διαλύματα με καθορισμένη σύσταση και έδειξαν ότι εκτός των προαναφερθέντων τεσσάρων στοιχείων, άλλα ανόργανα στοιχεία απαραίτητα για την ανάπτυξη και την ολοκλήρωση του βιολογικού κύκλου των φυτών ήταν ο φωσφόρος, το θείο, το κάλιο, το ασβέστιο και το μαγνήσιο. Στη συνέχεια με την πρόοδο της Αναλυτικής Χημείας και των πειραματικών τεχνικών έγινε δυνατόν να καθοριστεί το σύνολο των απαραίτητων για τα φυτά ανόργανων στοιχείων.

Έχοντας πλέον γνώση των απαραίτητων για την ανάπτυξη των φυτών ανόργανων στοιχείων διάφοροι ερευνητές παρασκεύασαν θρεπτικά διαλύματα για ερευνητικούς σκοπούς. Ο Gericke το 1929 ήταν ο πρώτος που προσπάθησε να αξιοποιήσει τη δυνατότητα θρέψης των φυτών αποκλειστικά μέσω θρεπτικών διαλυμάτων για εμπορικούς σκοπούς. Η υδροπονική μέθοδος που ανέπτυξε δεν βρήκε ιδιαίτερη ανταπόκριση γιατί είχε υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, ενώ έδινε παραγωγές αντίστοιχες με αυτές που λαμβάνονταν από καλλιέργειες στο έδαφος.

Η πρώτη πρακτική εφαρμογή της υδροπονίας σε μεγάλη κλίμακα πραγματοποιήθηκε από τον αμερικανικό στρατό κατά τη διάρκεια του 2^{ου}



Παγκοσμίου Πολέμου για την παραγωγή νωπών λαχανικών (Jones, 1982). Μετά τον πόλεμο η έρευνα συνεχίστηκε, η σύνθεση των θρεπτικών διαλυμάτων τελειοποιήθηκε, ενώ νέες τεχνικές υδροπονικών καλλιεργειών αναπτύχθηκαν χωρίς όμως να υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την χρήση των υδροπονικών συστημάτων σε εμπορική κλίμακα.

Η κατάσταση αυτή άρχισε να αλλάζει από τις αρχές της δεκαετίας του '70. Τότε σε χώρες όπως η Αγγλία και η Ολλανδία τα προβλήματα από την υποβάθμιση των εδαφών, λόγω της συνεχούς καλλιέργειας και της συνεπαγόμενης έξαρσης των εδαφογενών ασθενειών έγιναν αζεπέραστα και οδήγησαν στην εκδήλωση νέου ενδιαφέροντος για τις υδροπονικές καλλιέργειες.

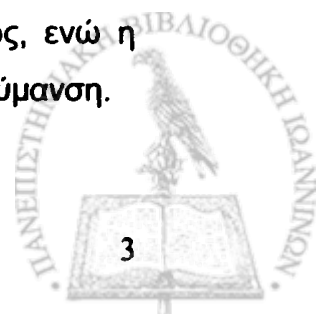
Σήμερα στις Βορειοευρωπαϊκές χώρες, στο Ισραήλ και την Ιαπωνία οι υδροπονικές καλλιέργειες καταλαμβάνουν ένα σημαντικό μέρος των εκτάσεων που καλύπτονται από θερμοκήπια, ενώ στην Ολλανδία το σύνολο σχεδόν της παραγωγής καρποδοτικών λαχανικών από θερμοκήπια προέρχεται από τέτοιου είδους καλλιέργειες.

1.1.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των υδροπονικών καλλιεργειών

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των υδροπονικών καλλιεργειών, σε σχέση με τις καλλιέργειες στο έδαφος, έχουν καταγραφεί από διάφορους συγγραφείς, μεταξύ των οποίων οι Schwarz (1995), Resh (1997) και Σάββας (2003).

Πλεονεκτήματα που αναφέρουν οι παραπάνω συγγραφείς είναι:

- Η θρέψη των φυτών που αναπτύσσονται σε υδροπονικά συστήματα είναι πλήρως ελεγχόμενη. Το θρεπτικό διάλυμα είναι λίγο πολύ σταθερής σύνθεσης και άμεσα διαθέσιμο σε ικανές ποσότητες για όλα τα φυτά. Το pH του διαλύματος ελέγχεται εύκολα και με ακρίβεια, ενώ η δειγματοληψία και ο έλεγχος του θρεπτικού διαλύματος είναι απλές διαδικασίες.
- Αποφυγή των εδαφογενών παθογόνων και εντόμων καθώς και των ζιζανίων. Η απολύμανση του υποστρώματος και του εξοπλισμού του υδροπονικού συστήματος γίνεται εύκολα και με χαμηλό κόστος, ενώ η επόμενη καλλιέργεια μπορεί να εγκατασταθεί 24 h μετά την απολύμανση.



- Δεν απαιτούνται οι εργασίες προετοιμασίας του εδάφους για την εγκατάσταση της νέας καλλιέργειας, με συνέπεια τη μείωση των απαιτούμενων εργατικών και την αποδοτικότερη εκμετάλλευση της εγκατάστασης αφού η νέα καλλιέργεια μπορεί να εγκατασταθεί αμέσως μετά την απομάκρυνση της προηγούμενης.
- Μικρότερη κατανάλωση νερού. Η ποσότητα νερού που απαιτείται ανά μονάδα βάρους παραγόμενου προϊόντος είναι μικρότερη από αυτή που απαιτείται στις αντίστοιχες καλλιέργειες στο έδαφος, ιδιαίτερα σε ζεστές και ξηρές συνθήκες.
- Μικρότερη κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανση του θερμοκηπίου. Στις υδροπονικές καλλιέργειες ελαχιστοποιείται η εξάτμιση του νερού από το έδαφος, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας του ριζοστρώματος, κατά τη διάρκεια της ημέρας, επιτυγχάνεται ευκολότερα με χαμηλότερη δαπάνη ενέργειας σε σχέση με το έδαφος.
- Η καλλιέργεια σε υδροπονικά συστήματα μπορεί να πραγματοποιηθεί σε περιοχές με υποβαθμισμένα ή μολυσμένα εδάφη.
- Υψηλότερη παραγωγή. Στις υδροπονικές καλλιέργειες είναι πιο εύκολο να επιτευχθούν υψηλές παραγωγές λόγω των καλύτερων συνθηκών στο περιβάλλον των ριζών και του ελέγχου του θρεπτικού διαλύματος. Επιπλέον μπορούν να καλλιεργηθούν περισσότερα φυτά ανά μονάδα επιφανείας αφού ο μόνος ουσιαστικά περιοριστικός παράγοντας είναι το φως. Υπολογίζεται ότι οι αποδόσεις των υδροπονικών καλλιεργειών είναι κατά μέσο όρο 15 έως 20% υψηλότερες σε σχέση με καλλιέργειες που λαμβάνουν χώρα σε γόνιμα, καλής ποιότητας εδάφη.
- Πρωίμηση της παραγωγής ως συνέπεια των υψηλότερων θερμοκρασιών που διαμορφώνονται στο χώρο του ριζοστρώματος.

Ως μειονεκτήματα των υδροπονικών καλλιεργειών αναφέρονται:

- Η υψηλή αρχική επένδυση. Η χρήση σύγχρονου, περίπλοκου και υψηλού κόστους εξοπλισμού θεωρείται απαραίτητη.
- Η μικρή ρυθμιστική ικανότητα του υποστρώματος που, σε περίπτωση αστοχίας ή λάθους, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ακόμη και την καταστροφή της καλλιέργειας.
- Απαιτείται ειδικευμένο προσωπικό. Ιδιαίτερα ο επικεφαλής της επιχείρησης πρέπει να διαθέτει γνώσεις Φυσιολογίας Φυτών, αλλά και των ιδιαίτερων

αναγκών μιας δεδομένης καλλιέργειας ή να παρέχεται κατάλληλη τεχνική υποστήριξη από ειδικευμένο σύμβουλο-γεωπόνο.

- Η πιθανή δημιουργία περιβαλλοντικών προβλημάτων. Η έκλυση, χωρίς καμία προηγούμενη επεξεργασία, στο περιβάλλον αποβλήτων με υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών και φωσφορικών ιόντων είναι υπεύθυνη για τη μόλυνση υπογείων υδάτων και τη δημιουργία φαινομένων ευτροφισμού. Επίσης, η μη κατάλληλη διαχείριση των χρησιμοποιημένων υποστρωμάτων καλλιέργειας μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση του περιβάλλοντος.

1.1.4. Συστήματα υδροπονίας

Τα διάφορα υδροπονικά συστήματα μπορούν κατ' αρχήν να διακριθούν σε κλειστά και ανοιχτά, ανάλογα με το αν το θρεπτικό διάλυμα που απορρέει από το ριζόστρωμα συλλέγεται και επαναχρησιμοποιείται ή όχι. Σε ένα ανοιχτό σύστημα το μέρος του διαλύματος που απορρέει ως πλεονάζον από το ριζόστρωμα αφήνεται να χαθεί στο περιβάλλον. Αντίθετα σε ένα κλειστό σύστημα το διάλυμα αυτό συλλέγεται, ανανεώνεται, συμπληρώνεται και οδηγείται ξανά στα φυτά (Adams, 2002).

Στα κλειστά υδροπονικά συστήματα η ανακύκλωση του διαλύματος απορροής, που αποτελεί συνήθως το 30 – 50% της συνολικής παροχής θρεπτικού διαλύματος, έχει σαν αποτέλεσμα σημαντική μείωση της κατανάλωσης νερού και λιπασμάτων (Adams, 2002). Επιπλέον, και ιδιαίτερα σημαντικό, τα συστήματα αυτά θεωρούνται πιο φιλικά προς το περιβάλλον, αφού, λόγω της ανακύκλωσης, ελάχιστα νιτρικά και φωσφορικά ιόντα εκλύονται στο περιβάλλον.

Στα παραπάνω πλεονεκτήματα των κλειστών υδροπονικών συστημάτων αντιπαραβάλλονται ορισμένα μειονεκτήματα. Απαιτείται περισσότερο πολύπλοκος και συνεπώς μεγαλύτερου κόστους εξοπλισμός, ώστε να είναι δυνατή η ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος. Υπάρχει κίνδυνος γρήγορης εξάπλωσης μολύνσεων στην καλλιέργεια μέσω του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος όταν αυτό δεν απολυμαίνεται πριν την επαναχρησιμοποίησή του. Επιπλέον είναι απαραίτητος ο συχνός έλεγχος του θρεπτικού διαλύματος και η χρήση καλής ποιότητας νερού γιατί η συνεχής ανακύκλωση του διαλύματος απορροής μπορεί να οδηγήσει στη συσσώρευση

ορισμένων ανόργανων ιόντων (κυρίως Na^+ και Cl^-) με δυσμενείς επιπτώσεις για τα φυτά (Sonneveld, 2002).

Ένας δεύτερος τρόπος κατηγοριοποίησης των υδροπονικών συστημάτων είναι βάση της χρήσης ή μη στερεού υποστρώματος για την ανάπτυξη των φυτών. Έτσι, τα υδροπονικά συστήματα διακρίνονται σε αυτά όπου τα φυτά αναπτύσσονται σε καθαρό θρεπτικό διάλυμα και σε αυτά όπου τα φυτά αναπτύσσονται σε πορώδη στερεά υλικά τα οποία είναι γνωστά ως υποστρώματα καλλιέργειας (Maloupa, 2002).

1.1.4.1. Καλλιέργεια σε καθαρό θρεπτικό διάλυμα

Σε αυτού του είδους τα υδροπονικά συστήματα οι ρίζες των φυτών αναπτύσσονται σε καθαρό θρεπτικό διάλυμα χωρίς να υπάρχει άλλο μέσο ανάπτυξης, ενώ το διάλυμα απορροής συνήθως ανακυκλώνεται (Resh, 1997, Maloupa, 2002). Έχουν αναπτυχθεί αρκετά συστήματα τέτοιου είδους με κυριότερα τα εξής:

- Συστήματα όπου η καλλιέργεια γίνεται σε δοχεία γεμισμένα με θρεπτικό διάλυμα. Πρόκειται για συστήματα στα οποία τα φυτά αναπτύσσονται σε μικρά ή μεγάλα φυτοδοχεία γεμισμένα με θρεπτικό διάλυμα. Στην αρχική τους μορφή παρουσίαζαν διάφορα προβλήματα με κυριότερο τον ανεπαρκή αερισμό των ριζών. Στις μέρες μας έχουν εξελιχθεί διάφορες μορφές των συστημάτων αυτών που δεν παρουσιάζεται το παραπάνω πρόβλημα και εφαρμόζονται στη γεωργική πρακτική.
- Σύστημα NFT (Nutrient Film Technique = Τεχνική λεπτής θρεπτικής στοιβάδας) στο οποίο οι ρίζες των φυτών αναπτύσσονται σε κλειστά κανάλια όπου συνεχώς ρέει ένα λεπτό στρώμα θρεπτικού διαλύματος.
- Συστήματα επιδαπέδιας υδροπονίας (Plant plane hydroponics). Σε αυτά το θρεπτικό διάλυμα ρέει σε μια μεγάλη επίπεδη επιφάνεια (π.χ. το δάπεδο του θερμοκηπίου) η οποία επιστρώνεται με ένα απορροφητικό υλικό με τριχοειδείς ιδιότητες, ώστε το θρεπτικό διάλυμα να κατανέμεται ομοιόμορφα και καλύπτεται από ένα φύλλο πολυαιθυλενίου.
- Σύστημα αεροπονίας. Πρόκειται για μια παραλλαγή της καλλιέργειας σε καθαρό θρεπτικό διάλυμα. Σε ένα τέτοιο σύστημα το θρεπτικό διάλυμα ψεκάζεται μέσω ακροφυσίων πάνω στις ρίζες των φυτών, οι οποίες αναπτύσσονται μέσα σε αδιαφανή κανάλια ή κλειστά φυτοδοχεία, έτσι

ώστε, ο χώρος ανάπτυξης των ριζών, να είναι συνεχώς κορεσμένος σε υγρασία.

1.1.4.2. Καλλιέργεια σε στερεά υποστρώματα

Ως υπόστρωμα υδροπονικών καλλιεργειών θεωρείται κάθε φυσικό ή προερχόμενο από βιομηχανική επεξεργασία πορώδες υλικό, εκτός από το φυσικό χώμα, το οποίο είναι σε θέση να συγκρατεί νερό (θρεπτικό διάλυμα) και αέρα σε κατάλληλες για την ανάπτυξη των φυτών αναλογίες, έτσι ώστε να μπορεί να υποκαθιστά το έδαφος στην καλλιέργεια των φυτών (Σάββας, 1998).

Στα συστήματα υδροπονίας στερεού υποστρώματος οι ρίζες των φυτών αναπτύσσονται στο στερεό, πορώδες μέσο και το θρεπτικό διάλυμα διανέμεται, μέσω ενός συστήματος άρδευσης, στο χώρο της ριζόσφαιρας. Τα συστήματα αυτά μπορεί να είναι κλειστά ή ανοιχτά και ανάλογα με το είδος του υποστρώματος διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες: στα συστήματα όπου το στερεό υπόστρωμα είναι αδρανές, ανόργανο υλικό (φυσικό ή συνθετικό) και στα συστήματα που το υπόστρωμα είναι οργανικό υλικό ή μίγματα οργανικών και ανόργανων υλικών.

1.1.5. Υποστρώματα υδροπονίας

1.1.5.1. Ιδιότητες υποστρωμάτων

Γενικά η επιλογή του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα σε μια δεδομένη καλλιέργεια εξαρτάται από τη διαθεσιμότητά του, το κόστος του, τις φυσικές και χημικές του ιδιότητες και το είδος του υδροπονικού συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί (Resh, 1997).

Ένα καλό υπόστρωμα πρέπει να είναι ομοιογενές, να παραμένει σταθερό για μακρό χρονικό διάστημα, να συγκρατεί αρκετό νερό και ταυτόχρονα να επιτρέπει τον καλό αερισμό των ριζών, να είναι ελαφρύ έτσι ώστε να είναι εύκολα διαχειρίσιμο, να είναι φιλικό προς το περιβάλλον και με χαμηλό κόστος. Τέλος, αν το υλικό του υποστρώματος είναι ανόργανο, θα πρέπει να είναι χημικά και βιολογικά αδρανές και να αποστειρώνεται εύκολα (Resh, 1997).

α) Φυσικές ιδιότητες υποστρωμάτων

Η υψηλή ικανότητα συγκράτησης διαθέσιμου στα φυτά νερού και ο καλός αερισμός του ριζικού συστήματος αναφέρονται ως τα πλέον σημαντικά φυσικά χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα στις υδροπονικές καλλιέργειες, ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή ανάπτυξη των φυτών (Raviv et al., 2002). Γενικά, με τον όρο “φυσικές ιδιότητες” αποδίδεται το σύνολο των ιδιοτήτων του υποστρώματος που καθορίζουν τη σχέση μεταξύ της διαθέσιμης ποσότητας νερού και του όγκου του αέρα γύρω από το ριζικό σύστημα των φυτών. Μια καταγραφή των ιδιοτήτων αυτών ακολουθεί στη συνέχεια (Από Μανιός, 1988, Σάββας 1998, Raviv et al., 2002):

- **Κοκκομετρική Κατανομή.** Πρόκειται για την κατά μέγεθος ποσοστιαία κατανομή των τεμαχιδίων του υλικού ή των υλικών που απαρτίζουν το υπόστρωμα. Αποτελεί δείκτη για το πόσο χοντρόκοκκο ή λεπτόκοκκο είναι ένα υλικό και επηρεάζει όλες τις άλλες φυσικές ιδιότητες του υποστρώματος.
- **Φαινόμενο Ειδικό Βάρος (ΦΕΒ) και Πραγματικό Ειδικό Βάρος (ΠΕΒ).** ΦΕΒ είναι το βάρος της ξηρής ουσίας του υποστρώματος ανά μονάδα όγκου. Ο όγκος του δείγματος του υποστρώματος υπολογίζεται με το υπόστρωμα σε υγρή κατάσταση, όπου συγκρατεί νερό σε μύζηση 10 cm στήλης νερού. ΠΕΒ είναι το βάρος της ξηρής ουσίας του υποστρώματος ανά μονάδα όγκου χωρίς να λαμβάνεται υπ’ όψιν στον υπολογισμό του όγκου το πορώδες του υποστρώματος.
- **Ολικός Όγκος Πόρων.** Είναι ο συνολικός όγκος των πόρων ενός υποστρώματος εκφραζόμενος επί % του όγκου του. Υπολογίζεται με βάση την ποσότητα νερού που μπορεί να συγκρατήσει ένα υπόστρωμα σε κατάσταση κορεσμού ή σε μύζηση 0 cm στήλης νερού. Οι πόροι διακρίνονται σε μακροπόρους ($> 50 \mu\text{m}$), οι οποίοι καταλαμβάνονται κυρίως από αέρα μέσω του οποίου οξυγονώνεται το ριζικό σύστημα και μικροπόρους ($< 50 \mu\text{m}$) στους οποίους συγκρατείται το νερό. Συνεπώς ένα καλό υπόστρωμα απαιτείται να διαθέτει μία κατάλληλη αναλογία μικροπόρων και μακροπόρων ώστε να ικανοποιεί τις ανάγκες των ριζών τόσο για νερό όσο και για οξυγόνο.
- **Χαρακτηριστικά Πορώδους.** Αποτελούν δείκτες της συγκράτησης ή ελευθέρωσης του νερού από το υπόστρωμα και αποτελούν βασικά



κριτήρια αξιολόγησης ενός υποστρώματος. Αυτά είναι: η αεροϊκανότητα που ορίζεται ως ο όγκος των πόρων που ελευθερώνονται από το νερό όταν σε ένα υπόστρωμα που βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού ασκηθεί μύζηση 10 cm στήλης νερού (1 kPa) και εκφράζεται ως επί % του όγκου του. Το Εύκολα Διαθέσιμο Νερό, δηλαδή ο όγκος του νερού που ελευθερώνεται όταν η μύζηση που ασκείται σε ένα υπόστρωμα αυξηθεί από 10 σε 50 cm στήλης νερού (1 – 5 kPa) και εκφράζεται ως επί % του όγκου του υποστρώματος. Η Υδατική Ρυθμιστική Ικανότητα, η οποία ορίζεται ως ο όγκος του νερού που ελευθερώνεται όταν η μύζηση που ασκείται σε ένα υπόστρωμα αυξηθεί από 50 σε 100 cm στήλης νερού (5 – 10 kPa) και εκφράζεται ως επί % του όγκου του υποστρώματος.

β) Χημικές ιδιότητες υποστρωμάτων

Ο όρος “Χημικές ιδιότητες υποστρωμάτων “ αναφέρεται στις ιδιότητες εκείνες ενός υποστρώματος που επηρεάζουν τις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στη ριζόσφαιρα και συνεπώς παίζουν σημαντικό ρόλο στη θρέψη των φυτών (Raviv et al., 2002).

- Χημική σύνθεση, η οποία εκφράζεται ως εκατοστιαία κατά βάρος περιεκτικότητα των διάφορων ανόργανων και οργανικών συστατικών του υποστρώματος.
- Οξύτητα (pH). Ως pH ενός διαλύματος ορίζεται ο αρνητικός δεκαδικός λογάριθμος της ενεργότητας των ιόντων του υδρογόνου. Το pH ενός υποστρώματος αναφέρεται στο pH του υδατικού διαλύματος που περιέχεται στους πόρους του και αποτελεί μέτρο της συγκέντρωσης ελεύθερων ιόντων υδρογόνου $[H^+]$ στο διάλυμα (Μήτσιος, 2001). Η θρέψη και γενικά η τροφοδότηση των φυτών με ανόργανα ιόντα επηρεάζεται καθοριστικά από την οξύτητα του υποστρώματος (Σάββας, 2003). Το pH των περισσότερων υποστρωμάτων κυμαίνεται μεταξύ 4,5 και 7,5.
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα. Σαν φυσικό μέγεθος είναι το αντίστροφο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ενός υλικού. Σε ένα υπόστρωμα αποτελεί μέτρο της περιεκτικότητάς του υδατικού διαλύματος που περιέχεται στους πόρους του σε ανόργανα άλατα και εκφράζεται σε mmhos/cm ή dS/m (Σάββας 1998).

- Ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (ΙΑΚ). Αποτελεί μέτρο της ικανότητας των συστατικών ενός υποστρώματος να συγκρατούν τα κατιόντα του διαλύματος μέσω χαλαρής δέσμευσης σε διάφορες αρνητικά φορτισμένες επιφάνειες και να τα αποδίδουν πάλι στο διάλυμα, μέσω ανταλλαγής με άλλα κατιόντα του διαλύματος, όταν η συγκέντρωσή τους εκεί μειώνεται (Σάββας 1998). Εκφράζεται δε σε milliequivalents ιόντος ανά 100 g ξηρού βάρους (meq/100 g). Τα κατιόντα που συνήθως συγκρατούνται με τον τρόπο αυτό είναι το ασβέστιο (Ca^{2+}), το μαγνήσιο (Mg^{2+}), το κάλιο (K^{+}), το αμμώνιο (NH_4^{+}) και το νάτριο (Na^{+}).

1.1.5.2. Υλικά υποστρωμάτων

Διάφορα ανόργανα και οργανικά υλικά έχουν μελετηθεί ως προς την καταλληλότητά τους να χρησιμοποιηθούν ως υποστρώματα υδροπονικών καλλιεργειών. Τα πλέον συνηθισμένα υλικά στη γεωργική πρακτική παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πιν. 1.1).

Πίνακας 1.1. Υλικά που χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα σε υδροπονικά συστήματα καλλιέργειας.

Ανόργανα Υλικά		Οργανικά Υλικά
Φυσικά Υλικά	Συνθετικά Υλικά	
Άμμος, Χαλίκι, Περλίτης, Βερμικουλίτης, Διογκωμένη άργιλος, Ελαφρόπετρα, Υαλοβάμβακας, Πετροβάμβακας (Rockwool)	Διογκωμένη πολυστερίνη, Αφρός πολυουρεθάνης	Πριονίδι, Τύρφη, Κοκοτύρφη, Άχυρο, Χαρτοπολτός, Πυρηνόξυλο, Αλεσμένα φυτικά υπολείμματα

1.1.5.3. Ελαφρόπετρα

Είναι το κοινό όνομα του ορυκτού κιζιρίτης, ενός αργιλλοπυριτικού, ηφαιστειογενούς ορυκτού με εκτεταμένο πορώδες και συνεπώς χαμηλό

φαινόμενο ειδικό βάρος. Ο σχηματισμός του πορώδους οφείλεται στη διαφυγή των ηφαιστειακών αερίων από τη μάζα του ορυκτού κατά τη διάρκεια της ψύξης της λάβας. Στη φύση η ελαφρόπετρα συναντάται σε μορφή μεγάλων πλακών ή τεμαχίων οι οποίες, για να χρησιμοποιηθούν ως υπόστρωμα, πρέπει να θρυμματιστούν σε κόκκους μεγέθους έως 8 mm. Μεγάλα κοιτάσματα ελαφρόπετρας υπάρχουν στην Ισλανδία, την Ιαπωνία, τη Νέα Ζηλανδία, τη Ρωσία, τη Σικελία, την Τουρκία, τις Η.Π.Α. και στη χώρα μας στα νησιά του Αιγαίου και κυρίως στη Νίσυρο.

Η ελαφρόπετρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα είτε ως έχει είτε μετά από κοσκίνισμα ή ξέπλυμα, ενώ τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν τα τεμαχίδια της έχουν μέγεθος 0 – 5 mm. Σύμφωνα με τους Ravin et al. (2002), η ελληνική ελαφρόπετρα έχει φαινόμενο ειδικό βάρος 0,6 – 0,8 kg/l, το ολικό πορώδες της κυμαίνεται από 60 έως 75%, η αεροϊκανότητά της είναι 41% και το εύκολα διαθέσιμο νερό 2%. Τα παραπάνω δεδομένα όμως αφορούν ελαφρόπετρα κοκκομετρικού εύρους 5-8 mm. Σύμφωνα με τους Gizas and Savvas (2006, δημοσίευτα δεδομένα) το εύκολα διαθέσιμο νερό της Ελληνικής ελαφρόμετρας στις κοκκομετρίες 0-5 mm και 0-8 mm είναι της τάξεως του 7-10%. Γενικά η ικανότητα της ελαφρόπετρας να συγκρατεί νερό ποικίλλει και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κοκκομετρική της σύσταση. Έτσι, ενώ η ελαφρόπετρα του τύπου 5-8 mm έχει μικρή ικανότητα συγκράτησης νερού με συνέπεια τα φυτά που καλλιεργούνται σε αυτή να κινδυνεύουν από περιοδική έλλειψη νερού, η ελαφρόπετρα 0-2 mm μπορεί να συγκρατεί υπερβολικά πολύ νερό με συνέπεια να υπάρχει κίνδυνος περιοδικής ασφυξίας του ριζικού συστήματος (Gizas and Savvas, 2006, δημοσίευτα δεδομένα).

Η ελαφρόπετρα είναι ένα σχετικά αδρανές υλικό αποτελούμενο κυρίως από πυρίτιο και οξείδια του αργιλίου, ενώ μπορεί να περιέχει οξείδια μετάλλων, ασβεστίτη ή άλατα. Δεν έχει ρυθμιστική ικανότητα, έχει χαμηλή ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων και pH 7,3. Επιπλέον είναι βιολογικά αδρανής και απαλλαγμένη παθογόνων ή ζιζανίων (Ravin et al., 2002).

Στα πλεονεκτήματά της συγκαταλέγονται η σταθερότητά της ως υλικό, που έχει σαν αποτέλεσμα να μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί πολλές φορές αρκεί να απολυμαίνεται μετά από κάθε χρήση της, η άριστη καλλιεργητική της συμπεριφορά και το ότι μπορεί να τοποθετηθεί σε κάθε είδους υποδοχείς

υποστρωμάτων. Επιπλέον, όντας φυσικό προϊόν, δεν προκαλεί περιβαλλοντική μόλυνση. Τέλος, για τη χώρα μας το σημαντικότερο ίσως πλεονέκτημά της σε σχέση με άλλα υλικά υποστρωμάτων είναι η ιδιαίτερα χαμηλή τιμή της (Σάββας, 2003).

1.1.6. Ποιότητα νερού

Το αρδευτικό νερό, ανάλογα με την προέλευσή του, μπορεί να περιέχει σημαντικές ποσότητες ιόντων ασβεστίου (Ca^{+2}), μαγνησίου (Mg^{+2}), όξινων ανθρακικών (HCO_3^-), θειικών (SO_4^{-2}), νατρίου (Na^+) και χλωρίου (Cl^-) και ποσότητες βαρέων μετάλλων (Μαυρογιαννόπουλος, 1994). Όταν το νερό προέρχεται από επιφανειακά ύδατα μπορεί επιπλέον να περιέχει οργανικές ουσίες, άλγη και παθογόνους μικροοργανισμούς.

Η ποιότητα του νερού αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα για τις υδροπονικές καλλιέργειες. Υψηλές συγκεντρώσεις HCO_3^- , NaCl και βαρέων μετάλλων, καθώς και η ύπαρξη οργανικών συσσωματωμάτων υποβαθμίζουν την ποιότητα του νερού και ενίοτε το καθιστούν ακατάλληλο για χρήση. Η περιεκτικότητα σε ανόργανα στοιχεία καλής ποιότητας νερού για χρήση στις υδροπονικές καλλιέργειες παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.2.

Επιπλέον, η γνώση της περιεκτικότητας του νερού στα ιόντα που είναι απαραίτητα για τη θρέψη των φυτών είναι επιβεβλημένη για τον υπολογισμό των ποσοτήτων των λιπασμάτων που απαιτούνται για την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στα κλειστά υδροπονικά συστήματα όπου, λόγω της ανακύκλωσης του θρεπτικού διαλύματος, τα ιόντα που περιέχονται σε σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις στο νερό μπορούν να συσσωρευτούν και να δημιουργήσουν προβλήματα στην καλλιέργεια.

1.1.7. Θρεπτικά διαλύματα

1.1.7.1. Θρεπτικά ανόργανα στοιχεία

Τα ανώτερα φυτά απαιτούν 16 χημικά στοιχεία για την ανάπτυξή τους και την ολοκλήρωση του βιολογικού τους κύκλου. Από αυτά, τα 9: ο άνθρακας (C), το οξυγόνο (O), το υδρογόνο (H), το άζωτο (N), ο φωσφόρος (P), το θείο (S), το κάλιο (K), το ασβέστιο (Ca) και το μαγνήσιο (Mg), είναι απαραίτητα σε σχετικά μεγάλες ποσότητες και ονομάζονται μακροστοιχεία. Τα υπόλοιπα 7: ο

σίδηρος (Fe), το μαγγάνιο (Mn), ο ψευδάργυρος (Zn), ο χαλκός (Cu), το βόριο (B), το μολυβδαίνιο (Mo) και το χλώριο (Cl), απαιτούνται σε πολύ μικρότερες ποσότητες και ονομάζονται μικροστοιχεία.

Πίνακας 1.2. Περιεκτικότητα σε ανόργανα στοιχεία καλής ποιότητας νερού για χρήση στις υδροπονικές καλλιέργειες (Από Benoit, 1992)

Ιόντα		Μέγιστες τιμές	
		mmol/l	mg/l
Ασβέστιο	Ca ²⁺	2,0	80,2
Μαγνήσιο	Mg ²⁺	0,5	12,2
Νάτριο	Na ⁺	0,5	11,5
Χλώριο	Cl ⁻	1,0	35,5
Θειικά	SO ₄ ²⁻	0,5	48,1
Όξινα ανθρακικά	HCO ₃ ⁻	4,0	244
		μmol/l	μg/l
Σίδηρος	Fe ²⁺	0,5	28
Μαγγάνιο	Mn ²⁺	10,0	549
Χαλκός	Cu ²⁺	1,0	63,5
Ψευδάργυρος	Zn ²⁺	5,0	327
Βόριο	B ³⁺	25,0	270
Φθόριο	F ⁻	25,0	475
		dS/m στους 25° C	
Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)		0,5	

Στις υδροπονικές καλλιέργειες όλα τα παραπάνω ανόργανα θρεπτικά στοιχεία χορηγούνται στα φυτά μέσω του θρεπτικού διαλύματος, με εξαίρεση τον άνθρακα που προσλαμβάνεται από την ατμόσφαιρα ως διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Το υδρογόνο και το οξυγόνο είναι συστατικά του νερού, ενώ οξυγόνο προσλαμβάνεται και από τον αέρα για τις ανάγκες της αναπνοής. Το χλώριο εμπεριέχεται σχεδόν πάντοτε σε ικανές ποσότητες, με τη μορφή χλωριούχου ανιόντος, στο νερό με το οποίο παρασκευάζεται το θρεπτικό διάλυμα. Συνεπώς μόνο 12 από τα 16 απαραίτητα ανόργανα θρεπτικά

στοιχεία (τα N, P, S, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, B και Mo) πρέπει να προστίθενται στο νερό κατά την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος (Σάββας 2003).

Όλα τα θρεπτικά στοιχεία (με εξαίρεση το βόριο) απορροφώνται από τα φυτά με τη μορφή ιόντων. Συνεπώς τα στοιχεία αυτά θα πρέπει να υφίστανται στα θρεπτικά διαλύματα με ιοντική μορφή. Στον Πίνακα 1.3 παρουσιάζονται τα απαραίτητα για τη θρέψη των φυτών ανόργανα στοιχεία με τις μορφές υπό τις οποίες υφίστανται στα θρεπτικά διαλύματα και απορροφώνται από τα φυτά.

Πίνακας 1.3. Μορφές με τις οποίες υφίστανται τα θρεπτικά στοιχεία στα θρεπτικά διαλύματα που χρησιμοποιούνται στις υδροπονικές καλλιέργειες (Από Σάββας, 1998).

Μακροστοιχεία	Χημική μορφή	Ιχνοστοιχεία	Χημική μορφή
Άζωτο (N)	NO_3^- , NH_4^+	Σίδηρος (Fe)	Fe^{2+}
Φωσφόρος (P)	H_2PO_4^-	Μαγγάνιο (Mn)	Mn^{2+}
Θείο (S)	SO_4^{2-}	Ψευδάργυρος (Zn)	Zn^{2+}
Κάλιο (K)	K^+	Χαλκός (Cu)	Cu^{2+}
Ασβέστιο (Ca)	Ca^{2+}	Βόριο (B)	H_3BO_3
Μαγνήσιο (Mg)	Mg^{2+}	Μολυβδαίνιο (Mo)	MoO_4^{2-}
		Χλώριο (Cl)	Cl^-

1.1.7.2. Χρησιμοποιούμενα λιπάσματα

Στις υδροπονικές καλλιέργειες τα θρεπτικά στοιχεία παρέχονται στα φυτά μέσω των θρεπτικών διαλυμάτων, τα οποία παρασκευάζονται με την προσθήκη σε νερό απλών υδατοδιαλυτών αλάτων και ορισμένων οξέων, ενώ ειδικά ο σίδηρος χορηγείται με τη μορφή οργανομεταλλικών συμπλόκων (χηλικές ενώσεις σιδήρου) (Πιν. 1.4) (Σάββας, 2003).

Τα συνήθως χρησιμοποιούμενα λιπάσματα είναι απλά (εξαίρεση αποτελεί το νιτρικό ασβέστιο), συνίστανται δηλαδή μόνο από μία χημική ένωση, ώστε να είναι εύκολη η προσαρμογή της θρέψης στις εκάστοτε απαιτήσεις μιας καλλιέργειας, αλλά και η διεξαγωγή διορθωτικών παρεμβάσεων, αν κριθεί απαραίτητο, για την αποκατάσταση της ισορροπίας στη θρέψη. Επιπλέον

πρέπει να έχουν υψηλή διαλυτότητα ώστε να δίστανται πλήρως στο νερό και να μην καθιζάνουν (Resh, 1997).

Πίνακας 1.4. Συνοπτική περιγραφή απλών υδατοδιαλυτών λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή θρεπτικών διαλυμάτων στις υδροπονικές καλλιέργειες (Από Savvas, 2001).

Λίπασμα	Χημικός τύπος	Θρεπτικά στοιχεία (%)	Μοριακό βάρος	Διαλυτότητα (Kg/l, 0° C)
Νιτρικό αμμώνιο	NH_4NO_3	N: 35	80,0	1,18
Νιτρικό ασβέστιο	$5[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ NH_4NO_3	N: 15,5, Ca: 19	1080,5	1,02
Νιτρικό κάλιο	KNO_3	N: 13, K: 38	101,1	0,13
Νιτρικό μαγνήσιο	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	N: 11, Mg: 9	256,3	2,79 (20° C)
Νιτρικό οξύ	HNO_3	N: 22	63,0	–
Φωσφορικό μονοαμμώνιο	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	N: 12, P: 27	115,0	0,23
Φωσφορικό μονοκάλιο	KH_2PO_4	P: 23, K: 28	136,1	1,67
Φωσφορικό οξύ	H_3PO_4	P: 32	98,0	–
Θειικό κάλιο	K_2SO_4	K: 45, S: 18	174,3	0,12
Θειικό μαγνήσιο	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Mg: 9,7, S: 13	246,3	0,26
Ανθρακικό μονοκάλιο	KHCO_3	K: 39	100,1	1,12
Χηλικός σίδηρος	διάφοροι τύποι	Fe: 6 – 13	–	–
Θειικό μαγγάνιο	$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Mn: 32	169,0	1,05
Θειικός ψευδάργυρος	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Zn: 23	287,5	0,62
Θειικός χαλκός	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Cu: 25	249,7	0,32
Βόρακας	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	B: 11	381,2	0,016
Βορικό οξύ	H_3BO_3	B: 17,5	61,8	0,050
Οκταβορικό νάτριο	$\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	B: 20,5	412,4	0,045
Μολυβδαινικό αμμώνιο	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$	Mo: 54	1235,9	0,43
Μολυβδαινικό νάτριο	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Mo: 40	241,9	0,56

Τα λιπάσματα που χρησιμοποιούνται ως πηγές μακροστοιχείων κατά την παρασκευή των θρεπτικών διαλυμάτων (Πιν. 1.4), συνίστανται συνήθως από δύο ιόντα, ένα κατιόν και ένα ανιόν, τα οποία αποτελούν και τα δύο θρεπτικά στοιχεία. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η επιβάρυνση του θρεπτικού διαλύματος με μη θρεπτικά και συνεπώς ανεπιθύμητα ιόντα (Na^+ , Cl^- , HCO_3^-).

Τέτοιο πρόβλημα δεν υφίστανται στην περίπτωση των λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται για την παροχή των ιχνοστοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα, αφού αυτά προστίθενται σε πολύ μικρές ποσότητες. Σε αυτή την περίπτωση είναι δυνατή η χρήση μιας χημικής ένωσης, όπως το μολυβδαινικό νάτριο, όπου το δεύτερο ιόν, το Na, δεν αποτελεί θρεπτικό στοιχείο χωρίς να δημιουργείται πρόβλημα στην καλλιέργεια.

1.1.7.3. Βασικές αρχές σύνθεσης θρεπτικών διαλυμάτων

Στις εκτός εδάφους καλλιέργειες οι ρίζες αναπτύσσονται σε περιορισμένο χώρο σε σχέση με τις καλλιέργειες στο έδαφος, με αποτέλεσμα τα αποθέματα θρεπτικών στοιχείων που μπορούν να απορροφήσουν τα φυτά να είναι επίσης περιορισμένα. Έτσι, η μη ικανοποιητική παροχή θρεπτικών στοιχείων μέσω του θρεπτικού διαλύματος μπορεί γρήγορα να οδηγήσει σε επιβλαβείς επιδράσεις στην παραγωγή και στην ποιότητα των προϊόντων λόγω ελλείψεων θρεπτικών στοιχείων, φαινομένων τοξικότητας ή συσσώρευσης αλάτων (Savvas, 2000).

Η σύνθεση και η θρεπτική αξία των θρεπτικών διαλυμάτων καθορίζεται από το ύψος των συγκεντρώσεων των επιμέρους θρεπτικών στοιχείων, από τις αναλογίες μεταξύ των συγκεντρώσεων αυτών, από τη συνολική συγκέντρωση αλάτων στο θρεπτικό διάλυμα (στην πράξη εκφράζεται με την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) του διαλύματος) και από το pH του θρεπτικού διαλύματος (Schwarz, 1995, Savvas and Adamidis, 1999).

α) Σύνθεση θρεπτικών διαλυμάτων

Το ύψος των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων σε ένα θρεπτικό διάλυμα μπορεί να κυμαίνονται σε σχετικά ευρεία όρια χωρίς να παρουσιάζονται ιδιαίτερα προβλήματα στη θρέψη των φυτών (Πιν. 1.5). Το παραπάνω είναι αποτέλεσμα της ικανότητας των φυτών να απορροφούν ενεργώς επαρκείς ποσότητες θρεπτικών στοιχείων ακόμη και αν αυτά βρίσκονται σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις (μέχρι ενός σημείου) στο θρεπτικό διάλυμα, αρκεί οι συγκεντρώσεις αυτές να παραμένουν σταθερές (Schwarz, 1995, Savvas, 2001).

Πίνακας 1.5. Όρια συγκεντρώσεων μακροστοιχείων (mmol/l) και ιχνοστοιχείων (μmol/l) στα θρεπτικά διαλύματα που χρησιμοποιούνται στις υδροπονικές καλλιέργειες.

Θρεπτικά στοιχεία	Όρια συγκέντρωσης mmol/l ⁽¹⁾	Θρεπτικά στοιχεία	Όρια συγκέντρωσης μmol/l ⁽²⁾
Αζωτο (N)	7,14 – 21,43	Σίδηρος (Fe)	8,94 – 35,78
Φωσφόρος (P)	0,97 – 1,94	Μαγγάνιο (Mn)	3,64 – 36,43
Θείο (S)	0,47 – 4,98	Ψευδάργυρος (Zn)	1,53 – 9,17
Κάλιο (K)	5,11 – 15,34	Χαλκός (Cu)	0,16 – 0,94
Ασβέστιο (Ca)	2,99 – 7,98	Βόριο (B)	18,52 – 55,55
Μαγνήσιο (Mg)	1,03 – 2,47	Μολυβδαίνιο (Mo)	0,42 – 0,63

⁽¹⁾: Σάββας, 1998

⁽²⁾: Steiner, 1984

Παρ' όλα αυτά στόχος των υδροπονικών καλλιεργειών δεν είναι απλώς η επιβίωση των φυτών, αλλά οι υψηλές αποδόσεις με ταυτόχρονη παραγωγή ποιοτικών προϊόντων. Από αυτή την άποψη τα καλύτερα αποτελέσματα σε μια υδροπονική καλλιέργεια παρατηρούνται όταν οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα αντιστοιχούν περίπου στις ποσότητες των θρεπτικών στοιχείων που απορροφώνται από τα φυτά ανά λίτρο καταναλισκώμενου νερού (αναλογίες απορρόφησης θρεπτικού στοιχείου προς νερό) (Sonneveld, 1981, Graves, 1983). Κάτω από αυτές τις συνθήκες τα φυτά δεν χρειάζεται να καταναλώνουν ενέργεια να απορροφούν ή να αποκλείουν ενεργώς θρεπτικά ιόντα των οποίων οι συγκεντρώσεις είναι μικρότερες ή μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες αναλογίες απορρόφησης στοιχείων προς νερό (Steiner, 1980).

Στην πράξη όμως οι αναλογίες απορρόφησης θρεπτικού στοιχείου/νερό τείνουν να διαφέρουν σημαντικά από τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις των στοιχείων στα διαλύματα (Savvas and Lenz, 1995). Αυτό συμβαίνει γιατί οι αναλογίες θρεπτικών στοιχείων/νερό που απορροφούν τα φυτά δεν είναι σταθερές. Διαφορετικά φυτικά είδη έχουν διαφορετικές ανάγκες σε θρεπτικά στοιχεία, ενώ και οι απαιτήσεις του ίδιου φυτού, και συνεπώς οι αναλογίες θρεπτικών στοιχείων/νερό που απορροφώνται, διαφέρουν ανάλογα με το στάδιο της ανάπτυξής του, αλλά και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες

αναπτύσσεται (μήκος ημέρας, θερμοκρασία, ένταση φωτισμού, ώρες ηλιοφάνειας) (Resh 1997). Μεγάλες διακυμάνσεις μπορεί να παρουσιάζονται ακόμη και εντός της ημέρας εξαρτώμενες κυρίως από τις καιρικές συνθήκες (Savvas and Lenz, 1995).

Επιπλέον η παροχή κάποιων δισθενών θρεπτικών ιόντων στα φυτά, τα οποία δεν απορροφώνται εύκολα (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , SO_4^{2-}), μειώνεται και μπορεί να γίνει ανεπαρκής όταν επιχειρείται η μείωση των συγκεντρώσεων αυτών στο θρεπτικό διάλυμα ώστε να αντιστοιχούν στις αναλογίες απορρόφησης των ιόντων αυτών (De Krij, 1995)

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω αφ' ενός δεν χρησιμοποιούνται πια στις υδροπονικές καλλιέργειες θρεπτικά διαλύματα γενικής χρήσης, αλλά θρεπτικά διαλύματα ειδικά για κάθε καλλιέργεια (Πιν. 1.6), τα οποία εξατομικεύονται περαιτέρω ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και αφ' ετέρου οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων που προτείνονται για ένα διάλυμα μιας δεδομένης καλλιέργειας είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες αναλογίες απορρόφησης των φυτών. Έτσι οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα μπορεί να είναι 2 έως 10 φορές μεγαλύτερες από αυτές που είναι απαραίτητες για την ιδανική ανάπτυξη των φυτών (Oki and Lieth, 2004).

Για την ακριβή σύνθεση ενός θρεπτικού διαλύματος πρέπει να είναι γνωστές οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στο νερό άρδευσης, τα απόλυτα επιτρεπτά όρια για κάθε φυτικό είδος των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων που συνιστώνται στη βιβλιογραφία και οι επιμέρους αναλογίες μεταξύ των μακροστοιχείων (βλ. Αναλογίες θρεπτικών στοιχείων).

β) Αναλογίες θρεπτικών στοιχείων

Εκτός από το ύψος των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων σε ένα θρεπτικό διάλυμα, οι αναλογίες μεταξύ των επιμέρους συγκεντρώσεων των μακροστοιχείων είναι ιδιαίτερα σημαντικές και συνεπώς απαιτούν προσεκτική ρύθμιση. Σε μια δεδομένη ολική συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων υψηλή συγκέντρωση ενός μακροστοιχείου συνεπάγεται μικρότερη συγκέντρωση ενός άλλου μακροστοιχείου ή μακροστοιχείων (Sonneveld, 2002). Τέτοιες ανισορροπίες μεταξύ των αναλογιών των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων μπορεί να έχουν σαν αποτέλεσμα σοβαρά προβλήματα στη θρέψη των φυτών λόγω φαινομένων ανταγωνισμού μεταξύ ορισμένων στοιχείων.

παρ' όλο που το ύψος των συγκεντρώσεων είναι το ενδεδειγμένο (Σάββας, 1998).

Πίνακας 1.6. Παραδείγματα τυπικών θρεπτικών διαλυμάτων που έχουν παρασκευαστεί για την καλλιέργεια φυτών σε υδροπονικά συστήματα.

Θρεπτικά στοιχεία	Σύνθεση θρεπτικών διαλυμάτων		
	Hoagland and Arnon ⁽¹⁾ γενικής χρήσης (1950)	Sonneveld and Straver τριανταφυλλιά (1994)	Sonneveld and Straver φασόλι (1994)
	mmol/l		
NO ₃ ⁻	14,0	11,0	12,0
H ₂ PO ₄ ⁻	1,0	1,25	1,25
S O ₄ ²⁻	2,0	1,25	1,125
K ⁺	6,0	4,5	5,5
NH ₄ ⁺	1,0	1,5	1,0
Ca ²⁺	4,0	3,25	3,25
Mg ²⁺	2,0	1,125	1,25
	μmol/l		
Fe	25,0	25,0	10,0
Mn	9,1	5,0	10,0
Zn	0,75	3,5	4,0
B	46,3	20,0	20,0
Cu	0,3	0,75	0,5
Mo	0,1	0,5	0,5
Cl	—	—	—

⁽¹⁾: Από Savvas, 2001

Γενικά σε ένα θρεπτικό διάλυμα η ολική συγκέντρωση κατιόντων (C_κ) πρέπει εξορισμού να είναι ίση με την ολική συγκέντρωση ανιόντων (C_α)

$$C_{\kappa}=C_{\alpha}$$

(1.1)

Οι επιμέρους αναλογίες μεταξύ των μακροστοιχείων μπορεί να περιλαμβάνουν δύο ή περισσότερα στοιχεία και θεωρητικά μπορούν να κυμαίνονται σε ευρεία όρια, στην πράξη όμως περιορίζονται σε σαφώς στενότερα όρια (De Rijck and Schrevens, 1998b). Οι αναλογίες μεταξύ των μακροστοιχείων σε ένα θρεπτικό διάλυμα που κυρίως παίζουν καθοριστικό ρόλο στην καταλληλότητα του διαλύματος είναι η αναλογία K:Ca:Mg, η αναλογία N:K η αναλογία NH_4^+ :ολικόN και η αναλογία P:ολικά ανιόντα.

Η αναλογία μεταξύ των μακροκατιόντων (K:Ca:Mg) σε ένα θρεπτικό διάλυμα είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού επηρεάζει τόσο την ανάπτυξη όσο και την παραγωγή των φυτών (Sonneveld and Voogt, 1985). Επιπλέον διαφορετικά φυτικά είδη προτιμούν διαφορετικές αναλογίες. Έτσι οι αναλογίες που προτείνονται από τον Sonneveld (2002) για τις καλλιέργειες αγγουριού, πιπεριάς, τομάτας και τριανταφυλλιάς είναι 1,2:2,4:2,4, 1,3:4,2:4,3, 1,3:4,5:5 και 2,6:5,6:10 αντίστοιχα.

Η αναλογία απορρόφησης N:K διαφέρει σημαντικά κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας, ενώ σημαντικές διαφορές έχουν καταγραφεί και κατά τη διάρκεια της ημέρας (Adams, 1980, Adams and Massey, 1984). Έτσι σύμφωνα με τους Tariq and Dabed (1984) στην πιπεριά η αναλογία απορρόφησης N:K (σε βάση χημικού ισοδύναμου) είναι περίπου 2,8 μέχρι την εμφάνιση του πρώτου άνθους, μειώνεται στο 2,15 κατά την περίοδο πριν την έναρξη της καρπόδεσης, αυξάνεται στο 2,8 κατά την περίοδο της καρπόδεσης και τέλος κατά τη διάρκεια της παραγωγής φτάνει στο 3,3.

Το ποσοστό του αμμωνιακού N σε σχέση με το ολικό N (NH_4^+ :ολικό N) δεν επηρεάζει την συνολική προσλαμβανόμενη ποσότητα N από τα φυτά, αφού τόσο τα NH_4^+ όσο και τα NO_3^- μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πηγές N από αυτά (Savvas, 2001, Savvas et al, 2006). Η αναλογία αυτή όμως είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον έλεγχο του pH στο χώρο των ριζών (Savvas et al., 2006, βλ. επίσης παρ. 2.1.7.3. δ). Τέλος η αναλογία P προς όλικα θρεπτικά ανιόντα πρέπει να διατηρείται σε πολύ χαμηλά επίπεδα (συνήθως μικρότερα του 0,1) διαφορετικά μπορεί να παρατηρηθεί ιζηματοποίηση φωσφορικών αλάτων (De Rijck and Schrevens, 1998a).

γ) Ολική συγκέντρωση αλάτων

Παλιότερα η ολική συγκέντρωση αλάτων ενός θρεπτικού διαλύματος εκφράζονταν ως ωσμωτική πίεση ή, σπανιότερα, ως ολικό βάρος αλάτων ανά λίτρο διαλύματος. Τα τελευταία χρόνια όμως έχει καθιερωθεί, η ολική συγκέντρωση αλάτων, να εκφράζεται ως ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC σε dS/m), λόγω της ευκολίας και της ακρίβειας με την οποία μπορεί να μετρηθεί, το μέγεθος αυτό και αναφέρεται με τον όρο “αλατότητα”.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός υδατικού διαλύματος σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των ιόντων που βρίσκονται διαλυμένα σ' αυτό. Είναι γνωστό (από έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στο US Salinity Laboratory Staff την δεκαετία του 1950) ότι, εντός των ορίων της EC που συνήθως εφαρμόζεται στα υδροπονικά θρεπτικά διαλύματα, η EC απλών αλατούχων διαλυμάτων συνδέεται περίπου γραμμικά με την αντίστοιχη συγκέντρωση του άλατος σε βάση χημικού ισοδύναμου (meq/l). Η παραπάνω σχέση δεν είναι επακριβώς γραμμική. Σε μικρό εύρος τιμών όμως η σχέση μεταξύ των πραγματικών συγκεντρώσεων των αλάτων και των συγκεντρώσεων που αντιστοιχούν στις τιμές της EC μπορεί να θεωρηθεί γραμμική και επομένως στα υδροπονικά συστήματα που χρησιμοποιούνται στην καλλιεργητική πράξη οι αποκλίσεις μπορούν να θεωρούνται αμελητέες (De Rijck and Schrevens, 1998b). Έτσι, στα περισσότερα ισορροπημένα θρεπτικά διαλύματα που χρησιμοποιούνται στις υδροπονικές καλλιέργειες, τα οποία έχουν EC μεταξύ 0,8 και 4 dS/m, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω εμπειρική γραμμική σχέση για τη μετατροπή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, E (dS/m), σε ολική συγκέντρωση αλάτων, C (meq/l) και αντίστροφα (Savvas and Adamidis, 1999):

$$C=9,819E-1,462 \quad (1.2)$$

Συνεπώς σε ένα θρεπτικό διάλυμα η EC αποτελεί μέτρο της περιεκτικότητάς του σε μακροστοιχεία και άλλα ανόργανα άλατα, χωρίς όμως να δίνει καμία πληροφορία για το είδος των αλάτων αυτών. Τα ιχνοστοιχεία απαντώνται στα θρεπτικά διαλύματα σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις σε σχέση με τις συγκεντρώσεις των μακροστοιχείων (περίπου 1/500) και πρακτικά δεν παίζουν κανένα ρόλο στο ύψος της ολικής συγκέντρωσης αλάτων σ' αυτά (Σάββας, 1998). Μολαταύτα, η EC χρησιμοποιείται στην πράξη σαν βασικό μέγεθος αναφοράς τόσο για τον καθημερινό έλεγχο της κατάστασης του

θρεπτικού διαλύματος στη ριζόσφαιρα, όσο και για την πιστοποίηση της καταλληλότητας των νεοπαρασκευασθέντων διαλυμάτων (Adams, 2002). Τιμές EC χαμηλότερες από ένα όριο υποδηλώνουν ότι η περιεκτικότητα του θρεπτικού διαλύματος σε ορισμένα τουλάχιστον μακροστοιχεία είναι ανεπαρκής για την κατάλληλη θρέψη των φυτών. Αντίθετα, τιμές υψηλότερες από ένα όριο σημαίνουν ότι η συνολική περιεκτικότητα του διαλύματος σε άλατα (θρεπτικά στοιχεία και μη) είναι τόσο μεγάλη που τα φυτά υφίστανται αλατούχο καταπόνηση (Σάββας, 1998). Για τα περισσότερα λαχανοκομικά φυτά η EC του θρεπτικού διαλύματος πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 2 και 3, σπανιότερα μέχρι 4 dS/m, ενώ για το φασόλι, φυτό ευαίσθητο στην αλατότητα, η EC πρέπει να είναι 1,7 dS/m (Sonneveld and Straver, 1994).

δ) pH

Το pH των θρεπτικών διαλυμάτων (μέτρο της περιεκτικότητάς τους σε ιόντα $[H^+]$) επηρεάζει τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων στο περιβάλλον των ριζών και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την καταλληλότητά τους (Graves, 1983, Schwarz, 1995). Στα συστήματα υδροπονικών καλλιεργειών, λόγω του μικρού όγκου του υποστρώματος ανά φυτό και της απουσίας ρυθμιστικής ικανότητας, μπορεί να συμβούν μεγάλες αλλαγές στο pH του διαλύματος στο χώρο των ριζών εντός μικρών χρονικών διαστημάτων. Γι' αυτό το λόγο, στις υδροπονικές καλλιέργειες θα πρέπει να λαμβάνονται ορισμένα μέτρα ώστε το pH στο περιβάλλον των ριζών να παραμένει σε σχετικά στενά όρια γύρω από μία τιμή στόχο (Savvas, 2001). Για τα περισσότερα είδη φυτών το pH στη ριζόσφαιρα θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 5,5 και 6,5. Τιμές pH μεταξύ 5,0 – 5,5 και 6,5 – 7,0 δεν δημιουργούν ιδιαίτερα προβλήματα στα περισσότερα φυτά (Graves, 1983). Αντίθετα, τα πιο πολλά φυτά, όταν αρδεύονται με θρεπτικό διάλυμα, του οποίου το pH είναι μεγαλύτερο του 7,0 ή μικρότερο του 4,8 – 5,0, εμφανίζουν σημαντική μείωση της ανάπτυξής τους (Islam et al., 1980).

Όταν το pH στο χώρο των ριζών είναι υψηλότερο από 6,5 η απορρόφηση των P, Fe, Cu, Zn και Mn από τα φυτά μπορεί να είναι ανεπαρκής με συνέπεια να υφίσταται σοβαρός κίνδυνος εμφάνισης τροφопενιών (Savvas, 2001, Savvas et al., 2003). Σε τέτοιες τιμές pH αυξάνεται η μετατροπή του $H_2PO_3^-$ σε HPO_3^{2-} που απορροφάται δυσκολότερα από τα φυτά (De Rijck and

Schrevens, 1997), ενώ παράλληλα παρατηρείται ιζηματοποίηση φωσφορικού ασβεστίου (De Rijck and Schrevens, 1998a) και αυξάνεται η δημιουργία ιζημάτων των Fe, Mn, Zn και Cu με αποτέλεσμα τον περιορισμό της διαθεσιμότητάς τους για τα φυτά (Sonneveld and Voogt, 1980).

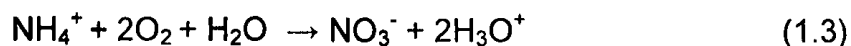
Από την άλλη πλευρά τιμές pH μικρότερες του 4,0 έχουν αποτέλεσμα την εμφάνιση τοξικότητας H^+ στις ρίζες και τη δραματική μείωση της απορρόφησης Ca, Mg και K από τα φυτά (Islam et al., 1980). Επιπλέον διάφορες μορφές αδιάλυτων οξειδίων και υδροξειδίων του Mn και του Al μπορεί να γίνουν διαλυτές σε pH μικρότερο του 5,0 και να εμφανιστούν συμπτώματα τοξικότητας των δύο αυτών στοιχείων στα φυτά (Savvas, 2001).

Για το φασόλι οι Islam et al. (1980) αναφέρουν ότι τα καλύτερα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν όταν το pH του θρεπτικού διαλύματος ήταν 5,5. Σε pH 8,5 η ανάπτυξη των φυτών και η παραγωγή μειώθηκαν σημαντικά, ενώ σε pH μικρότερο του 4,0 παρατηρήθηκαν νεκρώσεις στις κορυφές των ριζών.

Η ρύθμιση του pH του θρεπτικού διαλύματος στα κατάλληλα επίπεδα δεν αποτελεί πρόβλημα όταν για την παρασκευή του διαλύματος χρησιμοποιείται βρόχινο νερό (pH περίπου 5,8). Όταν όμως χρησιμοποιείται νερό από πηγές, γεωτρήσεις ή ταμειυτήρες, περιέχει όξινα ανθρακικά άλατα του Ca και του Mg οπότε η αντίδρασή του είναι αλκαλική (pH:7 – 8). Σε αυτές τις περιπτώσεις για τη μείωση του pH στα επιθυμητά επίπεδα απαιτείται η προσθήκη οξέων στο παρασκευαζόμενο θρεπτικό διάλυμα (συνήθως H_3PO_4 ή HNO_3) σε ποσότητες ανάλογες με τις συγκεντρώσεις των οξυανθρακικών ανιόντων στο νερό (Σάββας, 1998).

Η διατήρηση του pH στο χώρο των ριζών στα κατάλληλα επίπεδα είναι ένα άλλο θέμα που πρέπει να συζητηθεί. Η απορρόφηση ενός κατιόντος από το ριζικό σύστημα προκαλεί την αποβολή ενός ανιόντος (συνήθως HCO_3^-), ενώ η απορρόφηση ενός ανιόντος την αποβολή ενός υδρογονοϊόντος. Συνήθως ο ρυθμός απορρόφησης ανιόντων (κυρίως NO_3^-) από τα φυτά είναι ελαφρά μεγαλύτερος από αυτόν των κατιόντων με αποτέλεσμα ο ρυθμός έκλυσης HCO_3^- να είναι μεγαλύτερος αυτού των H^+ και το pH του διαλύματος στο χώρο των ριζών να τείνει να αυξάνει. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο το pH του νωπού διαλύματος να είναι ελαφρώς μικρότερο της τιμής του pH που είναι επιθυμητή στη ριζόσφαιρα (Savvas, 2001).

Ένας δεύτερος τρόπος διατήρησης του pH στο χώρο των ριζών στα επιθυμητά επίπεδα είναι η προσθήκη στο θρεπτικό διάλυμα μέρους του αζώτου με τη μορφή NH_4^+ . Το NH_4^+ στο θρεπτικό διάλυμα νιτροποιείται με μεγάλη ταχύτητα (μετατρέπεται σε NO_2^- και στη συνέχεια σε NO_3^-) από τη δράση αυτότροφων, αερόβιων βακτηρίων των γενών *Nitrosomonas* και *Nitrobacter* μέσω μιας διαδικασίας που μπορεί να συνοψισθεί στην ακόλουθη αντίδραση:



Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα σταδιακά στο χώρο των ριζών και έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του pH μέσω του σχηματισμού H_3O^+ . Σύμφωνα με τον Sonneveld (2002), ποσοστό 5 – 15% του ολικού N σε αμμωνιακή μορφή είναι αρκετό για να εξασφαλιστεί ο έλεγχος του pH στη ριζόσφαιρα.

1.1.7.4. Παροχή θρεπτικών στοιχείων σε κλειστά υδροπονικά συστήματα

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά την αναπλήρωση των θρεπτικών στοιχείων και του νερού που απομακρύνονται από τα ανακυκλούμενα θρεπτικά διαλύματα (διαλύματα απορροής) στα κλειστά υδροπονικά συστήματα. Σε πλήρως κλειστά υδροπονικά συστήματα, οι απώλειες θρεπτικών στοιχείων και νερού από το θρεπτικό διάλυμα οφείλονται κυρίως στην απορρόφηση των φυτών και σε μικρότερο βαθμό στη δημιουργία ιζημάτων, σε διαρροές του συστήματος και στην εξάτμιση (Daum and Schenk, 1998). Συνεπώς οι αναλογίες ιόντων/νερό που εισέρχονται στο σύστημα πρέπει να είναι ίσες με τις αναλογίες ιόντων προς νερό που χάνονται από το σύστημα, έτσι ώστε να μην παρατηρηθεί βαθμιαία συσσώρευση ή εξάντληση κάποιων ιόντων στο θρεπτικό διάλυμα (Sonneveld, 2002).

Για την αναπλήρωση των θρεπτικών στοιχείων στα θρεπτικά διαλύματα έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές. Μία από αυτές περιλαμβάνει την ανάμιξη του διαλύματος απορροής και νερού σε μια αυτόματα ρυθμιζόμενη αναλογία με στόχο μια προκαθορισμένη τιμή EC για το νέο διάλυμα και στη συνέχεια την έγχυση των λιπασμάτων σε σταθερές αναλογίες (De Kreij et al., 1999). Σε μια άλλη τεχνική, πρώτα εγχέονται στο νερό τα λιπάσματα σε καθορισμένες ποσότητες και στη συνέχεια ακολουθεί η ανάμιξη του παραγόμενου διαλύματος με το προς ανακύκλωση διάλυμα απορροής (De Kreij et al., 1999). Και σε αυτή την περίπτωση η αναλογία ανάμιξης ρυθμίζεται

αυτόματα σε πραγματικό χρόνο με στόχο μία σταθερή τιμή EC στο νέο διάλυμα τροφοδοσίας.

Στις παραπάνω τεχνικές η αναλογία ανάμιξης εξαρτάται μόνο από την EC του ανακυκλούμενου διαλύματος, χωρίς να λαμβάνεται υπ' όψιν ο όγκος του, με αποτέλεσμα μερικές φορές να είναι αναγκαία η απόρριψη μέρους του διαλύματος αυτού για να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή στόχος της EC. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος οι Savvas and Manos (1999) πρότειναν μια άλλη τεχνική όπου η EC και ο όγκος του ανακυκλούμενου διαλύματος απορροής μετρούνται σε πραγματικό χρόνο και χρησιμοποιούνται για τον αυτόματο υπολογισμό των αναλογιών έγχυσης των θρεπτικών στοιχείων.

Οι μέθοδοι αυτές, που έχουν αναπτυχθεί για χρήση σε εμπορικά συστήματα υδροπονικών καλλιεργειών, βασίζονται στη μέτρηση της EC. Όμως με τη μέτρηση της EC δεν είναι δυνατός ο καθορισμός της σύνθεσης του διαλύματος απορροής ενώ και ο καθορισμός στο θερμοκήπιο των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα απορροής δεν είναι τεχνικά δυνατός. Έτσι οι αναλογίες θρεπτικών στοιχείων προς νερό που εγχέονται στα νέα θρεπτικά διαλύματα βασίζονται σε διάφορα μοντέλα απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά και σε πειραματικά δεδομένα (Savvas, 2002b).

Ο Savvas (2002b) ανέπτυξε δύο μοντέλα για τον υπολογισμό των θρεπτικών στοιχείων που απαιτούνται για την αναπλήρωση των ανακυκλούμενων θρεπτικών διαλυμάτων για χρήση σε εμπορικά συστήματα υδροπονικών καλλιεργειών. Το πρώτο μοντέλο βασίζεται στον συχνό προσδιορισμό της χημικής σύστασης του διαλύματος απορροής για τον καθορισμό των δοσολογιών παροχής θρεπτικών στοιχείων (CDW), ενώ το δεύτερο στην γνώση των μέσων αναλογιών απορρόφησης νερού προς θρεπτικό στοιχείο (CUR).

1.2 ΑΛΑΤΟΤΗΤΑ

1.2.1 Ορισμός

Όπως έχει αναφερθεί αλατότητα είναι η συγκέντρωση διαλυτών αλάτων (ανόργανων ιόντων) στο διάλυμα που βρίσκεται στην περιοχή του ριζοστρώματος των φυτών (εδαφικό διάλυμα ή τεχνητό θρεπτικό διάλυμα). Η αλατότητα αν και μπορεί να μετρηθεί άμεσα ως συνολική συγκέντρωση διαλυτών αλάτων στο διάλυμα (g/l ή mmol/l ή meq/l), εκφράζεται συνήθως έμμεσα είτε ως ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) (mmosh/cm ή dS/m) είτε ως ωσμωτικό δυναμικό (bar ή kPa ή at). Λόγω της ευκολίας και της ακρίβειας μέτρησης, έχει καθιερωθεί να εκφράζεται ως ηλεκτρική αγωγιμότητα σε dS/m.

Υψηλή αλατότητα στο περιβάλλον των ριζών οφείλεται στη συσσώρευση ανόργανων ιόντων. Τα ιόντα που συνήθως συσσωρεύονται και είναι υπεύθυνα για την αύξηση της αλατότητας είναι το Na^+ και το Cl^- , ενώ σε μικρότερο βαθμό και τα Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} και HCO_3^- (Σάββας, 2001).

1.2.2. Δημιουργία υψηλής αλατότητας

Από το νερό που χορηγείται σε μια καλλιέργεια ένα μέρος εξατμίζεται και ένα μεγαλύτερο μέρος απορροφάται από τα φυτά. Τα διαλυτά άλατα που περιέχει το νερό που εξατμίζεται παραμένουν στο έδαφος. Επιπλέον, λόγω των μηχανισμών εκλεκτικής απορρόφησης και απέκκρισης που διαθέτουν τα φυτά, ένα μέρος των αλάτων που περιέχονται σε υπερβολική συγκέντρωση στο νερό που απορροφάται ή δεν είναι αναγκαία για την ανάπτυξη των φυτών παραμένει επίσης στο έδαφος. Ως τελικό αποτέλεσμα, η συσσώρευση των αλάτων στο έδαφος αυξάνεται, ενώ και η χρήση υψηλών ποσοτήτων λιπασμάτων επιδεινώνει την κατάσταση.

Το πρόβλημα γίνεται πιο έντονο σε περιοχές που επικρατούν ξηροθερμικές κλιματικές συνθήκες. Σε τέτοιες περιοχές τόσο η εξάτμιση του νερού από το έδαφος όσο και η διαπνοή των φυτών αυξάνονται με συνέπεια την αύξηση της συσσώρευσης των αλάτων στο περιβάλλον των ριζών. Επιπλέον δεν υπάρχει συνήθως επάρκεια καλής ποιότητας αρδευτικού νερού, με συνέπεια η χορήγηση πολύ μεγάλων αρδευτικών δόσεων με στόχο την έκπλυση των συσσωρευμένων στο έδαφος αλάτων να μην είναι εφικτή (Σάββας, 2001).

Η Υπηρεσία Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Εθνών εκτιμά ότι, παγκοσμίως, περίπου το 20% της γεωργικής γης και το 50% των αρδευόμενων καλλιεργούμενων εδαφών έχουν σε κάποιο βαθμό υποβαθμιστεί λόγω της συσσώρευσης αλάτων (Yokoi et al., 2002). Ακόμη περισσότερο, η διαφαινόμενη αλλαγή του κλίματος, η ολοένα μεγαλύτερη ανάγκη για νερό άρδευσης και η μη εμφάνιση νέων μεθόδων καλλιέργειας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το πρόβλημα της εναλάτωσης των εδαφών θα καταστεί μεγαλύτερο στο μέλλον (Barrett-Lennard, 2003).

Στις υδροπονικές καλλιέργειες, όπου το ριζικό σύστημα καταλαμβάνει μικρό όγκο σε σχέση με τις καλλιέργειες στο έδαφος, συσσώρευση αλάτων στο χώρο των ριζών μπορεί να συμβεί πολύ γρήγορα, όταν αυτά περιέχονται σε υψηλές συγκεντρώσεις στο νερό άρδευσης (Sonneveld et al., 1999a). Ιδιαίτερα στα κλειστά υδροπονικά συστήματα, στα οποία το θρεπτικό διάλυμα ανακυκλώνεται, αύξηση της αλατότητας παρατηρείται όταν οι συγκεντρώσεις των ιόντων που περιέχονται στο θρεπτικό διάλυμα είναι μεγαλύτερες από τις αναλογίες απορρόφησης ιόντων/νερό από τα φυτά (Carmassi et al., 2005, Savvas et al., 2005 a) (βλ. 1.1.7.3, 1.1.7.4).

1.2.3. Προβλήματα που προκαλεί η αλατότητα στα καλλιεργούμενα φυτά

1.2.3.1. Μείωση του υδατικού δυναμικού στο περιβάλλον των ριζών

Το υδατικό δυναμικό (Ψ) εκφράζει την ελεύθερη ενέργεια του νερού ή την ικανότητα παραγωγής έργου. Είναι ένα σχετικό μέγεθος που εκφράζει τη διαφορά του δυναμικού του νερού σε δεδομένη κατάσταση σε σχέση με μια άλλη πρότυπη κατάσταση. Ως πρότυπη κατάσταση έχει ορισθεί αυτή του καθαρού (απεσταγμένου) νερού, όταν βρίσκεται υπό κανονική ατμοσφαιρική πίεση. Η τιμή του υδατικού δυναμικού στην πρότυπη κατάσταση έχει ορισθεί στο μηδέν.

Η γνώση του υδατικού δυναμικού σε δύο περιοχές υποδεικνύει την κατεύθυνση μετακίνησης του νερού, αφού θα κινηθεί από περιοχές με υψηλό προς αυτές με χαμηλό δυναμικό. Έτσι, για να υπάρχει κίνηση νερού από το έδαφος προς την ατμόσφαιρα μέσω των φυτών, θα πρέπει οι ρίζες να διατηρούν χαμηλότερο δυναμικό από αυτό του εδάφους, τα φύλλα χαμηλότερο από αυτό των ριζών και η ατμόσφαιρα χαμηλότερο από αυτό των φύλλων (Μανέτας, 2003).

Το Ψ εξαρτάται από την ωσμωτική πίεση (π), την υδροστατική πίεση (P) και τη βαρύτητα (G) σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\Psi = \pi + P + G \quad (1.4)$$

Σε μικρές υψομετρικές διαφορές η τιμή του G είναι αμελητέα οπότε στο σύστημα έδαφος-φυτό-ατμόσφαιρα η 2.4 είναι:

$$\Psi = \pi + P \quad (1.5)$$

Στα εδάφη η τιμή του P εξαρτάται από την ποσότητα του νερού στο έδαφος και κυμαίνεται από μηδέν, για πολύ καλά ποτισμένα εδάφη, έως και -3 MPa, για πολύ ξηρά εδάφη (Μανέτας 2003). Η τιμή του π εξαρτάται από την περιεκτικότητα των εδαφών σε άλατα, κυρίως NaCl. Αύξηση της συγκέντρωσης του NaCl στη ριζόσφαιρα κατά 0,1 mM μειώνει το Ψ κατά 5 bar (Mohr and Schopfer, 1995).

Στα υδροπονικά συστήματα το P είναι μηδέν (υδροπονικά συστήματα καθαρού θρεπτικού διαλύματος) ή κοντά στο μηδέν (υδροπονικά συστήματα σε αδρανή υποστρώματα), οπότε το υδατικό δυναμικό εξαρτάται κυρίως από τη συγκέντρωση των αλάτων στο περιβάλλον των ριζών και κατ' επέκταση στο θρεπτικό διάλυμα. Αύξηση της συγκέντρωσης αλάτων στο θρεπτικό διάλυμα δημιουργεί χαμηλό υδατικό δυναμικό στο χώρο των ριζών (Ψ_s) (μειώνει τη διαθεσιμότητα του νερού), οπότε τα φύλλα πρέπει να αποκτήσουν ακόμη αρνητικότερο Ψ_s για να διατηρήσουν τη διαβάθμιση υδατικού δυναμικού (Ψ_w) στο σύστημα έδαφος-ρίζα-φυτό (Κωνσταντινίδου, 2003).

1.2.3.2. Επίδραση της αλατότητας στην απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων

Τα περισσότερα καλλιεργούμενα φυτά είναι γλυκόφυτα και έχουν εξελιχθεί κάτω από συνθήκες χαμηλής αλατότητας (Greenway and Munns, 1980). Οι μηχανισμοί που έχουν αναπτύξει για την απορρόφηση, μεταφορά και αξιοποίηση των θρεπτικών στοιχείων μπορεί να μην είναι τόσο αποτελεσματικοί κάτω από συνθήκες υψηλής αλατότητας. Οι υψηλές συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- στο περιβάλλον των ριζών μπορεί να οδηγήσουν στη δημιουργία αυξημένων αναλογιών $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$, Na^+/K^+ , $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ και $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-$ και στην εμφάνιση θρεπτικών διαταραχών στα φυτά (Grattan and Grieve, 1999). Ούτως ή άλλως οι αλληλεπιδράσεις που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων στο περιβάλλον των ριζών, την

απορρόφησή τους από τα φυτά και την κατανομή τους στο φυτικό σώμα είναι ιδιαίτερα σύνθετες ακόμη και σε περιβάλλοντα χαμηλής αλατότητας. Η παρουσία υψηλής αλατότητας προσθέτει ένα επιπλέον επίπεδο πολυπλοκότητας στην ανόργανη θρέψη των φυτών (Grattan and Grieve, 1999).

α) Αζωτο

Η απορρόφηση του αζώτου από τα φυτά περιορίζεται κάτω από συνθήκες υψηλής αλατότητας στο έδαφος ή στο θρεπτικό διάλυμα. Η αύξηση της απορρόφησης και της συσσώρευσης του Cl^- συνοδεύεται από μείωση των NO_3^- στα φύλλα διαφόρων φυτών (Abdelgadir et al., 2005).

Το παραπάνω φαινόμενο παρατηρήθηκε στο αγγούρι (Martinez and Cerda, 1989), στο πεπόνι (del Amor et al., 1999), στη μελιτζάνα (Savvas and Lenz, 2000) και στην τομάτα (Fernandez-Garcia et al., 2004). Αυτή η μείωση από άλλους αποδίδεται στον ανταγωνισμό μεταξύ NO_3^- και Cl^- στην απορρόφηση (Bar et al., 1997) και από άλλους στη μείωση της απορρόφησης του νερού λόγω υψηλής αλατότητας (Lea-Cox and Syversten, 1993).

Η μορφή με την οποία το N παρέχεται στα φυτά μπορεί να επηρεάσει τόσο τη συσσώρευση του Cl^- , όσο και των K^+ και Ca^{2+} στα φυτά. Οι Martinez and Cerda (1989) αναφέρουν ότι όταν αυξήθηκε η αναλογία $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ σε καλλιέργεια αγγουριού κάτω από συνθήκες υψηλής αλατότητας, τα φυτά συσσωρεύσαν μεγαλύτερες ποσότητες Na^+ και Cl^- και μικρότερες K^+ και Ca^{2+} .

β) Φωσφόρος

Συνήθως σε συνθήκες υψηλής αλατότητας η συγκέντρωση του P στους φυτικούς ιστούς μειώνεται, σε κάποιες περιπτώσεις όμως αναφέρεται αύξηση και σε άλλες καμία επίδραση στην απορρόφηση του P. Οι συνθήκες ανάπτυξης των φυτών, το φυτικό είδος και η ποικιλία φαίνεται ότι παίζουν μεγάλο ρόλο στην απορρόφηση του P (Grattan and Grieve, 1999).

Σε αντίθεση με το NO_3^- -N, στην περίπτωση του P δεν φαίνεται ότι το Cl^- ανταγωνίζεται το H_2PO_4^- κατά την απορρόφηση από τα φυτά (Grattan and Grieve, 1999). Η μειωμένη περιεκτικότητα των φυτικών ιστών σε P σε αλατούχα εδάφη προκαλείται λόγω της μείωσης της διαθεσιμότητας του P στο

εδαφικό διάλυμα. Η τελευταία είναι αποτέλεσμα της μειωμένης ενεργότητας του P στο εδαφικό διάλυμα λόγω του υψηλού ιοντικού του σθένους και της χαμηλής διαλυτότητας των αλάτων Ca-P (Grattan and Grieve, 1999).

Οι περισσότερες μελέτες που έδειξαν μείωση της συγκέντρωσης του P λόγω υψηλής αλατότητας πραγματοποιήθηκαν σε καλλιέργειες στο έδαφος, ενώ αυτές που έδειξαν αύξηση σε υδροπονικές καλλιέργειες, όπου συνήθως οι συγκεντρώσεις του P στα θρεπτικά διαλύματα είναι μεγαλύτερες κατά τάξεις μεγέθους από ότι στο εδαφικό διάλυμα (π.χ. 2 mM έναντι 2 μ M) (Hu and Schmidhalter, 2005).

γ) Μακροκατιόντα (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+})

Γενικά η σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης των Ca^{2+} , K^+ και Mg^{2+} στα φύλλα γλυκοφύτων και της συγκέντρωσης του NaCl στο περιβάλλον των ριζών τους εξαρτάται τόσο από το είδος του φυτού, όσο και από το κατιόν και τον τρόπο που αυτό αλληλεπιδρά με τα ιόντα Na^+ και Cl^- , αλλά και τα υπόλοιπα θρεπτικά στοιχεία (Greenway and Munns, 1980, Grattan and Grieve, 1999, Dorais et al., 2001).

Η αύξηση της αλατότητας στο περιβάλλον των ριζών έχει σαν συνέπεια την αύξηση των αναγκών των φυτών για Ca^{2+} , ενώ η απορρόφηση του ιόντος μπορεί να μειωθεί λόγω αλληλεπιδράσεων μεταξύ ιόντων και δημιουργίας ιζημάτων (Grattan and Grieve, 1999). Χαμηλή συγκέντρωση Ca^{2+} ή/και υψηλή αναλογία $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ στο περιβάλλον των ριζών επηρεάζει αρνητικά την περατότητα των μεμβρανών και μειώνει την εκλεκτικότητά τους (Dorais et al., 2001, Yokoi et al., 2002).

Για το K^+ αναφέρεται ότι, συνήθως, η αύξηση της αλατότητας και/ή του λόγου $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ στο περιβάλλον των ριζών οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης του ιόντος στα φύλλα των φυτών λόγω ανταγωνισμού στην απορρόφηση μεταξύ των ιόντων K^+ και Na^+ (Grattan and Grieve, 1999, Dorais et al., 2001). Παρόλα αυτά σε άλλα φυτά, και ιδιαίτερα σε φυτά ευαίσθητα στην αλατότητα που συσσωρεύουν Na^+ στους βλαστούς, το K^+ μπορεί να απορροφάται με έντονο ρυθμό παρά τη μεγάλη συγκέντρωση του Na^+ στο περιβάλλον των ριζών με αποτέλεσμα να παρατηρείται ακόμη και αύξηση της συγκέντρωσης του στα φύλλα (Greenway and Munns, 1980).

Διάφοροι ερευνητές, μεταξύ των οποίων ο Λυκοσκούφης (2003) και οι Cabanero et al. (2004) στην πιπεριά και οι Savvas et al. (2005b) στο αγγούρι αναφέρουν μείωση της συγκέντρωσης των ιόντων K^+ , Ca^{2+} και Mg^{2+} με την αύξηση της αλατότητας. Άλλοι, όπως οι Hill et al. (1998) στο ταρό (*Colocasia esculenta*) αναφέρουν αύξηση της συγκέντρωσης του K^+ με ταυτόχρονη μείωση των συγκεντρώσεων των Ca^{2+} και Mg^{2+} . Οι Meiri et al. (1971) και οι Seemann and Critchley (1985) αναφέρουν αύξηση της συγκέντρωσης του K^+ με την αύξηση της εξωτερικής αλατότητας και καμία μεταβολή στις συγκεντρώσεις των Ca^{2+} και Mg^{2+} στα φύλλα φυτών φασολιού, ενώ τέλος ερευνητές όπως οι Cabrera and Perdomo (2003) στο τριαντάφυλλο και οι Saied et al. (2005) στη φράουλα δεν αναφέρουν καμία σημαντική αλλαγή στη συγκέντρωση των μακροκατιόντων στα φύλλα των φυτών με την αύξηση της αλατότητας.

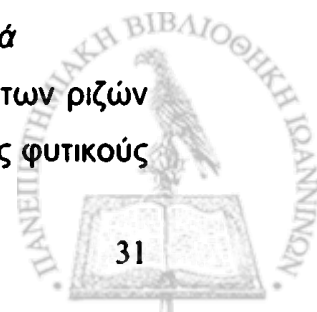
Ακόμη και για το ίδιο φυτό, διαφορετικοί ερευνητές μπορεί να αναφέρουν διαφορετική σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης ενός κατιόντος στα φύλλα και της αύξησης της εξωτερικής συγκέντρωσης NaCl, όπως π.χ. η συγκέντρωση του K^+ στα φύλλα πεπονιού όπου οι del Amor et al. (1999) αναφέρουν μείωση ενώ οι Sivritepe et al. (2005) αύξηση.

δ) Ιχνοστοιχεία

Η διαθεσιμότητα των ιχνοστοιχείων εξαρτάται κυρίως από τη διαλυτότητά τους και το pH του εδαφικού ή θρεπτικού διαλύματος. Σε περιβάλλοντα υψηλής αλατότητας η διαλυτότητα των ιχνοστοιχείων είναι χαμηλή και μπορούν να παρουσιαστούν τροφοπενίες των στοιχείων αυτών (Hu and Schmidhalter, 2005). Η εμφάνιση ή όχι τροφοπενιών εξαρτάται από το φυτικό είδος, το επίπεδο της αλατότητας, τις συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων και τις συνθήκες καλλιέργειας με αποτέλεσμα να αναφέρονται περιπτώσεις όπου υψηλή αλατότητα μειώνει τη συγκέντρωση ιχνοστοιχείων στα φυτά, άλλες που την αυξάνει και άλλες που δεν έχει καμιά επίδραση (Grattan and Grieve, 1999).

1.2.3.3. Επίδρασεις της αλατότητας (των ιόντων Na^+ και Cl^-) στα φυτά

Γενικά, η αύξηση της συσσώρευσης του NaCl στο περιβάλλον των ριζών οδηγεί σε αύξηση των συγκεντρώσεων των ιόντων Na^+ και Cl^- στους φυτικούς



ιστούς, όπως αποδεικνύεται από πλήθος μελετών σε διάφορα καλλιεργούμενα φυτά όπως π.χ. στην πιπεριά (Sonneveld and Van Der Burg, 1991, Lycoskoufis et al., 2005), στην τομάτα (Botrini et al., 2000, Mavrogianopoulos et al., 2002), στη μελιτζάνα (Savvas and Lenz, 1996, 2000), στο αγγούρι (Sonneveld and Van Der Burg, 1991, Savvas et al., 2005a), στο πεπόνι (del Amor et al., 1999, Sivritepe et al., 2005), στη φράουλα (Saied et al., 2005), στο ταρό (*Colocasia esculenta*) (Hill et al., 1998), στο φασόλι (Jacoby, 1964, Lahaye and Epstein, 1971, Greenway and Munns, 1980, Seemann and Critchley, 1985) καθώς και στο τριαντάφυλλο (Cabrera and Perdomo, 2003), το γαρύφαλλο και τη ζέρμπερα (Baas et al., 1995). Το Cl⁻ φαίνεται ότι συνήθως συσσωρεύεται στους φυτικούς ιστούς σε πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις από αυτές του Na⁺ (Seemann and Critchley, 1985, Sonneveld and Van Der Burg, 1991, Sonneveld et al., 1999a, Savvas et al., 2005a). Οι διαφορές αυτές αυξάνονται αντιστρόφως ανάλογα με την ηλικία των φύλων.

Υψηλές συγκεντρώσεις Na⁺ και Cl⁻ στους φυτικούς ιστούς προκαλούν προβλήματα στον μεταβολισμό (Mohr and Schorfer, 1995) και μείωση της ανάπτυξης ευαίσθητων φυτών (Greenway and Munns, 1980). Το άριστο για την ενζυμική δράση ιοντικό περιβάλλον στο κυτταρόπλασμα των φυτών περιέχει 100-200 mM K⁺ και 1-10 mM Na⁺. Υψηλότερη αναλογία Na/K ή/και υψηλότερες συγκεντρώσεις ιόντων αδρανοποιούν ένζυμα μειώνουν το μεταβολισμό του αζώτου και παρεμποδίζουν την πρωτεϊνική σύνθεση. (Taiz and Zeiger, 2002).

Συσσώρευση των ιόντων Na⁺ και Cl⁻ στα φύλλα μπορεί να δράσουν τοξικά και να προκαλέσουν περιφερειακή νέκρωση (Bernstein, 1975, Shannon and Grieve, 1999), ενώ υψηλές συγκεντρώσεις Cl⁻ στα εκπτυσσόμενα φύλλα κάποιων ειδών προκαλούν χλώρωση και τελικά το θάνατο των φύλλων ακόμη και αν η συγκέντρωση του Na⁺ σε αυτά είναι χαμηλή (Greenway and Munns, 1980). Σε υψηλές συγκεντρώσεις Na⁺ στις ρίζες των φυτών, το Na⁺, μπορεί να αντικαταστήσει το Ca²⁺ στις κυτταρικές μεμβράνες των ριζικών τριχιδίων με αποτέλεσμα τη μεταβολή της περατότητας των μεμβρανών και τη διαρροή K⁺ από τα κύτταρα (Taiz and Zeiger, 2002).

Η φωτοσύνθεση μειώνεται όταν υψηλές συγκεντρώσεις Na⁺ και Cl⁻ συσσωρεύονται στους χλωροπλάστες τόσο λόγω μείωσης της χλωροφύλλης

(Seemann and Critchley, 1985), όσο και λόγω μείωσης της απόδοσης της φωτοσυνθετικής διαδικασίας. Καθώς η μεταφορά ηλεκτρονίων κατά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης εμφανίζεται να είναι σχετικά ανθεκτική στη συσσώρευση αλάτων το πιο πιθανό είναι ότι επηρεάζεται είτε ο μεταβολισμός του άνθρακα είτε η φωτοφωσφορυλίωση (Taiz and Zeiger, 2002).

Η αλατότητα μειώνει την επιφάνεια των φύλλων. Σε μελέτες που έγιναν στο φασόλι παρατηρήθηκε μείωση του ρυθμού αύξησης των επιδερμικών κυττάρων που μπορεί να συνοδευόταν από μείωση του αριθμού τους. Συσσώρευση των στα φύλλα μπορεί να επηρεάσει την διαίρεση των κυττάρων (Jennings, 1976).

1.2.4. Μηχανισμοί αντιμετώπισης της αλατότητας

1.2.4.1. Μηχανισμοί αντιμετώπισης της μείωσης του υδατικού δυναμικού στο περιβάλλον των ριζών

Για την αντιμετώπιση της μείωσης του υδατικού δυναμικού στο περιβάλλον των ριζών (Ψ_s) τα φυτά προσπαθούν να μειώσουν το δικό τους υδατικό δυναμικό σε χαμηλότερα επίπεδα, χωρίς όμως την ταυτόχρονη απώλεια σπαργής των κυττάρων τους. Αυτό το επιτυγχάνουν με τη συσσώρευση ανόργανων ιόντων ή/και οργανικών μορίων στα κύτταρά τους.

Η συσσώρευση ανόργανων ιόντων (Na^+ και Cl^-) στα χυμοτόπια των φυτικών κυττάρων είναι μηχανισμός χαρακτηριστικός των αλοφύτων. Η συσσώρευση οργανικών μορίων (ωσμωλυτών) με υψηλή διαλυτότητα που δεν εμπλέκονται στον κυτταρικό μεταβολισμό ακόμη και σε αυξημένες συγκεντρώσεις, καλείται ωσμωτική προσαρμογή και είναι εντονότερη στα γλυκόφυτα. Οι ωσμωλύτες, μη τοξικοί οργανικοί μεταβολίτες που συσσωρεύονται στο κυττόπλασμα, αφ' ενός διατηρούν σε ισορροπία το υδατικό δυναμικό του κυττοπλάσματος με εκείνο του χυμοτοπίου και αφ' ετέρου διατηρούν χαμηλό το υδατικό δυναμικό του κυττάρου ώστε να αποφεύγεται η απώλεια της σπαργής του. Κυριότεροι ωσμωλύτες είναι η προλίνη, η σορβιτόλη και η γλυκίνη. Για τη σύνθεση των ωσμωλυτών τα φυτά δαπανούν σημαντικό ποσοστό άνθρακα που μπορεί να φτάσει έως και το 10% του φυτικού βάρους (Κωνσταντινίδου, 2003).

Η ωσμωτική προσαρμογή, παίζει σημαντικό ρόλο στον εγκλιματισμό του φυτού σε συνθήκες αλατότητας, καθώς μειώνει το υδατικό δυναμικό (Ψ_s) του

φυτού και οδηγεί το υδατικό δυναμικό της ρίζας σε τιμές αρνητικότερες από αυτό του εδάφους, επιτρέποντας τελικά στο νερό να εισρεύσει από το έδαφος στο φυτό (Κωνσταντινίδου, 2003).

Άλλοι μηχανισμοί προστασίας των φυτών στη μείωση του υδατικού δυναμικού του στο χώρο των ριζών είναι η παχυφυτική προσαρμογή (succulence), η αύξηση της αναλογίας των ριζών προς το υπέργειο μέρος και μηχανισμοί που προστατεύουν τα φύλλα από την απώλεια νερού (αύξηση του πάχους της εφυμενίδας, κάλυψη της φυλλικής επιφάνειας με τρίχες, μικρότερος αριθμός στομάτων ανά μονάδα φυλλικής επιφάνειας, κάλυψη των στομάτων με κηρούς, μερικό κλείσιμο των στομάτων).

Η παχυφυτική προσαρμογή συνίσταται στην αύξηση του πάχους των φύλλων. Στο φασόλι η αύξηση του πάχους του πρώτου πλήρους αναπτυγμένου φύλλου παρατηρείται όταν η εξωτερική συγκέντρωση NaCl ξεπεράσει τα 50 mM περίπου και είναι αποτέλεσμα της αύξησης του όγκου του σπογγώδους περεγχύματος (Jennings, 1976). Το φαινόμενο αυτό είναι αποτέλεσμα της αύξησης της συγκέντρωσης των ιόντων στο εσωτερικό των κυττάρων και της συνεπαγόμενης αύξησης της σπαραγής τους και έχει ως συνέπεια την διατήρηση της διαβάθμισης του υδατικού δυναμικού μεταξύ φύλλων και εξωτερικού μέσου υπέρ των φύλλων (Jennings, 1976).

1.2.4.2. Μηχανισμοί αποκλεισμού των ιόντων Na^+ και Cl^-

Τα περισσότερα γλυκόφυτα έχουν αναπτύξει διάφορους μηχανισμούς αποκλεισμού των ιόντων που δεν είναι απαραίτητα για τη θρέψη τους. Το πρώτο φράγμα που περιορίζει την είσοδο των ιόντων στα υπέργεια μέρη των φυτών αποτελεί η ενδοδερμίδα με την ταινία Caspary (Greenway and Munns 1980, Κωνσταντινίδου, 2003). Στη συνέχεια δραστηριοποιούνται δύο βασικοί μηχανισμοί, οι οποίοι συνήθως συνυπάρχουν και δρουν συμπληρωματικά μεταξύ τους: η ενεργός απέκκριση των ανεπιθύμητων ιόντων στο εξωτερικό μέσο και η συσσώρευσή τους σε παρεγχυματικούς ιστούς κατώτερων οργάνων (ρίζες, κατώτερους βλαστούς, μίσχους κατώτερων φύλλων) (Jacoby, 1964).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ιόντος το οποίο συσσωρεύεται στα κατώτερα φυτικά όργανα (στο ξυλώδες παρέγχυμα των ριζών και των κατώτερων βλαστών και στους μίσχους των φύλλων), ενώ οι ποσότητες αυτού που θα

φθάσουν στα ανώτερα και περισσότερα φωτοσυνθετικώς ενεργά φύλλα μεταφέρονται και πάλι προς τη ρίζα και απεκκρίνονται ενεργά, είναι το Na^+ (Jacoby, 1964, Lahaye and Epstein 1971, Greenway and Munns 1980, Seemann and Critchley 1985). Ένας άλλος μηχανισμός που δραστηριοποιείται με σκοπό τον περιορισμό του ρυθμού ανόδου των ανεπιθύμητων ιόντων στα υπέργεια μέρη των φυτών είναι το μερικό κλείσιμο των στομάτων (Λυκοσκούφης, 2003). Το κλείσιμο των στομάτων έχει σαν συνέπεια τη μείωση του ρεύματος της διαπνοής και επομένως του ρυθμού μεταφοράς των ιόντων στα υπέργεια μέρη των φυτών μέσω του ανιόντος χυμού.

Οι παραπάνω μηχανισμοί είναι αποτελεσματικοί μόνο σε χαμηλά έως μέτρια επίπεδα αλατότητας γιατί σε πολύ υψηλές εξωτερικές συγκεντρώσεις τόσο οι αντλίες ενεργού απέκκρισης προς το εξωτερικό των κυττάρων όσο και η χωρητικότητα των παρεγχυματικών κυττάρων σε ιόντα αλάτων φθάνουν σε κορεσμό (Σάββας, 1998). Κατά συνέπεια, δεν μπορούν πλέον να ανταποκριθούν στην αυξημένη τάση εισόδου και μεταφοράς των ανεπιθύμητων ιόντων στα ανώτερα μέρη των φυτών. Για τον περιορισμό της συσσώρευσης των ιόντων αυτών στα μεταβολικά ενεργά κύτταρα των φύλλων τα φυτά προσπαθούν να απομονώσουν με ATP-εξαρτώμενη μεταφορά την περίσσεια των ιόντων στα χυμοτόπια των φύλλων. Ο μηχανισμός αυτός αναφέρεται ως διαμερισματοποίηση των ιόντων και δρα ιδιαίτερα αποτελεσματικά στα αλόφυτα, ενώ η αποτελεσματικότητά του στα γλυκόφυτα είναι μικρή (Κωνσταντινίδου, 2003).

1.2.5. Επιδράσεις της αλατότητας στην παραγωγή

Οι μηχανισμοί που έχουν αναπτύξει τα φυτά για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της υψηλής συγκέντρωσης αλάτων στο περιβάλλον των ριζών έχουν σαν αποτέλεσμα την ενεργειακή καταπόνηση των φυτών. Η σύνθεση των ωσμωλυτών, η ενεργός μεταφορά των ανεπιθύμητων ιόντων στα κατώτερα μέρη των φυτών, η ενεργός απέκκρισή τους στο εξωτερικό μέσο και το μερικό κλείσιμο των στομάτων επιβαρύνουν σημαντικά το ενεργειακό ισοζύγιο των αναπτυσσόμενων, σε συνθήκες υψηλής αλατότητας, φυτών (Κωνσταντινίδου, 2003,) με τελικό αποτέλεσμα χαμηλότερους ρυθμούς

αύξησης και μείωση της παραγωγής (Maas et al., 1977, Greenway and Munns 1980, Sonneveld, 2000).

Ο βαθμός μείωσης της παραγωγής εξαρτάται από τη συνολική συγκέντρωση αλάτων στο περιβάλλον των ριζών, το είδος των αλάτων, το είδος του καλλιεργούμενου φυτού ή και της ποικιλίας (Maas and Hoffman, 1977, Greenway and Munns 1980, Shannon and Grieve, 1999), τον τρόπο άρδευσης (Scholberg and Locascio, 1999), το στάδιο ανάπτυξης των φυτών, τη διάρκεια έκθεσης των φυτών σε συνθήκες υψηλής αλατότητας (del Amor et al., 1999) και τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες (Pasternak, 1987, Sonneveld et al., 2004).

Η απόδοση των καλλιεργειών καρποδοτικών λαχανικών που αναπτύσσονται σε περιβάλλοντα υψηλής αλατότητας μειώνεται λόγω μείωσης του μεγέθους των καρπών ή λόγω μείωσης του αριθμού των καρπών ή λόγω μείωσης και των δύο. Στη μελιτζάνα (Savvas and Lenz, 2000) και στην πιπεριά (Chartzoulakis and Klaraki, 2000) η μείωση της απόδοσης είναι αποτέλεσμα της μείωσης του μέσου βάρους των καρπών και όχι του αριθμού των καρπών ανά φυτό. Αντίθετα η μείωση της παραγωγής στη φράουλα οφείλεται στον μικρότερο αριθμό καρπών ανά φυτό και όχι στη μείωση του μέσου βάρους των καρπών (Saied et al., 2005). Για την τομάτα (Mavrogianopoulos et al., 2002), το πεπόνι (Navaro et al., 1999) και το αγγούρι (Savvas et al., 2004) αναφέρεται τόσο μείωση του μέσου βάρους των καρπών, όσο και του αριθμού των καρπών ανά φυτό.

Οι Maas and Hoffman (1977) δημιούργησαν ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο περιγράφει ποσοτικά τις επιδράσεις της αύξησης της αλατότητας στην παραγωγή των φυτών. Το μοντέλο βασίζεται σε δύο παραμέτρους, την ανώτατη επιτρεπτή αλατότητα (t) (salinity threshold value) και το ρυθμό μείωσης της παραγωγής λόγω αλατότητας (s) (salinity yield decrease) και προβλέπει τη γραμμική μείωση της παραγωγής όταν η συγκέντρωση αλάτων στο περιβάλλον των ριζών αυξάνεται πάνω από το όριο t .

Η ανώτατη επιτρεπτή αλατότητα (t) είναι η μέγιστη συγκέντρωση αλάτων στο περιβάλλον των ριζών που δεν προκαλεί μείωση της παραγωγής και μετράται ως EC σε dS/m. Ο ρυθμός μείωσης της παραγωγής λόγω αλατότητας (s) εκφράζεται ως ποσοστό μείωσης της παραγωγής ανά μονάδα αύξησης της αλατότητας.

Ο Sonneveld (2000) επεξέτεινε το μοντέλο των Maas and Hoffman (1977) για να περιλάβει καλλιέργειες σε υδροπονικά συστήματα, εισάγοντας μία ακόμη παράμετρο, την αλατότητα του θρεπτικού διαλύματος (ως EC σε dS/m) που οφείλεται στα απαραίτητα για την άριστη ανάπτυξη των φυτών θρεπτικά στοιχεία (a). Το βελτιωμένο αυτό μοντέλο μπορεί να αποδοθεί με την παρακάτω εξίσωση:

$$\begin{array}{ll}
 Y = < 100 & 0 \leq X \leq a \\
 Y = 100 & a \leq X \leq t \\
 Y = 100 - s(X - t) & t < X \leq z \\
 Y = 0 & X \geq z
 \end{array} \quad (1.6)$$

όπου:

Y : η παραγωγή των φυτών όταν αναπτύσσονται σε συνθήκες μηδενικής αλατότητας.

X : η συγκέντρωση των αλάτων στο περιβάλλον των ριζών σε dS/m.

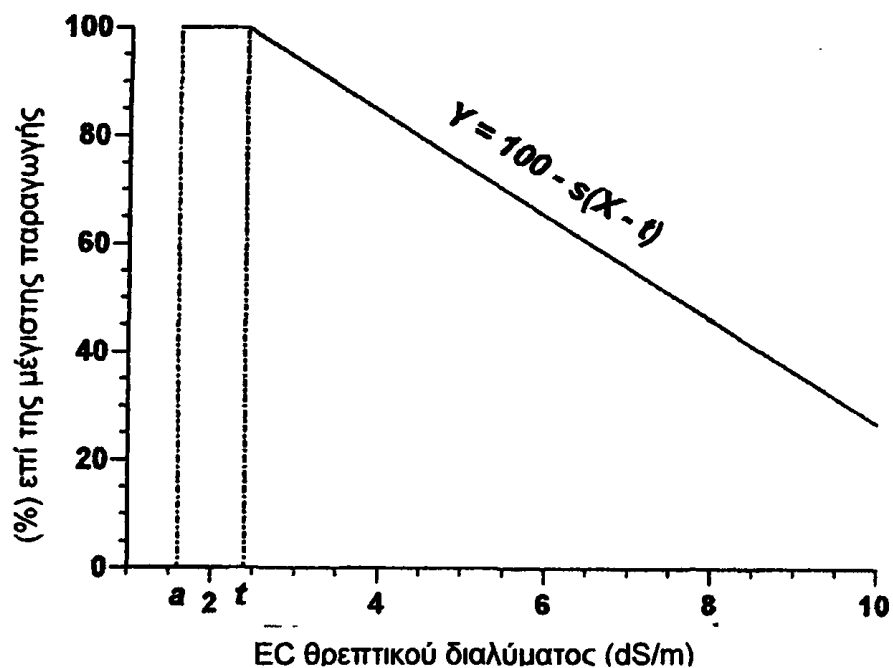
a : η μικρότερη ολική συγκέντρωση ιόντων στο θρεπτικό διάλυμα που είναι απαραίτητη για την άριστη ανάπτυξη των φυτών, σε dS/m.

t : η ανώτατη επιτρεπτή αλατότητα, η μέγιστη συγκέντρωση αλάτων στο περιβάλλον των ριζών που δεν προκαλεί μείωση της παραγωγής, dS/m.

z : η συγκέντρωση αλάτων στο περιβάλλον των ριζών πάνω από την οποία η παραγωγή είναι 0, σε dS/m.

s : ο ρυθμός μείωσης της παραγωγής λόγω αλατότητας, % ανά dS/m.

Το πρότυπο που εκφράζει την παραπάνω εξίσωση αποδίδεται γραφικά στο Σχήμα 1.1, ενώ στον Πίνακα 1.7 παρουσιάζονται οι μέγιστες επιτρεπτές τιμές αλατότητας στο έδαφος και ο ρυθμός μείωσης της παραγωγής λόγω αλατότητας ορισμένων καρποδοτικών λαχανικών.



Σχήμα 1.1. Το πρότυπο που εκφράζει τη σχέση μεταξύ της παραγωγής μιας καλλιέργειας και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο μέσο ανάπτυξης (Savvas, 2001).

Πίνακας 1.7. Τιμές ανώτατης επιτρεπτής αλατότητας στο έδαφος και ρυθμού μείωσης της παραγωγής για ορισμένες καλλιέργειες με βάση το μοντέλο των Maas and Hoffman (1977) όπως υπολογίστηκαν από τους Maas and Hoffman (1977) και τον Sonneveld (1988).

Είδος φυτού	Μέγιστη επιτρεπτή αλατότητα (dS/m)	Ρυθμός μείωσης της παραγωγής λόγω αλατότητας (% ανά dS/m)	
Αγγούρι	2,5 ^α	13 ^α	11,7 ^β
Πιπεριά	1,5 ^α	14 ^α	13,1 ^β
Τομάτα	2,5 ^α	9,9 ^α	5,7 ^β
Φασόλι	1,0 ^α	19 ^α	13,9 ^β

α: Maas and Hoffman (1977)

β: Sonneveld (1988)

1.3. Η ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΝΩΠΟΥ ΦΑΣΟΛΙΟΥ

Το φασόλι (*Phaseolus vulgaris* L.) είναι φυτό της οικογένειας Fabaceae (Leguminosae), υποοικογένεια Papilionoideae, Papilionatae. Προέρχεται από την Κεντρική ή Νότιο Αμερική απ' όπου εισήχθηκε στην Ευρώπη κατά τον 16ο αιώνα, ενώ στις χώρες της Μεσογείου άρχισε να καλλιεργείται τον 17ο αιώνα. (Gepts and Debouck, 1993).

Στην Ελλάδα καλλιεργούνται διάφορες ποικιλίες για την παραγωγή νωπών λοβών και ξερών φασολιών. Το 2003 καλλιεργήθηκαν 64.620 στρέμματα (2.500 στρ. περίπου σε θερμοκήπια και χαμηλά σκέπαστρα) για την παραγωγή νωπών φασολιών και 64.115 στρ. για την παραγωγή ξερών. Συνολικά παρήχθησαν 79.240 και 14.200 τόνοι νωπών και ξερών φασολιών αντίστοιχα (Στατιστική Υπηρεσία Υπουργείου Γεωργίας). Οι περισσότερες διαδεδομένες αναρριχώμενες ποικιλίες για την παραγωγή νωπών φασολιών στα θερμοκήπια είναι οι Necores, Helda, Stringless Blue Lake S₇, Fidel και Μπαρμπούνια (Ολύμπιος, 2001).

1.3.1. Βοτανικοί χαρακτήρες

Τα φυτά είναι ποώδη, ετήσια και διακρίνονται σε νάνα (25 – 40 cm), ημιαναρριχώμενα (25 – 120 cm) και αναρριχώμενα (>120 cm). Τα τελευταία έχουν λίγες διακλαδώσεις και αναρριχώνται με δεξιόστροφη περιέλιξη. Ο κύριος βλαστός είναι κυλινδρικός ή πολυγωνικός, εύκαμπτος, τρυφερός – ποώδης στην αρχή, που αργότερα γίνεται ελαφρά ξυλώδης. Η ρίζα είναι πασσαλώδης και όταν αναπτύσσεται στο έδαφος φιλοξενεί το αζωτοβακτήριο *Bacterium radicicola*. Τα φύλλα είναι σύνθετα, τρίλοβα με ανοικτό πράσινο χρώμα (Ολύμπιος, 2001).

Τα άνθη εμφανίζονται σε μασχαλιαίες ταξιανθίες, φέρουν πενταμερή κάλυκα και στεφάνη, 10 στήμονες και απλό ύπερο και είναι συνήθως αυτογονιμοποιούμενα. Ο καρπός είναι χέδρωπας, λεπτός, επιμήκης, συνήθως κυρτός. Μπορεί να είναι πεπλατυσμένος ή κυλινδρικός, διαφόρου μήκους και εφόσον είναι άγουρος, σαρκώδης με πράσινο χρώμα. Οι λοβοί της ποικιλίας Helda είναι μέσης πρωιμότητας, μακριοί (15 – 25 cm), πεπλατυσμένοι, χωρίς ίνες (Ολύμπιος, 2001).

1.3.2. Απαιτήσεις του φυτού

Το φασόλι είναι φυτό θερμής εποχής, ευπαθές στο ψύχος, που δεν αντέχει σε θερμοκρασίες κάτω από -1°C ενώ, πολύ υψηλές θερμοκρασίες και ξηρασία προκαλούν ανθόρροια. Φωτοπεριοδικά οι ποικιλίες που καλλιεργούνται στις εύκρατες περιοχές έχουν επιλεγεί ώστε να είναι ουδέτερες. Τα φυτά αναπτύσσονται σε ποικίλα εδάφη, για υψηλές αποδόσεις όμως απαιτούνται γόνιμα, πλούσια σε οργανική ουσία εδάφη που δεν κατακρατούν νερό (Ολύμπιος, 2001).

Για τη βλάστηση του σπόρου η άριστη θερμοκρασία αέρα κυμαίνεται μεταξύ $20 - 30^{\circ}\text{C}$ και η θερμοκρασία εδάφους μεταξύ $18 - 29^{\circ}\text{C}$. Σπορά σε έδαφος όπου οι θερμοκρασίες είναι κάτω από $14 - 15^{\circ}\text{C}$ έχει σαν αποτέλεσμα καθυστέρηση στη βλάστηση των σπόρων και φτωχή ανάπτυξη των φυτών (Singh and Mack, 1966).

Τα φυτά, στο θερμοκήπιο, μπορούν να φυτευτούν σε διάφορες αποστάσεις, ανάλογα με το εγκατεστημένο σύστημα άρδευσης, ένα ή δύο ανά θέση, με μέγιστη πυκνότητα (δύο φυτά ανά θέση) $12,5 \text{ φυτά}/\text{m}^2$ (Ολύμπιος, 1994). Η υποστύλωσή τους γίνεται με τη χρήση πλαστικού σχοινιού ή δικτύου.

Μετά τη βλάστηση η άριστη θερμοκρασία αέρα κατά τη διάρκεια της ημέρας κυμαίνεται μεταξύ 25 και 28°C , η μέγιστη είναι 30°C και η ελάχιστη 12°C . Κατά τη διάρκεια της νύχτας η άριστη θερμοκρασία αέρα κυμαίνεται μεταξύ 15 και 18°C , ενώ η ελάχιστη είναι 10°C (Ολύμπιος, 2001). Η θερμοκρασία εδάφους για την καλύτερη δυνατή ανάπτυξη των φυτών και την μεγαλύτερη παραγωγή πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 24 και 29°C (Singh and Mack, 1966).

Σχετική υγρασία γύρω στο 70% θεωρείται η καταλληλότερη για την καλλιέργεια του φασολιού. Υψηλότερα επίπεδα Σ.Υ. αυξάνουν τον κίνδυνο ασθενειών (Βοτρύτης, Σκληρωτίνια), ενώ χαμηλότερα μπορεί να προκαλέσουν ανθόρροια (Ολύμπιος, 2001). Όπως έχει αναφερθεί, το φασόλι, είναι ευαίσθητο στην αλατότητα (Maas and Hoffman, 1987) και συνεπώς απαιτεί καλής ποιότητας νερό άρδευσης. Οι συνολικές ανάγκες σε νερό φυτών που καλλιεργούνται στο έδαφος σε θερμοκήπιο ανέρχονται σε $450 \text{ m}^3/\text{στρ. περίπου}$ (Ολύμπιος, 1994).

Ο χρόνος που μεσολαβεί από τη σπορά μέχρι την έναρξη της συγκομιδής εξαρτάται από τις συνθήκες θερμοκρασίας και φωτισμού. Φυτά που

φυτεύτηκαν στο τέλος Νοεμβρίου σε θερμαινόμενο θερμοκήπιο άνθησαν 35 ημέρες μετά τη σπορά και η πρώτη συγκομιδή πραγματοποιήθηκε 31 ημέρες μετά την άνθηση (Ολύμπιος, 2001). Οι λοβοί συγκομίζονται κάθε 2 – 5 ημέρες, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, με κύριο κριτήριο το μέγεθος του λοβού. Γενικά, λόγω του ότι η άνθηση και η καρποφορία του φασολιού γίνεται κατά κύματα, όσο πιο συχνά γίνεται η συγκομιδή τόσο πιο ομοιόμορφα κατανεμημένα είναι η παραγωγή (Ολύμπιος, 2001).

1.4. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ ΘΕΜΑΤΟΣ

Η μείωση της έκλυσης νιτρικών και φωσφορικών ιόντων στο περιβάλλον και η μειωμένη κατανάλωση νερού και λιπασμάτων αποτελούν τα κύρια πλεονεκτήματα των κλειστών υδροπονικών συστημάτων και τους βασικούς λόγους για τους οποίους, τα τελευταία χρόνια, το ενδιαφέρον για αυτά έχει αυξηθεί (Savvas, 2002a, Sonneveld, 2002, Carmassi et al., 2005). Σε αντίθεση με τα παραπάνω πλεονεκτήματα, βασικό μειονέκτημα των συστημάτων αυτών, για λόγους που ήδη έχουν αναφερθεί, αποτελεί η συσσώρευση αλάτων στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα και οι συνεπακόλουθες δυσμενείς επιπτώσεις στην ανάπτυξη των καλλιεργούμενων φυτών. Τα διάφορα μοντέλα που αναπτύχθηκαν για την αναπλήρωση των θρεπτικών στοιχείων σε κλειστά υδροπονικά συστήματα (Savvas, 2002a, Pardossi et al., 2004, Silberbush, 2005) βασίζονται συνήθως σε αρκετές μεταβλητές, ενώ δεν μπορούν να προβλέψουν τη συσσώρευση των ανεπιθύμητων ιόντων στο διάλυμα απορροής, έτσι ώστε να είναι δυνατή η απόρριψη μέρους ή όλου του διαλύματος όταν η συγκέντρωση των αλάτων σ' αυτό ξεπεράσει ορισμένα όρια και πριν δημιουργηθούν προβλήματα στα καλλιεργούμενα φυτά. Επιπλέον, η μέτρηση των συγκεντρώσεων των αλάτων στο διάλυμα απορροής, σε πραγματικό χρόνο στο θερμοκήπιο, δεν είναι δυνατή. Έτσι θα ήταν σημαντική η ύπαρξη ενός μοντέλου που θα μπορούσε να προβλέπει τη συσσώρευση των αλάτων στο διάλυμα απορροής και το οποίο θα βασίζονταν σε μία εύκολα μετρούμενη, σε πραγματικό χρόνο, παράμετρο ώστε να μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί σε υδροπονικά συστήματα που εφαρμόζονται στην πράξη για παραγωγικούς σκοπούς. Μία τέτοια παράμετρος είναι η αθροιστική κατανάλωση νερού από τα φυτά. Ο ρυθμός της απορρόφησης νερού εξαρτάται από το μέγεθος των φυτών και τις κλιματολογικές συνθήκες με τρόπο ανάλογο με τους ρυθμούς απορρόφησης των ιόντων και συνεπώς οι διακυμάνσεις στην αναλογία απορρόφησης ιόντων/νερό είναι μικρές όταν οι συγκεντρώσεις των ιόντων στο περιβάλλον των ριζών είναι σταθερές (Savvas and Lenz, 1995, Pardossi et al., 2004). Έτσι, όταν οι συγκεντρώσεις των ιόντων που συσσωρεύονται στο ανακυκλούμενο διάλυμα συσχετίζονται με την κατανάλωση νερού, εμμέσως σχετίζονται με τις μεταβολές στο μέγεθος των φυτών και στο περιβάλλον

ανάπτυξης. Μοντέλα που βασίζονται στη σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης των ιόντων στο διάλυμα απορροής κλειστών υδροπονικών συστημάτων και απορρόφησης νερού από τα φυτά έχουν δοκιμασθεί στην τομάτα (Carmassi et al., 2005) και στο αγγούρι (Savvas et al., 2005a).

Το φασόλι είναι φυτό ευαίσθητο στην αλατότητα (Maas and Hoffman, 1977, Seemann and Critchley, 1985, Maas, 1986, Brugnoli and Lauteri, 1991) που καλλιεργείται ευρέως σε θερμοκήπια. Συνεπώς, όταν καλλιεργείται σε κλειστά υδροπονικά συστήματα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη συσσώρευση των αλάτων στο διάλυμα απορροής. Επιπλέον η πλειοψηφία των μελετών που αναφέρονται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση ως προς τις επιδράσεις της αλατότητας στα φυτά (συμπεριλαμβανομένου και του φασολιού) πραγματοποιήθηκαν σε θρεπτικά διαλύματα σταθερής και προκαθορισμένης αλατότητας (Shannon and Grieve, 1999).

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ο τρόπος που συσσωρεύονται τα ιόντα Na και Cl στο διάλυμα απορροής καλλιέργειας φασολιού σε κλειστό υδροπονικό σύστημα, εφαρμόζοντας διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl στο νερό άρδευσης, που χρησιμοποιείται για την αναπλήρωση του νερού που απορροφάται από τα φυτά. Τα δεδομένα που αποκτήθηκαν χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση ενός προϋπάρχοντος μοντέλου (Savvas, 2005a) για την καλλιέργεια του φασολιού. Μελετήθηκαν επίσης οι επιδράσεις της σταδιακής συσσώρευσης των αλάτων στο περιβάλλον των ριζών στην ανάπτυξη των φυτών φασολιού. Για τη διαχείριση των προβλημάτων που προκύπτουν από τη χρήση κακής ποιότητας νερού ή/και την ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος στα κλειστά υδροπονικά συστήματα είναι βασικό να καθοριστούν τα ανώτατα επιτρεπτά όρια αλατότητας κάτω από συνθήκες σταδιακής συσσώρευσης αλάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

2.1.1. Το Θερμοκήπιο

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε υαλόφρακτο, αυτοματοποιημένο θερμοκήπιο, που βρίσκεται εγκατεστημένο στο Αγρόκτημα της Σχολής Τεχνολογίας Γεωπονίας του Τ.Ε.Ι. Ηπείρου στους Κωστακιούς Άρτας.

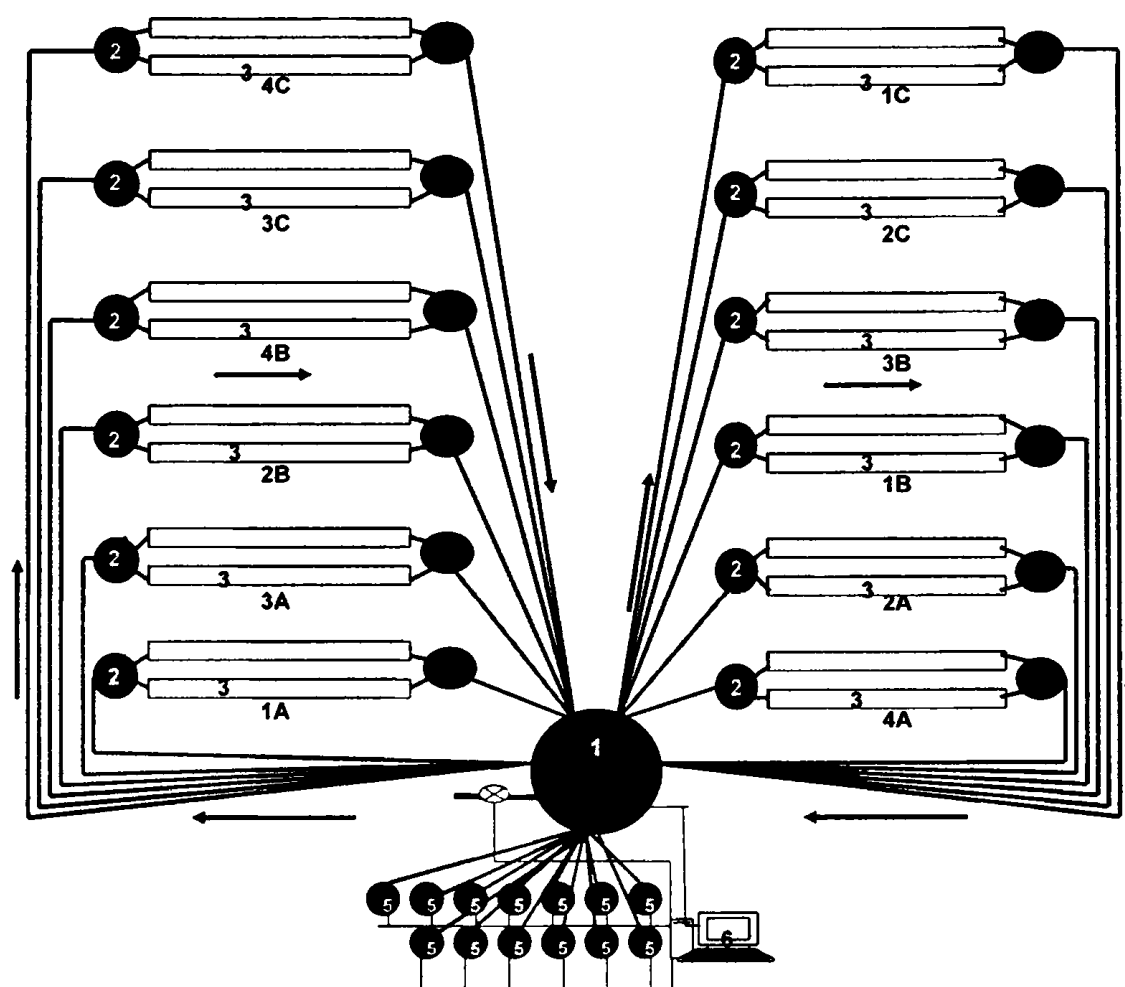
Το θερμοκήπιο, συνολικής έκτασης 700 m² (600 m² χώρος καλλιέργειας και 100 m² βοηθητικός χώρος) είναι αμφίρρικτο πολλαπλό, καλυμμένο με υαλοπίνακες. Είναι θερμαινόμενο με κεντρικό σύστημα θέρμανσης και εξοπλισμένο με σύστημα αυτόματης διαχείρισης του κλίματος, της υδρολίπανσης και της ανακύκλωσης των απορροών. Ο χώρος καλλιέργειας χωρίζεται σε τρεις, ανεξάρτητους, μεταξύ τους τομείς, επιφάνειας 200 m² ο καθένας. Στο βοηθητικό χώρο είναι εγκατεστημένα τα συστήματα αυτόματης διαχείρισης του εσωτερικού κλίματος του θερμοκηπίου και της υδρολίπανσης.

Ο έλεγχος των αυτοματισμών και της παρασκευής των θρεπτικών διαλυμάτων πραγματοποιείται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, ο οποίος εδράζεται στο βοηθητικό χώρο, και φέρει εγκατεστημένο λογισμικό της εταιρείας AUTONET, που έχει δημιουργηθεί ειδικά για τις ανάγκες αυτής της πειραματικής μονάδας με βάση πειραματικά δεδομένα και μοντέλα θρέψης που έχουν αναπτυχθεί στα πλαίσια ερευνητικών προγραμμάτων του τμήματος Ανθοκομίας και Αρχιτεκτονικής Τοπίου (Savvas and Manos, 1999, Savvas and Adamidis, 1999, Savvas, 2002, Savvas et al., 2005b).

2.1.2 Το υδροπονικό σύστημα

Το παρόν πείραμα έλαβε χώρα στο μεσαίο τομέα του χώρου καλλιέργειας, ο οποίος είναι εξοπλισμένος με 12 κλειστά, ανεξάρτητα μεταξύ τους υδροπονικά συστήματα (πειραματικές μονάδες) (Σχ. 2.1). Κάθε τέτοιο υδροπονικό σύστημα αποτελείται από έναν πάγκο ύψους 1,2 m, ο οποίος φέρει δύο κανάλια καλλιέργειας μήκους 5 m και πλάτους 0,25 m. Η απόσταση μεταξύ των καναλιών είναι 0,4 m. Κάθε πάγκος είναι εφοδιασμένος με ένα

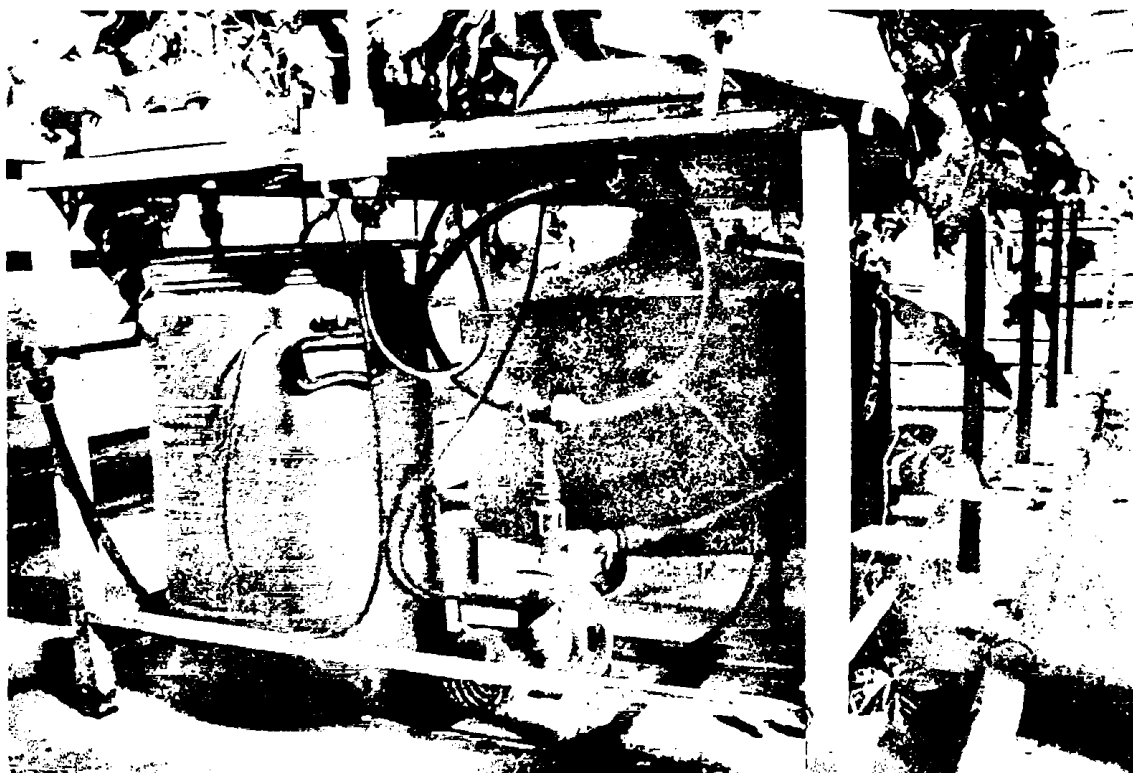
ξεχωριστό βαρέλι τροφοδοσίας, ένα βαρέλι απορροής, μία αντλία και ένα σύστημα άρδευσης με σταλάκτες.



Σχήμα 2.1. Κάτοψη της εγκατάστασης του υδροπονικού συστήματος με τις 12 πειραματικές μονάδες και ο τρόπος τυχαιοποίησής τους. 1) Δοχείο παρασκευής θρεπτικού διαλύματος. 2) Βαρέλια διαλύματος τροφοδοσίας. 3) Κανάλια καλλιέργειας. 4) Βαρέλια διαλύματος απορροής. 5) Δοχεία πυκνών διαλυμάτων λιπασμάτων. 6) Η/Υ ελέγχου του συστήματος

Κάθε φορά που στην κεντρική μονάδα αυτόματης διαχείρισης της υδρολίπανσης παρασκευάζεται θρεπτικό διάλυμα για μία από τις 12 αυτόνομες πειραματικές μονάδες, αυτό στέλνεται και αποθηκεύεται στο βαρέλι τροφοδοσίας που εδράζεται κάτω από τον πάγκο (μαύρο βαρέλι στην Εικ. 2.1). Από εκεί, κάθε φορά που το αυτόματο σύστημα δίνει εντολή για πότισμα των φυτών, το θρεπτικό διάλυμα μεταφέρεται με την βοήθεια της αντλίας στα κανάλια καλλιέργειας μέσω των σωλήνων άρδευσης και διανέμεται στα φυτά

μέσω σταλακτών παροχής 2,5 λίτρων ανά ώρα ($L\ h^{-1}$). Η παρασκευή θρεπτικού διαλύματος και η μεταφορά του στην εκάστοτε πειραματική μονάδα ενεργοποιείται χειρωνακτικά κατόπιν μέτρησης της στάθμης του στο βαρέλι τροφοδοσίας και επομένως είναι απολύτως ανεξάρτητη από την ενεργοποίηση της παροχής του στα φυτά (κύκλος άρδευσης) η οποία γίνεται αυτόματα με βάση την εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια. Η περίσσεια θρεπτικού διαλύματος που δεν μπορεί να συγκρατηθεί από το υπόστρωμα μετά από κάθε άρδευση (απορροή) στραγγίζει στον πυθμένα των καναλιών και μέσω της βαρύτητας καταλήγει στο βαρέλι συλλογής των απορροών (κόκκινο βαρέλι στην Εικ. 2.1). Από εκεί μεταφέρεται στην κεντρική μονάδα αυτόματης παρασκευής θρεπτικού διαλύματος κάθε φορά που δίνεται εντολή για παρασκευή νέου θρεπτικού διαλύματος, οπότε αναμειγνύεται με νερό και πυκνά διαλύματα λιπασμάτων και ανακυκλώνεται (Εικ. 2.2). Η δοσολογία προσθήκης λιπασμάτων υπολογίζεται μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου το οποίο βασίζεται στην τακτική χημική ανάλυση του διαλύματος απορροής (CDW, Savvas, 2002).



Εικόνα 2.1. Η εγκατάσταση μιας πειραματικής μονάδας του υδροπονικού συστήματος. Διακρίνονται το μαύρο βαρέλι του διαλύματος τροφοδοσίας, το κόκκινο βαρέλι συλλογής του διαλύματος απορροής και η αντλία μεταφοράς του θρεπτικού διαλύματος από το βαρέλι στο κανάλια καλλιέργειας.

Η άρδευση γίνεται αυτόματα με τη συχνότητά της να εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία ανιχνεύεται από έναν αισθητήρα Volmatic, SC 21B και καταγράφεται αθροιστικά μέσω του λογισμικού λειτουργίας της εγκατάστασης. Η διάρκεια της κάθε άρδευσης μπορεί επίσης να ρυθμιστεί μέσω του Η/Υ.

2.1.3 Το διάλυμα τροφοδοσίας

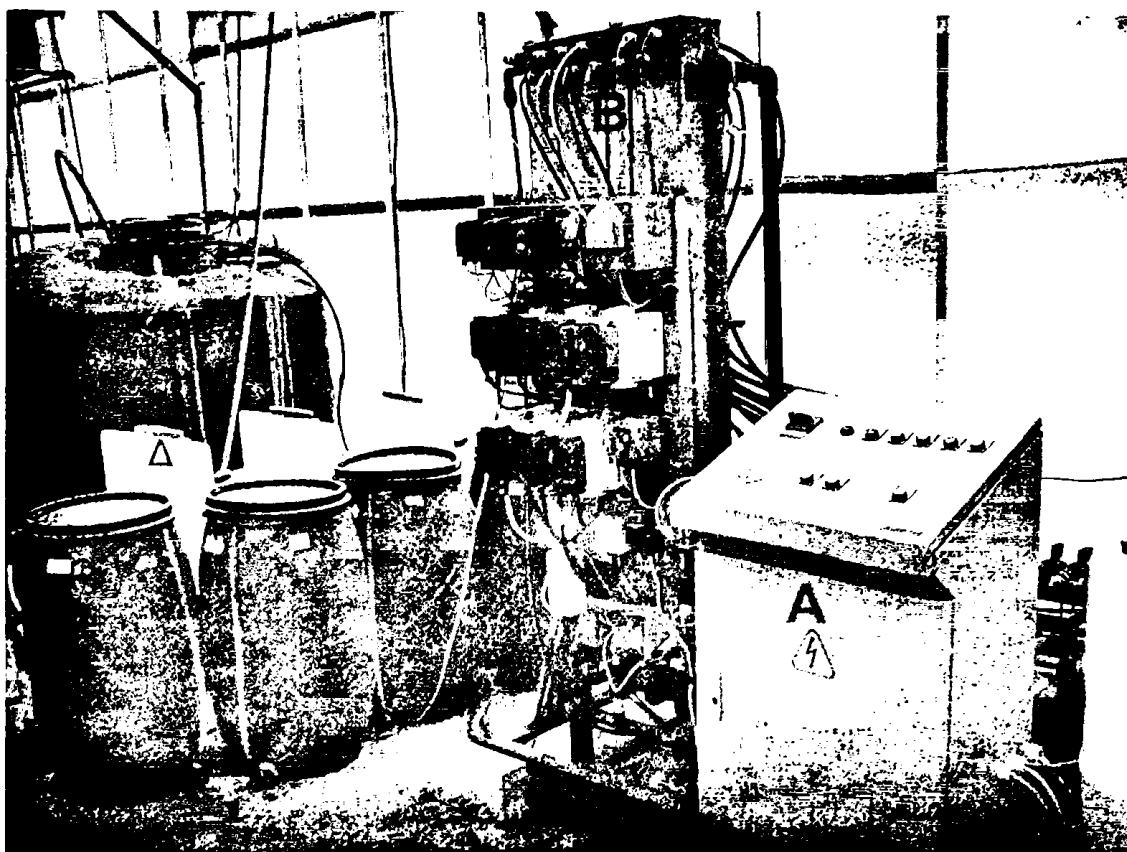
Παρασκευάζεται αυτόματα μέσω του Η/Υ σε δοχείο χωρητικότητας 80 lt. Το διάλυμα απορροής από κάθε πειραματική μονάδα επιστρέφει, μέσω μιας αντλίας στην κεντρική μονάδα όταν ο χρήστης δίνει εντολή παρασκευής νέου θρεπτικού διαλύματος. Στο παρόν πείραμα, νέο θρεπτικό διάλυμα παρασκευαζόταν κάθε 1-3 ημέρες, ανάλογα με το μέγεθος των φυτών και τις καιρικές συνθήκες. Το διάλυμα απορροής, αφού μεταφερθεί στο δοχείο παρασκευής θρεπτικού διαλύματος της κεντρικής μονάδας, αναμιγνύεται με νερό και λιπάσματα, για την αναπλήρωση των απωλειών από την πρόσληψη των φυτών και στη συνέχεια στέλνεται, αυτόματα, στο βαρέλι τροφοδοσίας. Τα λιπάσματα (Πιν. 2.1) βρίσκονται σε βαρέλια με τη μορφή πυκνών διαλυμάτων (ξεχωριστό δοχείο για το κάθε λίπασμα), απ' όπου εγχέονται στο δοχείο παρασκευής μέσω περισταλτικών αντλιών με σταθερό ρυθμό έγχυσης (Εικ. 2.2).

Ο χρόνος λειτουργίας των αντλιών, κάθε φορά που παρασκευάζεται νέο διάλυμα τροφοδοσίας, και συνεπώς η αναπλήρωση των θρεπτικών στοιχείων, γίνεται βάση ενός μοντέλου που αναπτύχθηκε για ανοικτά υδροπονικά συστήματα (Savvas and Adamidis, 1999, Sonneveld et al., 1999b) και επεκτάθηκε στη συνέχεια και στα κλειστά (Savvas, 2002b). Μέσω του μοντέλου αυτού είναι δυνατή η αυτόματη παρασκευή θρεπτικών διαλυμάτων οποιασδήποτε σύνθεσης, με την εισαγωγή σ' ένα κατάλληλο πρόγραμμα Η/Υ των απαιτούμενων χαρακτηριστικών του διαλύματος (EC, pH, αναλογίες θρεπτικών στοιχείων ή επιθυμητές συγκεντρώσεις), όταν είναι γνωστή η περιεκτικότητα του νερού σε θρεπτικά στοιχεία (Savvas, 2002b) .

Πίνακας 2.1. Τα λιπάσματα που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Λίπασμα		Χημικός τύπος
Νιτρικό αμμώνιο	Ammonium nitrate	NH_4NO_3
Νιτρικό ασβέστιο	Calcium nitrate	$5[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]\text{NH}_4\text{NO}_3$
Νιτρικό κάλιο	Potassium nitrate	KNO_3
Θειικό μαγνήσιο	Magnesium sulphate	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Θειικό κάλιο	Potassium sulphate	K_2SO_4
Νιτρικό μαγνήσιο	Magnesium nitrate	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Φωσφορικό μονοκάλιο	Monopotassium phosphate	KH_2PO_4
Νιτρικό οξύ	Nitric Acid	HNO_3
Χηλικός σίδηρος	Iron chelate	—
Θειικό μαγγάνιο	Manganese sulphate	$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Θειικός χαλκός	Copper sulphate	CuSO_4
Θειικός ψευδάργυρος	Zinc sulphate	ZnSO_4
solubor	Sodium octaborate	$\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Μολυβδαινικό αμμώνιο	Ammonium heptamolybdate	$(\text{NH}_4)_8\text{Mo}_7\text{O}_{24}$
Χλωριούχο νάτριο	Sodium chloride	NaCl

Στα κλειστά υδροπονικά συστήματα, για την παρασκευή φρέσκου διαλύματος τροφοδοσίας χρησιμοποιείται επιπλέον και το συλλεγόμενο διάλυμα απορροής, η σύνθεση του οποίου μεταβάλλεται. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται η, σε τακτά χρονικά διαστήματα, ανάλυση του διαλύματος απορροής στο εργαστήριο για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητάς του σε θρεπτικά στοιχεία. Τελικά, για να υπολογιστεί η ποσότητα κάθε θρεπτικού στοιχείου που πρέπει να προστεθεί στο παρασκευαζόμενο διάλυμα τροφοδοσίας κάθε νέου κύκλου άρδευσης, αφαιρείται η συγκέντρωση του στοιχείου στο μίγμα διαλύματος απορροής – νερού άρδευσης από την επιθυμητή συγκέντρωση του στοιχείου στο διάλυμα τροφοδοσίας.



Εικόνα 2.2. Η εγκατάσταση αυτόματης παρασκευής θρεπτικών διαλυμάτων, όπου διακρίνονται: η μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου (Α), το δοχείο παρασκευής των θρεπτικών διαλυμάτων (Β), οι περισταλτικές αντλίες έκχυσης των λιπασμάτων (Γ) και τα βαρέλια με τα πυκνά διαλύματα των λιπασμάτων (Δ).

Ένα επιπλέον πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά την παρασκευή νέου διαλύματος τροφοδοσίας στα κλειστά υδροπονικά συστήματα είναι η αύξηση, με το χρόνο, της EC του διαλύματος απορροής. Η EC, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αποτελεί βασική παράμετρο για τον υπολογισμό της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος. Σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα όμως, παρατηρείται συσσώρευση αλάτων στο διάλυμα απορροής και συνεπώς αύξηση της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας. Έτσι, αναπόφευκτα, κάποια χρονική στιγμή η τιμή της EC του διαλύματος απορροής θα φθάσει σε τέτοιο ύψος, ώστε το μείγμα διαλύματος απορροής – νερού να έχει υψηλότερη EC από την επιθυμητή τιμή της EC του διαλύματος τροφοδοσίας. Επομένως, ακόμη και αν δεν γίνει συμπλήρωσή του με λιπάσματα, η αγωγιμότητα του διαλύματος απορροής θα υπερβαίνει την επιθυμητή τιμή που διασφαλίζει άριστη θρέψη των φυτών. Το πρόβλημα όμως στην περίπτωση αυτή είναι ακόμη σοβαρότερο, γιατί η αύξηση της EC στο διάλυμα τροφοδοσίας

οφείλεται στην συσσώρευση NaCl που συνήθως υπάρχει στο νερό άρδευσης και δεν απορροφάται από τα φυτά. Επομένως, ενώ η EC υποδηλώνει υπερβολικές συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων, στην πραγματικότητα αυτές είναι υπερβολικά χαμηλές.

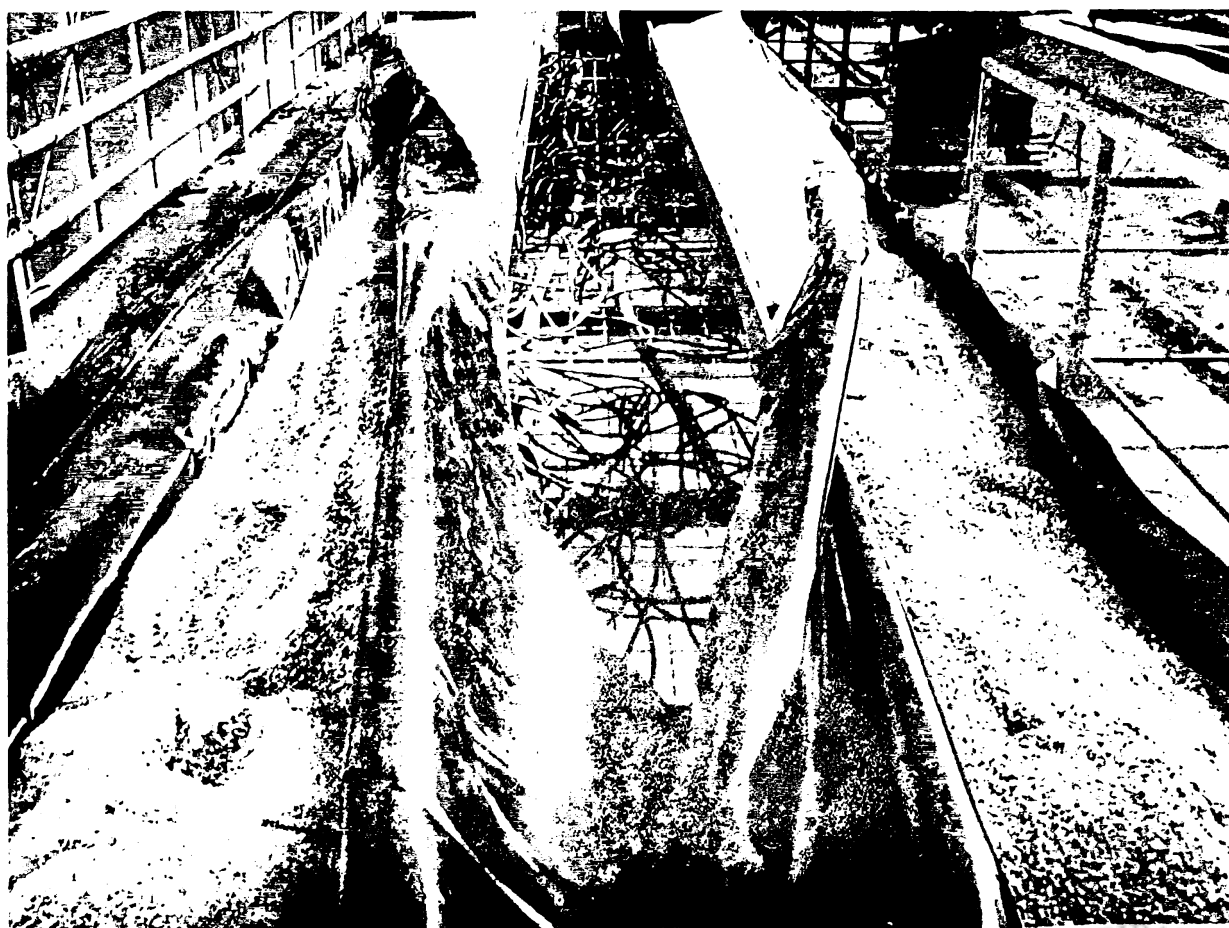
Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό, η κάθε φορά επιθυμητή τιμή της EC του διαλύματος τροφοδοσίας (E_{ta}) πρέπει να μεταβάλλεται με βάση την συσσώρευση του NaCl στο διάλυμα απορροής. Η τελευταία, όμως, αυξάνεται συνεχώς και δεν μπορεί να μετρηθεί σε πραγματικό χρόνο όπως η EC, οπότε η E_{ta} υπολογίζεται αυτόματα, σε κάθε νέο κύκλο άρδευσης μέσω της εξίσωσης:

$$E_{ta} = E_{tb} + a(E_{ra} - E_{rb}) \quad (2.1)$$

(Savvas et al., 2005a), όπου: E_{tb} είναι η EC (dS m^{-1}) του διαλύματος τροφοδοσίας πριν την έναρξη της ανακύκλωσης, E_{ra} είναι η EC (dS m^{-1}) του διαλύματος απορροής μετά το τέλος ενός κύκλου άρδευσης, μετρούμενη σε πραγματικό χρόνο, E_{rb} η EC (dS m^{-1}) του διαλύματος απορροής την ημέρα έναρξης της ανακύκλωσης και a το κλάσμα του όγκου του συλλεγόμενου διαλύματος απορροής προς το διάλυμα τροφοδοσίας, μετρούμενο σε πραγματικό χρόνο.

2.2.1 Η καλλιέργεια

Σπόροι φασολιού, ποικιλίας Helda του σποροπαραγωγικού οίκου Fytro seeds αναπτύχθηκαν, μέχρι το στάδιο του δεύτερου πραγματικού φύλλου, σε δίσκους σποράς 72 θέσεων και σε υπόστρωμα τύρφης – περλίτη σε αναλογία 1:1. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου τα φυτά ποτιζόταν τακτικά ποτίσματα με νερό. Στη συνέχεια τα φυτά μεταφυτεύθηκαν στα κανάλια καλλιέργειας, τα οποία είχαν προετοιμαστεί κατάλληλα. Κάθε κανάλι είχε πληρωθεί με ελαφρόπετρα διαμέτρου 0 – 5 mm, σε ύψος 8 cm (100 l ανά κανάλι) και είχε καλυφθεί με αδιαφανές πλαστικό, για να αποφευχθούν απώλειες νερού μέσω εξάτμισης (Εικ. 2.3) . Στο πλαστικό κάλυμμα ανοίχτηκαν τρύπες για τη δημιουργία των θέσεων φύτευσης. Τέλος, η ελαφρόπετρα, την προηγούμενη της μεταφύτευσης, διαβρέχτηκε με θρεπτικό διάλυμα. Η σπορά πραγματοποιήθηκε στις 27 Σεπτεμβρίου του 2004 και η μεταφύτευση στις 8 Οκτωβρίου του 2004.



Εικόνα 2.3. Η προετοιμασία των καναλιών καλλιέργειας για την εγκατάσταση των φυτών φασολιού.

Σε κάθε πειραματική μονάδα μεταφύτευθηκαν 160 νεαρά φυτά, 80 σε κάθε κανάλι καλλιέργειας και ανά δύο σε κάθε θέση σποράς (40 θέσεις σποράς ανά κανάλι). Οι τελευταίες είχαν οριοθετηθεί σε δύο παράλληλες σειρές. Σε κάθε σειρά η μία θέση σποράς απέιχε από την άλλη 20 cm και η απόσταση μεταξύ των σειρών ήταν 15 cm. Η τελική πυκνότητα φύτευσης αντιστοιχούσε σε 12,8 φυτά/ m². Τέλος τα φυτά υποστυλώθηκαν με πλαστικό σχοινί, το οποίο αναρτήθηκε σε σύρματα σε ύψος 2,2 m πάνω από το κανάλια καλλιέργειας (Εικ. 2.4).



Εικόνα 2.4. Τα φυτά φασολιού κατά τα πρώτα στάδια της καλλιέργειας

2.2.2 Σχεδιασμός του πειράματος

Εγκαταστάθηκαν τέσσερις πειραματικές επεμβάσεις (μεταχειρίσεις), κάθε μια με διαφορετική συγκέντρωση NaCl στο νερό άρδευσης. Κάθε μεταχείριση είχε τρεις επαναλήψεις, τυχαία κατανεμημένες στο χώρο του θερμοκηπίου, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.1 Στην πρώτη μεταχείριση, για την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος χρησιμοποιούνταν νερό του δικτύου ύδρευσης, του οποίου η περιεκτικότητα σε NaCl ήταν 0,8 mM. Στη δεύτερη μεταχείριση η

συγκέντρωση του NaCl στο νερό άρδευσης ήταν 3 mM, στην τρίτη 6 mM και στην τέταρτη έφτασε τα 9 mM.

Η επιθυμητή EC του θρεπτικού διαλύματος χωρίς την προσθήκη NaCl ήταν, για όλες τις μεταχειρίσεις $1,7 \text{ dS m}^{-1}$. Με την προσθήκη της αντίστοιχης για κάθε μεταχείριση ποσότητας NaCl, η EC, πριν την έναρξη της ανακύκλωσης ήταν $1,8 \text{ dS m}^{-1}$ για την πρώτη μεταχείριση, $2,0 \text{ dS m}^{-1}$ για τη δεύτερη, τα $2,3 \text{ dS m}^{-1}$ για την τρίτη και τα $2,6 \text{ dS m}^{-1}$ για την τέταρτη. Με την έναρξη της ανακύκλωσης η εκάστοτε επιθυμητή τιμή της EC του νέου διαλύματος τροφοδοσίας υπολογίζονταν αυτόματα από τον Η/Υ μέσω της εξίσωσης (2.1). Στη συνέχεια, η εκάστοτε υπολογιζόμενη επιθυμητή τιμή της EC μέσω της (2.1) χρησιμοποιούνταν στο μοντέλο CDW (Savvas, 2002b) με στόχο τον αυτόματο υπολογισμό των δοσολογιών προσθήκης λιπασμάτων σε συνθήκες πραγματικού χρόνου και την έγχυσή τους στο μείγμα διαλύματος απορροής – νερού.

Ο εμπλουτισμός του νερού άρδευσης με NaCl γίνονταν με την προσθήκη κατάλληλης ποσότητας πυκνού διαλύματος NaCl, μέσω μιας περισταλτικής αντλίας (SEKO, Italia S.p.A., type SE 57BT) σταθερής παροχής ($J = 60 \text{ l s}^{-1}$). Ο υπολογισμός, κάθε φορά, της χρονικής διάρκειας λειτουργίας της αντλίας (T) και συνεπώς της ποσότητας που εκχυνόταν στο θρεπτικό διάλυμα, γίνονταν αυτόματα με βάση την παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$T = MV(1 - a)(C_i - C_w)/DJ \quad (2.2)$$

(Savvas et al., 2005a) όπου: M είναι το μοριακό βάρος σε g του NaCl, V είναι ο όγκος παρασκευαζόμενου θρεπτικού διαλύματος σε m^3 , a το κλάσμα του του συλλεγόμενου διαλύματος απορροής ($0 - 1$), C_i η συγκέντρωση του NaCl στο νερό άρδευσης σε κάθε μεταχείριση (mM), C_w η συγκέντρωση του NaCl στο νερό του δικτύου ύδρευσης (0,8mM) και D η συγκέντρωση του NaCl στο πυκνό διάλυμα NaCl σε kg m^{-3} .

Σε όλες τις μεταχειρίσεις η συχνότητα και η διάρκεια της άρδευσης ρυθμίζονταν με τέτοιο τρόπο, ώστε σε όλη την διάρκεια του πειράματος το διάλυμα απορροής που συλλεγόταν μετά το τέλος ενός κύκλου άρδευσης να αντιστοιχεί στο 35 – 45% του διαλύματος τροφοδοσίας ($\alpha = 0,4 \pm 0,05$).

Η σύνθεση (εκτός της συγκέντρωσης του NaCl) του θρεπτικού διαλύματος ήταν ίδια σε όλες τις πειραματικές επεμβάσεις και βασίστηκε στη βιβλιογραφία (Sonneveld and Straver, 1994, De Kreij et al., 1999).

παρουσιάζεται δε στον Πίνακα 2.2. Για την επίτευξη της σύνθεσης αυτής τέθηκαν στο πρόγραμμα του Η/Υ, μέσω του οποίου γίνονταν η παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος, οι παρακάτω αναλογίες των μακροστοιχείων σε βάση χημικού ισοδύναμου: για τα K:Ca:Mg 0,50:0,36:0,14 για τα N:K 1,85 για το N (NH₄:ολικό N) 0,09 και για τον P (P:(P+NO₃+SO₄)) 0,085. Τέλος το pH του διαλύματος τροφοδοσίας, για όλες τις μεταχειρίσεις, ήταν 5,6.

Στην πορεία του πειράματος απαιτήθηκαν αλλαγές στη σύνθεση του διαλύματος τροφοδοσίας όταν παρατηρήθηκε συσσώρευση K και Mg στο διάλυμα απορροής. Έτσι στις 23 Νοεμβρίου 2004 η αναλογία των κύριων κατιόντων από 0,50:0,36:0,14 (K:Ca:Mg) άλλαξε σε 0,40:0,46:0,14. Για να μην μειωθεί και η παροχή N μαζί με την παροχή K, η αναλογία N:K αυξήθηκε από 1,85 σε 2,4. Ταυτόχρονα οι αντλίες μέσω των οποίων εγχύονταν στα νέα θρεπτικά διαλύματα Θειικό και Νιτρικό Μαγνήσιο (MgSO₄, Mg(NO₃)₂) τέθηκαν εκτός λειτουργίας ώστε, έκτοτε, ο εμπλουτισμός των διαλυμάτων αυτών με Mg γίνονταν μόνο μέσω του νερού άρδευσης, η περιεκτικότητα σε Mg του οποίου ήταν 100 mg/l. Τέλος, επειδή το pH στο διάλυμα απορροής και επομένως και στο περιβάλλον των ριζών ήταν υπερβολικά υψηλό (γύρω στο 7) σε όλες τις μεταχειρίσεις, αυξήθηκε και η αναλογία NH₄:ολικό-N από 0,09 σε 0,25.

Πίνακας 2.2. Η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος για την καλλιέργεια φασολιού. (Από Sonneveld and Straver, 1994)

Μακροστοιχεία	Συγκέντρωση mmol l ⁻¹	Μικροστοιχεία	Συγκέντρωση μmol l ⁻¹
NH ₄	1,0	Fe	10
K	5,5	Mn	10
Ca	3,25	Zn	4
Mg	1,25	B	20
NO ₃	12,0	Cu	0,5
SO ₄	1,125	Mo	0,5
H ₂ PO ₄	1,25		

Αμέσως μετά τη μεταφύτευση τα φυτά τροφοδοτήθηκαν με το θρεπτικό διάλυμα που αντιστοιχούσε στην κάθε μεταχείριση, χωρίς να γίνεται ανακύκλωση του διαλύματος απορροής. Η ανακύκλωση (και συνεπώς η ουσιαστική έναρξη του πειράματος) άρχισε στις 15 Οκτωβρίου του 2004, 7 ημέρες μετά τη μεταφύτευση και τελείωσε στις 28 Ιανουαρίου του 2005.

2.2.3 Δειγματοληψίες – Αναλύσεις

Κατά τη διάρκεια του πειράματος γίνονταν καθημερινές μετρήσεις της EC και του pH του διαλύματος απορροής με τη χρήση ενός φορητού αγωγιμόμετρου CyberScan 10 Con και ενός φορητού pH-μετρου CyberScan 10 pH. Ο όγκος, η EC και το pH του ανακυκλούμενου διαλύματος απορροής, και του παρασκευαζόμενου διαλύματος τροφοδοσίας μετρούνταν on-line και οι μετρήσεις καταγράφονταν σε μια βάση δεδομένων Microsoft Access. Οι μετρήσεις του όγκου γίνονταν μέσω ενός αισθητήρα πίεσης WIKA Tronic line, της EC μέσω ενός αισθητήρα GLMU 020 και του pH μέσω ενός τρίτου αισθητήρα GPHU 014 ATC – EJ της GREISINGER Electronic.

Για τον έλεγχο της θρεπτικής σύνθεσης, καθώς και της πορείας της συσσώρευσης των ιόντων Na^+ και Cl^- στο διάλυμα απορροής, έγιναν 8 δειγματοληψίες, τις ημέρες 0, 13, 28, 42, 56, 70, 84 και 98 από την έναρξη της ανακύκλωσης. Στα συλλεχθέντα δείγματα μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις των στοιχείων Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ και Cl^- . Οι δειγματοληψίες πραγματοποιούνταν όταν το θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας στα μαύρα βαρέλια των πειραματικών μονάδων είχε σχεδόν εξαντληθεί και επρόκειτο να παρασκευαστεί νέο θρεπτικό διάλυμα.

Για τον έλεγχο της θρεπτικής κατάστασης των φυτών και την πορεία της συγκέντρωσης του Na^+ και του Cl^- στα φύλλα, έγιναν 6 δειγματοληψίες φύλλων (3ο και 4ο φύλλο από την κορυφή, 60 – 70 g φύλλων ανά πειραματική μονάδα), τις ημέρες 14, 28, 42, 56, 70 και 105 από την έναρξη του πειράματος. Στα δείγματα, επιπλέον των Na^+ και Cl^- , μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις των Ca^{2+} , K^+ , και Mg^{2+} . Τις ίδιες ημέρες γίνονταν συλλογή και ολόκληρων φυτών (υπέργεια μέρη, δύο ανά πειραματική μονάδα) για τον έλεγχο των επιπτώσεων της αλατότητας στην βλαστική ανάπτυξη των φυτών μέσω της μέτρησης του νωπού και του ξηρού βάρους.

Η συγκομιδή των καρπών γίνονταν δύο φορές την εβδομάδα, από τις 19 Νοεμβρίου 2004 (περίπου ένα μήνα μετά την έναρξη της ανακύκλωσης), έως τις 28 Ιανουαρίου 2005. Σε κάθε συγκομιδή μετρούνταν τόσο ο αριθμός των καρπών, όσο και το συνολικό τους βάρος ανά κανάλι.

Για τη μέτρηση του νωπού και του ξηρού βάρους, τα υπέργεια τμήματα των φυτών ζυγίζονταν αμέσως μετά τη συλλογή τους και στη συνέχεια τοποθετούνταν σε φούρνο ξήρανσης (Memmert, model 500) στους 80° C μέχρι τη σταθεροποίηση του βάρους τους, το οποίο και καταγραφόταν.

Τα φύλλα, αμέσως μετά τη συλλογή τους, τοποθετούνταν στο φούρνο ξήρανσης στους 80° C μέχρι σταθεροποίησης του βάρους τους. Στη συνέχεια γινόταν ένας γρήγορος ψιλοτεμαχισμός τους με ένα απλό multimixer χειρός και αμέσως μετά τα δείγματα αλέθονταν σε έναν ειδικό μύλο άλεσης φυτικών ιστών (Retsch, MM200). Ακολούθως, 500 mg της αλεσμένης ξηρής ουσίας από κάθε δείγμα καίγονταν σε φούρνο υψηλών θερμοκρασιών (Linn High Therm) στους 550° C για 5 ώρες. Η στάχτη εκχυλίζονταν με 10 ml διαλύματος HCl 1M και το εκχύλισμα διηθούνταν μέσω φίλτρου Wattman 42. Τέλος, το διάλυμα αραιωνόταν με απιονισμένο νερό μέχρι τον όγκο των 50 ml (Campbell and Plank, 1998).

Οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων των στοιχείων Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} και Na^+ στα φυλλικά εκχυλίσματα, αλλά και στα δείγματα του διαλύματος απορροής, γίνονταν σε ένα φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης Perkin Elmer, AAnalyst 100.

Για τη μέτρηση του Cl^- στα φύλλα, 250 mg ξηρής, αλεσμένης ουσίας εκχυλίζονταν με 25 ml απιονισμένου νερού για μισή ώρα, ενώ ακολουθούσε διήθηση σε φίλτρο Wattman 42 (Liu, 1998). Η μέτρηση της συγκέντρωσης του Cl^- στα φύλλα, αλλά και στο διάλυμα απορροής, γίνονταν με ογκομέτρηση με AgNO_3 παρουσία K_2CrO_4 (Eaton et al., 1995).

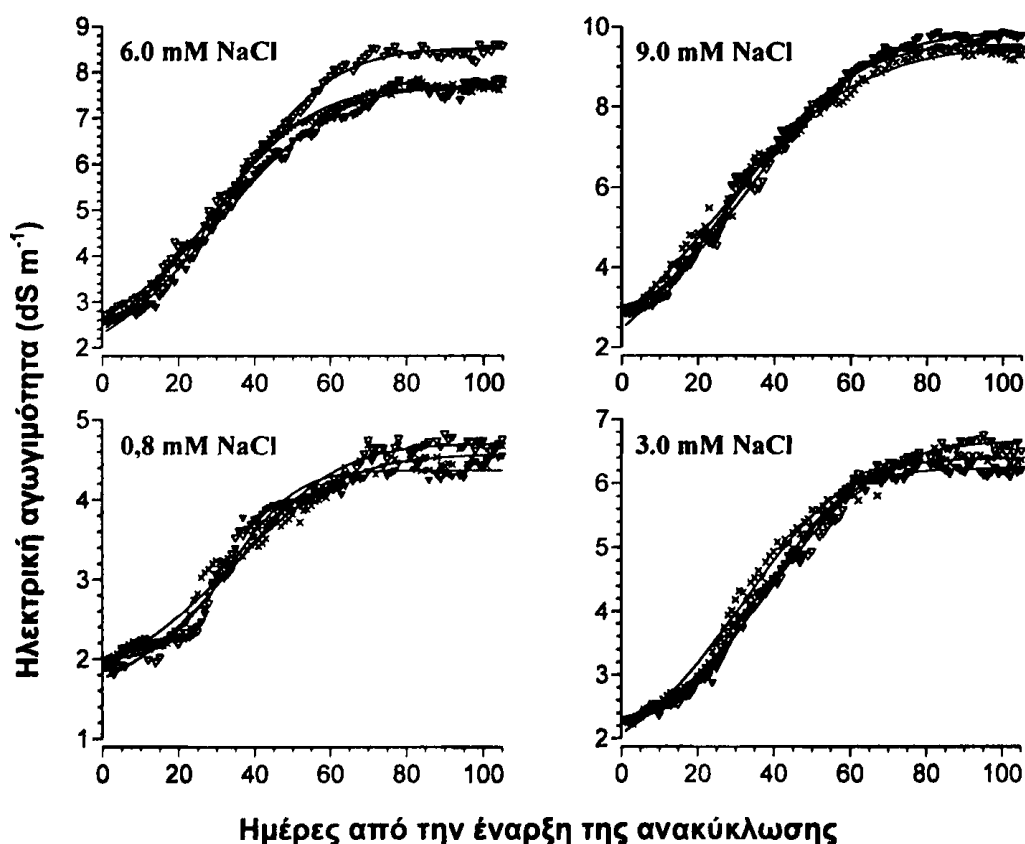
Τα δεδομένα που αφορούσαν στην EC, στην αθροιστική κατανάλωση νερού και στις συγκεντρώσεις του Na^+ και του Cl^- στο διάλυμα απορροής αναλύθηκαν στατιστικά με μη γραμμική ανάλυση της παλινδρόμησης. Τα δεδομένα που αφορούσαν στις συγκεντρώσεις των Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} στο διάλυμα απορροής και στα φύλλα, τις συγκεντρώσεις των Na^+ και Cl^- στα φύλλα, στο νωπό και ξηρό βάρος των βλαστών, στο βάρος και τον αριθμό των καρπών καθώς και στο βάρος ανά καρπό αναλύθηκαν στατιστικά αρχικά

με ανάλυση της διασποράς (ANOVA) και στη συνέχεια, όπου η ANOVA έδινε σημαντικές τιμές για το F, με σύγκριση των μέσων των 4 επεμβάσεων μέσω της δοκιμασίας Duncan. Τόσο για τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων, όσο και για τη δημιουργία των γραφημάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης PlotIT 3,2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 η αύξηση της EC στο διάλυμα απορροής και συνεπώς στο περιβάλλον των ριζών, ακολουθεί το πρότυπο της σιγμοειδούς καμπύλης σε όλες τις μεταχειρίσεις. Στις 20 – 25 ημέρες από την έναρξη της ανακύκλωσης η αύξηση ήταν σχετικά αργή, επιταχύνθηκε στη συνέχεια, για να σταθεροποιηθεί τελικά 70 – 80 ημέρες από την έναρξη σε διαφορετικά επίπεδα για κάθε επέμβαση. Έτσι, όταν η συγκέντρωση του NaCl στο νερό άρδευσης ήταν 0,8 mM οι τελικές τιμές της EC κυμάνθηκαν από 4,4 έως 4,7 dS m⁻¹, όταν η συγκέντρωση NaCl ήταν 3 mM από 6,2 έως 6,6 dS m⁻¹, όταν ήταν 6 mM από 7,5 έως 8,5 dS m⁻¹, και τέλος, όταν ήταν 9 mM οι τιμές κυμάνθηκαν από 8,5 έως 9,2 dS m⁻¹.



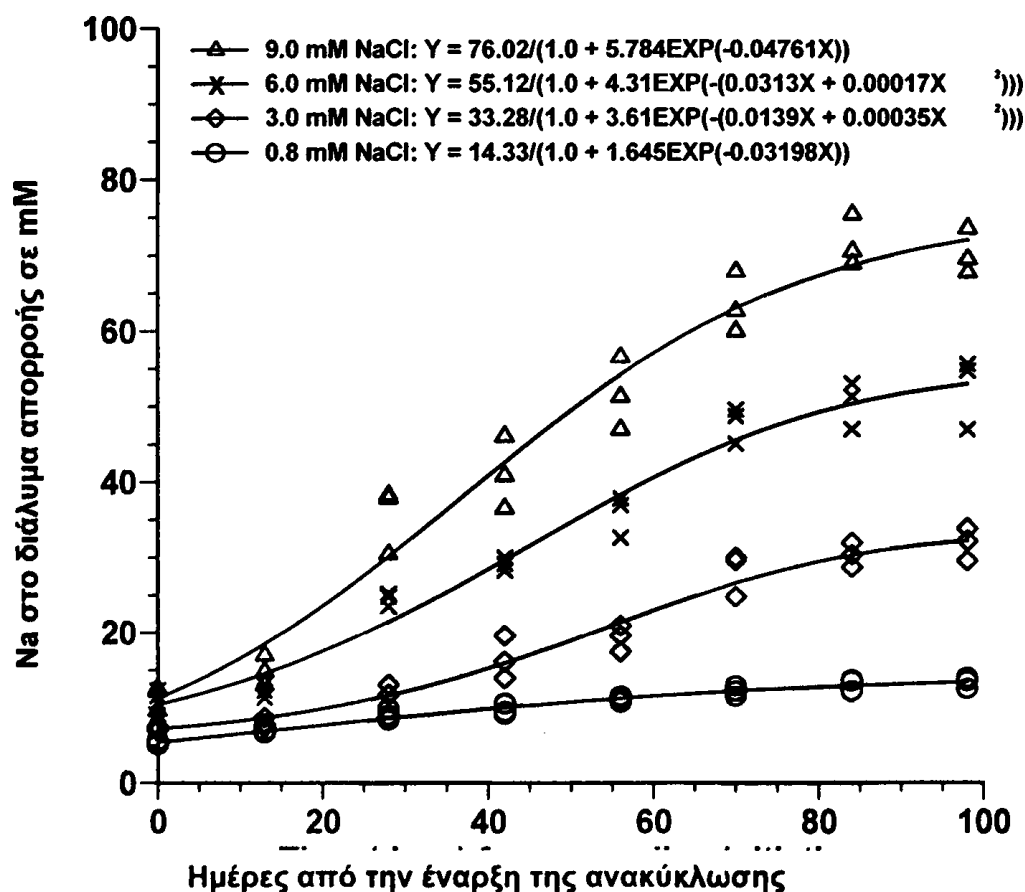
Σχήμα 3.1. Αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο διάλυμα απορροής, λόγω της συσσώρευσης του NaCl, σε καλλιέργεια φασολιού σε κλειστό υδροπονικό σύστημα στα τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης. Σε κάθε γραφική παράσταση χρησιμοποιούνται διαφορετικά σύμβολα για κάθε επανάληψη, ενώ οι γραμμές αντιστοιχούν σε καμπύλες μη γραμμικής παλινδρόμησης που παρουσιάζουν τη βέλτιστη αντιστοιχία με τις μετρούμενες τιμές.

3.2. Συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- στο περιβάλλον των ριζών

Οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων των ιόντων Na^+ και Cl^- έγιναν στο διάλυμα απορροής και συνεπώς δεν αντιστοιχούσαν επακριβώς στις συγκεντρώσεις των ιόντων στο συνολικό θρεπτικό διάλυμα που υπήρχε στο κλειστό υδροπονικό σύστημα τη στιγμή της δειγματοληψίας. Το τελευταίο περιλάμβανε το διάλυμα απορροής, το διάλυμα τροφοδοσίας που παρέμενε στο βαρέλι τροφοδοσίας και το θρεπτικό διάλυμα που συγκρατούσε το υπόστρωμα. Ο όγκος του διαλύματος απορροής μετρούνταν on line κατά την ανακύκλωση του διαλύματος, ενώ ο όγκος του υπολειπόμενου διαλύματος τροφοδοσίας υπολογίζονταν μετρώντας το ύψος της στάθμης του διαλύματος στο βαρέλι. Τέλος, ο όγκος του διαλύματος που συγκρατούσε το υπόστρωμα ήταν κάθε φορά σταθερός, ίσος με το 20% του όγκου του υποστρώματος (η ελαφρόπετρα διαμέτρου 0 – 5 mm συγκρατεί όγκο νερού ίσο με το 20 – 25% του όγκου της). Οι συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- στο διάλυμα που περιέχεται στο υπόστρωμα θεωρούνται κατά προσέγγιση ίσες με αυτές που υφίστανται στο διάλυμα απορροής. Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- στο διάλυμα τροφοδοσίας, αυτές υπολογιζόταν λαμβανόταν υπόψη: α) το γεγονός ότι οι συγκεντρώσεις του Na^+ και του Cl^- στο νωπό θρεπτικό διάλυμα που αναμειγνυόταν με διάλυμα απορροής για να παρασκευαστεί διάλυμα τροφοδοσίας ήταν ίσες με τη συγκέντρωση του NaCl στο νερό άρδευσης, β) οι συγκεντρώσεις του Na^+ και του Cl^- στο διάλυμα απορροής που είχαν μετρηθεί στο εργαστήριο και γ) οι εκάστοτε αναλογίες ανάμειξης διαλύματος απορροής με νωπό θρεπτικό διάλυμα κατά την παρασκευή νέου θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας. Επομένως, εφόσον τόσο οι συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- , όσο και οι όγκοι των επιμέρους διαλυμάτων που απαρτίζουν το συνολικό θρεπτικό διάλυμα που υπήρχε στο κλειστό υδροπονικό σύστημα ήταν γνωστοί, ήταν δυνατός ο υπολογισμός της μέσης συγκέντρωσης Na^+ και Cl^- σε αυτό. Στις επιχειρηματικές μορφές υδροπονικές καλλιέργειες όμως δεν υπάρχει βαρέλι τροφοδοσίας με θρεπτικό διάλυμα όπως συνέβαινε στην παρούσα πειραματική εγκατάσταση, η οποία εξυπηρετούσε ερευνητικούς σκοπούς. Επομένως, στις υδροπονικές καλλιέργειες που εφαρμόζονται για παραγωγικούς σκοπούς, οι συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- στο διάλυμα απορροής αντιστοιχούν κατά μεγάλη προσέγγιση στις μέσες συγκεντρώσεις τους στο κλειστό υδροπονικό σύστημα όπως ορίσθηκαν παραπάνω.



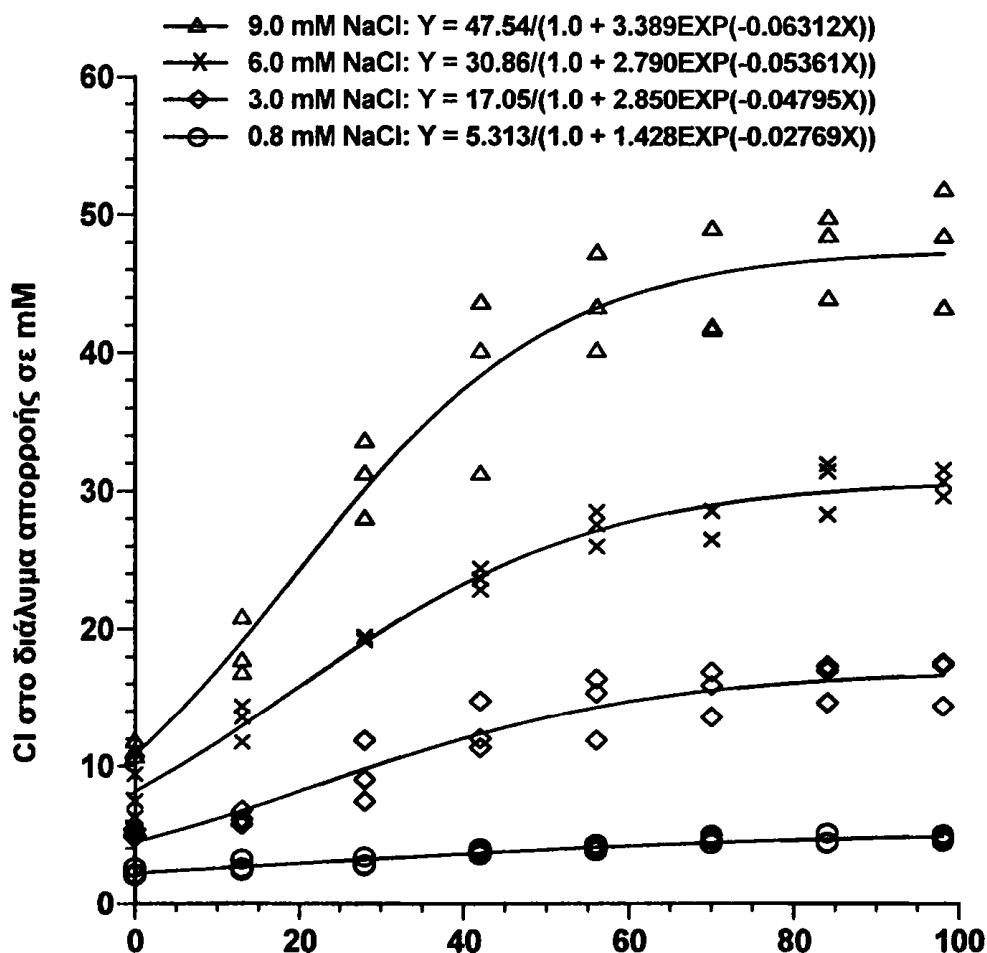
Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια, δείχνουν ότι η συσσώρευση των ιόντων Na^+ (Σχ. 3.2) και Cl^- (Σχ. 3.3) στο περιβάλλον των ριζών ακολουθεί, όπως και στην EC, το πρότυπο της σιγμοειδούς καμπύλης για τις μεταχειρίσεις με αυξημένη συγκέντρωση NaCl το νερό άρδευσης. Στη μεταχείριση των 3 mM NaCl η συσσώρευση του Na^+ , στο διάλυμα απορροής (Σχ. 3.2), αυξήθηκε αργά τις πρώτες 25 ημέρες από την έναρξη της ανακύκλωσης, ταχύτερα τις επόμενες 60 ημέρες, για να σταθεροποιηθεί τελικά, 85 ημέρες από την έναρξη στα 31,5 mM. Στη μεταχείριση των 6 mM ο χρόνος της αργής συσσώρευσης στα πρώτα στάδια ήταν πιο σύντομος (12 ημέρες περίπου), η επιτάχυνση της συσσώρευσης πιο έντονη και η σταθεροποίηση της συγκέντρωσης επήλθε τελικά, στο ίδιο περίπου χρονικό διάστημα (85 ημέρες μετά την αρχή), σε υψηλότερα όμως επίπεδα (53 mM).



Σχήμα 3.2. Αύξηση της συσσώρευσης του Na^+ στο περιβάλλον των ριζών (mM), στη διάρκεια του χρόνου, σε καλλιέργεια φασολιού σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης. Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις μετρήσεις των συγκεντρώσεων Na και οι γραμμές σε καμπύλες μη γραμμικής παλινδρόμησης που παρουσιάζουν τη βέλτιστη αντιστοιχία με τις μετρούμενες τιμές.

Τέλος στη μεταχείριση των 9 mM η φάση της έντονης συσσώρευσης ξεκίνησε σχεδόν με την έναρξη της ανακύκλωσης, ήταν πιο έντονη από τις άλλες μεταχειρίσεις και ομαλοποιήθηκε τις δύο τελευταίες μετρήσεις στα 70,5 mM .

Η συσσώρευση του Cl^- στο διάλυμα απορροής (Σχ. 3.3) και στις τρεις αυτές μεταχειρίσεις, λάμβανε χώρα με πιο αργούς ρυθμούς σε σύγκριση με το Na^+ , ενώ η σταθεροποίηση της συγκέντρωσής του επήλθε, χρονικά, πιο γρήγορα ($60^{\text{η}}$ – $65^{\text{η}}$ ημέρα) με συνέπεια να φθάσει σε χαμηλότερα επίπεδα από τα αντίστοιχα του Na^+ . Ειδικότερα, η συγκέντρωση Cl^- στο διάλυμα απορροής έφθασε στα 16 mM για τη μεταχείριση των 3 mM NaCl στο νερό άρδευσης, στα 31,5 mM για τη μεταχείριση των 6 mM NaCl και στα 47 mM για τη μεταχείριση των 9 mM NaCl.



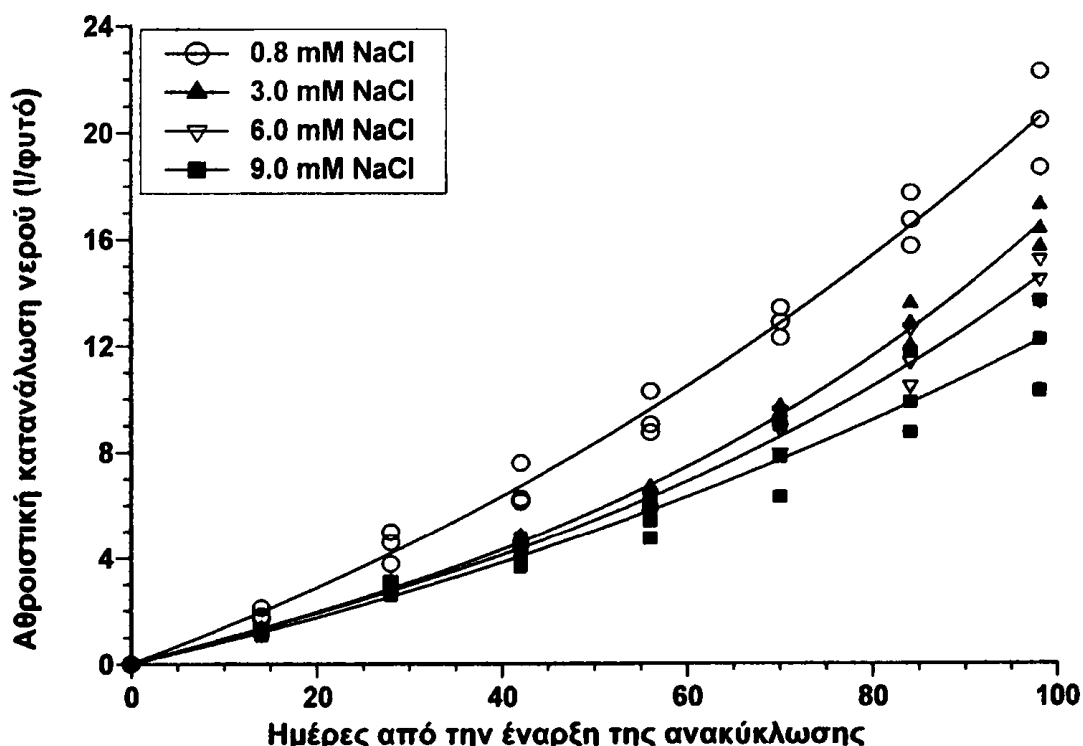
Σχήμα 3.3. Αύξηση της συσσώρευσης του Cl^- στο περιβάλλον των ριζών (mM), στη διάρκεια του χρόνου, σε καλλιέργεια φασολιού σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης. Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις μετρήσεις των συγκεντρώσεων Cl^- και οι γραμμές σε καμπύλες μη γραμμικής παλινδρόμησης που παρουσιάζουν τη βέλτιστη αντιστοιχία με τις μετρούμενες τιμές.

Στη μεταχείριση με τη χαμηλή συγκέντρωση NaCl (0,8 mM) στο νερό άρδευσης ο ρυθμός συσσώρευσης τόσο του Na όσο και του Cl στο διάλυμα απορροής ήταν πολύ πιο αργός, ενώ η συγκέντρωσή τους σταθεροποιήθηκε γρήγορα με συνέπεια να μην υπερβεί τα επίπεδα των 12,6 mM για το Na⁺ και 4,5 mM για το Cl⁻.

3.3. Κατανάλωση νερού

Οι απώλειες του νερού, κατά τη διάρκεια του πειράματος, μέσω εξάτμισης ή αστοχίας του συστήματος ήταν αμελητέες και συνεπώς ο όγκος του νερού που εισέρχονταν στο σύστημα ήταν ίσος με τον όγκο του νερού που απορροφούσαν τα φυτά. Γνωρίζοντας τον όγκο του διαλύματος απορροής μετά από κάθε κύκλο άρδευσης και τον όγκο του παρασκευαζόμενου διαλύματος τροφοδοσίας υπολογίστηκε ο όγκος του νερού που δαπανώνταν για την αναπλήρωση των απωλειών μέσω της διαπνοής και στη συνέχεια η αθροιστική κατανάλωση νερού από τα φυτά, σε λίτρα ανά φυτό.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.4, όπου φαίνεται ότι τη μεγαλύτερη συνολική κατανάλωση νερού, 20,4 l/φυτό, είχαν τα φυτά της μεταχείρισης με τη μικρότερη συγκέντρωση NaCl στο νερό άρδευσης. Η πρόσληψη νερού από τα φυτά στις άλλες μεταχειρίσεις μειώθηκε όσο πιο αυξημένη ήταν η συγκέντρωση NaCl στο νερό άρδευσης. Έτσι, όταν το νερό



Σχήμα 3.4. Αθροιστική κατανάλωση νερού ανά φυτό κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας φασολιού σε κλειστό υδροπονικό σύστημα σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης. Τα σύμβολα αντιστοιχούν στην κατανάλωση νερού τις ημέρες δειγματοληψίας διαλύματος απορροής στις τρεις επαναλήψεις και οι γραμμές σε καμπύλες μη γραμμικής παλινδρόμησης που παρουσιάζουν τη βέλτιστη αντιστοιχία με τις μετρούμενες τιμές.

άρδευσης περιείχε 3, 6 και 9 mM NaCl, η συνολική κατανάλωση νερού ήταν 16,40, 14,42 και 12,02 l/φυτό αντίστοιχα ή 80,4%, 70,7% και 58,9% της κατανάλωσης στη μεταχείριση με 0,8 mM NaCl.

Οι διαφορές στην κατανάλωση νερού ανάμεσα στη μεταχείριση των 0,8 mM NaCl και των υπολοίπων, εμφανίστηκαν από τη δεύτερη μόλις εβδομάδα από την έναρξη της ανακύκλωσης και αυξήθηκαν με το πέρασμα του χρόνου. Οι διαφορές μεταξύ των άλλων τριών μεταχειρίσεων εμφανίστηκαν την 6^η εβδομάδα από την έναρξη της ανακύκλωσης και μεγεθύνθηκαν επίσης με το πέρασμα του χρόνου.

3.4. Αναλογίες απορρόφησης Na/νερό και Cl/νερό

Σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα ιόντα Na^+ και Cl^- εισέρχονται στο σύστημα μόνο μέσω του νερού άρδευσης και εξέρχονται μέσω της απορρόφησης των φυτών. Οι αναλογίες Na/νερό και Cl/νερό που εισέρχονταν στο σύστημα, κατά τη διάρκεια του πειράματος, ήταν σταθερές για κάθε μεταχείριση στη διάρκεια του χρόνου (εφ' όσον σταθερή ήταν και η συγκέντρωσή του NaCl στο νερό άρδευσης), ενώ αντίθετα οι αναλογίες απορρόφησης των ιόντων αυτών προς νερό, από τα φυτά, αυξάνονταν όσο αυξάνονταν η συσσώρευσή τους στο περιβάλλον των ριζών (Sonneveld, 2000).

Συνεπώς, η σταθεροποίηση της συγκέντρωσης των ιόντων Na^+ και Cl^- στο διάλυμα απορρόης (θα αναφέρεται ως C_{xs} , όπου $x = \text{Na}$ ή Cl), που παρατηρήθηκε στις δύο τελευταίες δειγματοληψίες (Σχ. 3.2, 3.3), συνεπάγεται ότι η αναλογία ιόντων προς νερό που απορροφούσαν τα φυτά (θα αναφέρεται ως C_{xu} , όπου $x = \text{Na}$ ή Cl), κατά την περίοδο αυτή, ήταν ίση με την αναλογία ιόντων προς νερό που εισέρχονταν στο κλειστό σύστημα μέσω του νερού άρδευσης, τιμή γνωστή για κάθε μεταχείριση.

Είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία (Sonneveld et al., 1999, Savvas et al., 2005b) ότι η σχέση μεταξύ της αναλογίας απορρόφησης ιόντος/νερό (Y) και της συγκέντρωσης του ιόντος στο περιβάλλον των ριζών (X) δίνεται είτε από μια εκθετική εξίσωση της μορφής:

$$Y = aX^b \quad (3.1)$$

η οποία εδώ γράφεται:

$$C_{xu} = aC_{xs}^b \quad (3.2)$$

ή από μια γραμμική εξίσωση της μορφής:

$$Y = aX \quad (3.3)$$

η οποία εδώ γράφεται:

$$C_{xu} = a'C_{xs} \quad (3.4)$$

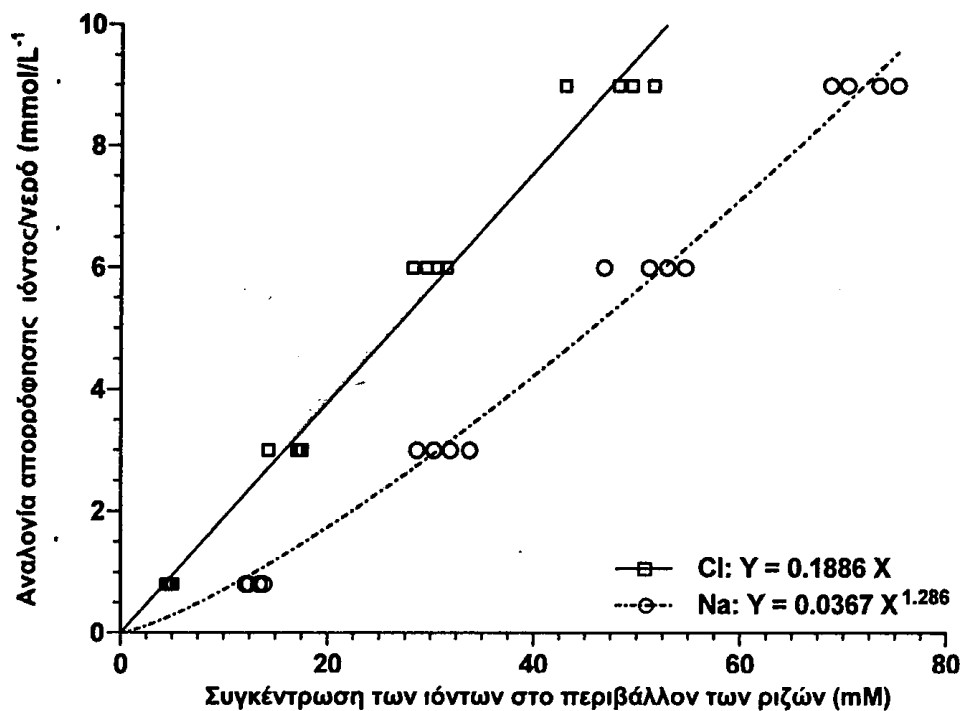
Τόσο οι τιμές των παραμέτρων a και b ή a' όσο και η μορφή της εξίσωσης που θα χρησιμοποιηθεί κάθε φορά εξαρτάται κυρίως από το είδος του καλλιεργούμενου φυτού. Για τον υπολογισμό των παραμέτρων a και b ή a' , χρησιμοποιήθηκαν οι συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- που μετρήθηκαν στο κλειστό σύστημα στις δύο τελευταίες δειγματοληψίες σε αντιστοιχία με τις

συγκεντρώσεις NaCl στο νερό άρδευσης. Όπως προαναφέρθηκε, οι τελευταίες σε αυτό το στάδιο της καλλιέργειας ήταν ίσες με τις αντίστοιχες αναλογίες απορρόφησης. στις δύο από τις τρεις επαναλήψεις κάθε μεταχείρισης. Στη συνέχεια τα ζεύγη τιμών που προέκυψαν υποβλήθηκαν σε ανάλυση της παλινδρόμησης (Sonneveld, 2000, Savvas et al., 2000b).

Για, τους παραπάνω υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα δεδομένα από τις δύο εκ των τριών συνολικά επαναλήψεων κάθε μεταχείρισης. Αφού ο υπολογισμός των παραμέτρων a , a' και b έγινε με εμπειρικές μεθόδους, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό τους πρέπει εξ ορισμού να είναι ανεξάρτητα των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του μοντέλου (Pardossi et al., 2004). Έτσι, οι τιμές των συγκεντρώσεων των ιόντων Na^+ και Cl^- της τρίτης επανάληψης κάθε μεταχείρισης χρησιμοποιήθηκαν για να ελεγχθεί η ακρίβεια του μοντέλου.

Στην περίπτωση του Na^+ η σχέση ήταν εκθετική σύμφωνα με την εξίσωση (3.2), ενώ για το Cl^- μία γραμμική σχέση, σύμφωνα με την εξίσωση (3.4), ταίριαζε καλύτερα με τα ληφθέντα αποτελέσματα. Ο υπολογισμός των παραμέτρων a και b έδωσε τις τιμές 0,0367 και 1,286 για την (3.2) και της παραμέτρου a' την τιμή 0,1886 για την (3.4).

Οι καμπύλες μη γραμμικής παλινδρόμησης για το Na^+ και γραμμικής παλινδρόμησης για το Cl^- που παρουσιάζουν τη βέλτιστη αντιστοιχία με τις μετρηθείσες τιμές παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.5 και δείχνουν ότι τα φυτά, στις ίδιες εξωτερικές συγκεντρώσεις των δύο ιόντων, απορροφούν Cl^- με εντονότερο ρυθμό από το Na^+ . Έτσι, όταν η συγκέντρωση του Na^+ στο περιβάλλον των ριζών είναι 12,6, 31,5, 53 και 70,5 mM (μέγιστες συγκεντρώσεις Na^+ , που μετρήθηκαν στο περιβάλλον των ριζών, όταν οι συγκεντρώσεις του NaCl στο νερό άρδευσης ήταν 0,8, 3, 6 και 9 mM αντίστοιχα), η αναλογία απορρόφησης Na/νερό από τα φυτά είναι 1,8, 3,1, 6 και 9 mmol/l αντίστοιχα. Για το Cl^- οι ίδιες τιμές αναλογίας απορρόφησης από τα φυτά (1,8, 3,1, 6 και 9 mmol/l) αντιστοιχούν σε 4,5, 16, 31,5 και 47 mM ιόντος στο περιβάλλον των ριζών (μέγιστες τιμές συγκέντρωσης Cl^- , που μετρήθηκαν στο περιβάλλον των ριζών, όταν οι συγκεντρώσεις του NaCl στο νερό άρδευσης ήταν 0,8, 3, 6 και 9 mM αντίστοιχα).



Σχήμα 3.5. Αναλογία απορρόφησης ιόντων Na^+ (διακεκομμένη γραμμή) και Cl^- (συνεχής γραμμή) ως προς την απορρόφηση νερού (C_{xu}) συναρτήσει της συγκέντρωσής τους στο περιβάλλον των ριζών (C_{xs}) σε καλλιέργεια φασολιού σε κλειστό υδροπονικό σύστημα. Τα σύμβολα αντιστοιχούν σε μετρηθέντα ζεύγη τιμών (C_{xu} , C_{xs}) σε δύο επαναλήψεις κάθε μεταχείρισης και οι γραμμές σε καμπύλες μη γραμμικής παλινδρόμησης για το Na^+ και γραμμικής παλινδρόμησης για το Cl^- .

3.5. Μοντέλο συσχέτισης συσσώρευσης Na^+ και Cl^- με κατανάλωση νερού

Σύμφωνα με τους Savvas et al. (2005a), η αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων Na^+ και Cl^- στο θρεπτικό διάλυμα που περιέχεται στο κλειστό υδρπονικό σύστημα (C_{xs} , όπου $x = \text{Na}, \text{Cl}$) είναι ανάλογη της αύξησης της αθροιστικής κατανάλωσης νερού από τα φυτά (V_w), επί τη διαφορά μεταξύ της αναλογίας ιόντος/νερό που εισέρχεται στο σύστημα (C_{xw}) και της αναλογίας ιόντος/νερό που απορροφούν τα φυτά (C_{xu}), είναι δε αντιστρόφως ανάλογη του όγκου του θρεπτικού διαλύματος που περιέχεται στο σύστημα (V_s). Μαθηματικά η παραπάνω σχέση αποδίδεται με την ακόλουθη εξίσωση

$$dC_{xs} = dV_w (C_{xw} - C_{xu}) / V_s \quad (3.5)$$

στην οποία: η συγκέντρωση των ιόντων στο περιβάλλον των ριζών (C_{xs} , mM) είναι μεταβλητή· ο όγκος του νερού που απορροφούν τα φυτά (V_w , l/φυτό) (ίσος με τον όγκο του νερού που εισέρχεται στο σύστημα) είναι επίσης μεταβλητή· η αναλογία ιόντος/νερό που εισέρχεται στο σύστημα (C_{xw} , mM) (ίση με τη συγκέντρωση NaCl στο νερό άρδευσης) είναι σταθερή· η αναλογία απορρόφησης ιόντος/νερό (C_{xu} , mM) είναι μεταβλητή και τέλος ο όγκος του θρεπτικού διαλύματος που περιέχεται στο σύστημα κατά τη στιγμή της δειγματοληψίας (V_s , l/φυτό) είναι σταθερός (ολικός όγκος θρεπτικού διαλύματος/αρ. φυτών = 0,7 l/φυτό). Συνεπώς, η εξίσωση (3.5) περιέχει τρεις μεταβλητές.

Αν η σχέση μεταξύ C_{xu} και C_{xs} είναι εκθετική, όπως στην περίπτωση του Na^+ , η C_{xu} της (3.5) μπορεί να αντικατασταθεί από την (3.2), και τότε η (3.5) για το Na^+ γράφεται:

$$dC_{\text{Na}s} = dV_w (C_{\text{Na}w} - aC_{\text{Na}s}^b) / V_s \quad (3.6)$$

και στη συνέχεια:

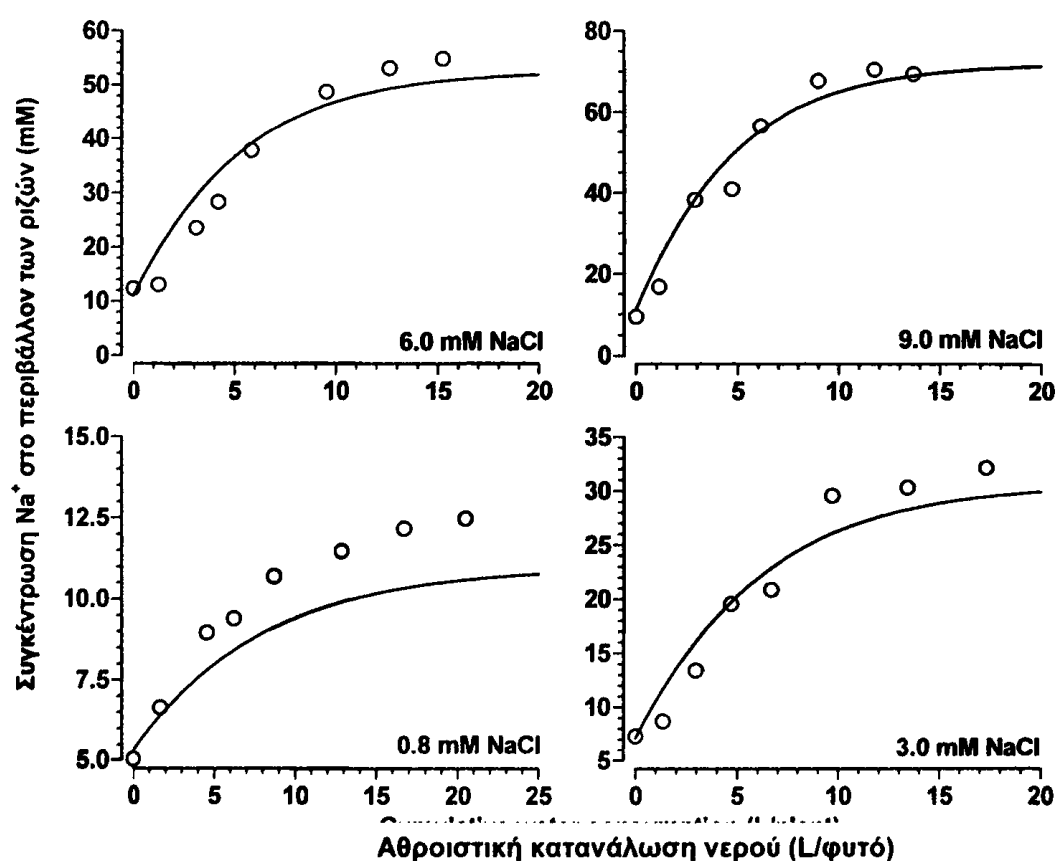
$$dC_{\text{Na}s} / dV_w = (C_{\text{Na}w} - aC_{\text{Na}s}^b) / V_s \quad (3.7)$$

όπου η μεταβλητή $C_{\text{Na}s}$ σχετίζεται μόνο με τη μεταβλητή V_w . Οι τιμές των a και b , έχουν υπολογιστεί (βλ. Αναλογίες απορρόφησης Na/νερό και Cl/νερό) και V_s είναι 0,7, οπότε η (3.7) γράφεται:

$$dC_{\text{Na}s} / dV_w = (C_{\text{Na}w} - 0,0367C_{\text{Na}s}^{1,286}) / 0,7 \quad (3.8)$$



Η παραπάνω διαφορική εξίσωση δεν επιδέχεται αναλυτική λύση, αλλά μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων. Εφαρμόστηκε η κλασική μέθοδος των Runge – Kutta τετάρτης τάξεως (Butcher, 1987) χρησιμοποιώντας σαν αρχικές τιμές τις συγκεντρώσεις του Na^+ ή του Cl^- που μετρήθηκαν στο θρεπτικό διάλυμα της κάθε μεταχείρισης την ημέρα έναρξης της ανακύκλωσης ($V_w = 0$) (Savvas et al., 2005a). Οι καμπύλες που προέκυψαν από την αριθμητική επίλυση της (3.8) για κάθε διαφορετικό επίπεδο NaCl στο νερό άρδευσης (C_{Na_w}) παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.6. Οι καμπύλες αυτές παριστάνουν γραφικά την σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης του Na^+ στο περιβάλλον των ριζών και της αθροιστικής κατανάλωσης νερού



Σχήμα 3.6. Συγκέντρωση Na^+ στο περιβάλλον των ριζών συναρτήσει της αθροιστικής κατανάλωσης νερού από τα φυτά κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας φασολιού σε κλειστό υδροπονικό σύστημα σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης. Σε κάθε γράφημα οι γραμμές αντιστοιχούν στις προβλεπόμενες από το μοντέλο τιμές και τα σύμβολα στις τιμές που μετρήθηκαν στην επανάληψη που δε χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των παραμέτρων a και b .

από τα φυτά. Τα σύμβολα (κύκλοι) αντιπροσωπεύουν τις συγκεντρώσεις του Na^+ που μετρήθηκαν στο περιβάλλον των ριζών στην επανάληψη η οποία δεν χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των a και b και επομένως είναι ενδεικτικές για την αξιοπιστία του μοντέλου που βασίζεται στην (3.6). Ειδικότερα, από το Σχήμα 3.6 προκύπτει ότι στη μεταχείριση με 0,8 mM NaCl στο νερό άρδευσης το μοντέλο, μετά τη δεύτερη μέτρηση, προβλέπει μικρότερες τιμές Na^+ στο περιβάλλον των ριζών από αυτές που μετρήθηκαν στην επανάληψη που δε χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των παραμέτρων a και b . Η μέση απόκλιση των προβλέψεων του μοντέλου από τις πραγματικές τιμές ήταν 10,64%. Στη μεταχείριση με 3 mM NaCl, το μοντέλο τείνει να υπερεκτιμά τη συσσώρευση του Na^+ στο θρεπτικό διάλυμα του συστήματος μέχρι η αθροιστική κατανάλωση νερού να φτάσει τα 7 l/φυτό περίπου, ενώ η μέση απόκλιση των προβλέψεων του μοντέλου ήταν 10,77%. Παρόμοια εικόνα παρουσιάζουν και οι μεταχειρίσεις με 6 και 9 mM NaCl στο νερό άρδευσης στις οποίες το μοντέλο υπερεκτιμά τη συσσώρευση του Na^+ στο περιβάλλον των ριζών μέχρι η κατανάλωση νερού να φτάσει τα 5-6 l/φυτό, ενώ στη συνέχεια την υποεκτιμά. Η μέση απόκλιση των προβλέψεων του μοντέλου από τις μετρηθείσες τιμές στις δύο αυτές μεταχειρίσεις ήταν 13,74% και 8,2% αντίστοιχα.

Αν η σχέση μεταξύ C_{xu} και C_{xs} είναι γραμμική, όπως στην περίπτωση του Cl^- , η C_{xu} στην (3.5) μπορεί να αντικατασταθεί από την (3.4), και τότε η (3.5) για το Cl^- γράφεται:

$$dC_{cls} / dV_w = (C_{clw} - a'C_{cls}) / V_s \quad (3.9)$$

Η εξίσωση (3.9) μπορεί να λυθεί ως προς C_{cls} με ολοκλήρωση και την τέλεση των κατάλληλων πράξεων, οπότε προκύπτει το παρακάτω αποτέλεσμα:

$$C_{cls} = \frac{\exp(-\frac{a'V_w}{V_s})b' + C_{clw}}{a'} \quad (3.10)$$

Στην σχέση (3.10), η τιμή του a' , έχει υπολογιστεί (βλ. Αναλογίες απορρόφησης Na/νερό και Cl/νερό) και επομένως θεωρείται γνωστή, ενώ η b' είναι η σταθερά ολοκλήρωσης, η οποία υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε επίπεδο NaCl στο νερό άρδευσης (C_{clw}) με αντικατάσταση της C_{cls} από την συγκέντρωση του Cl^- που μετρήθηκε στο διάλυμα απορροής την ημέρα

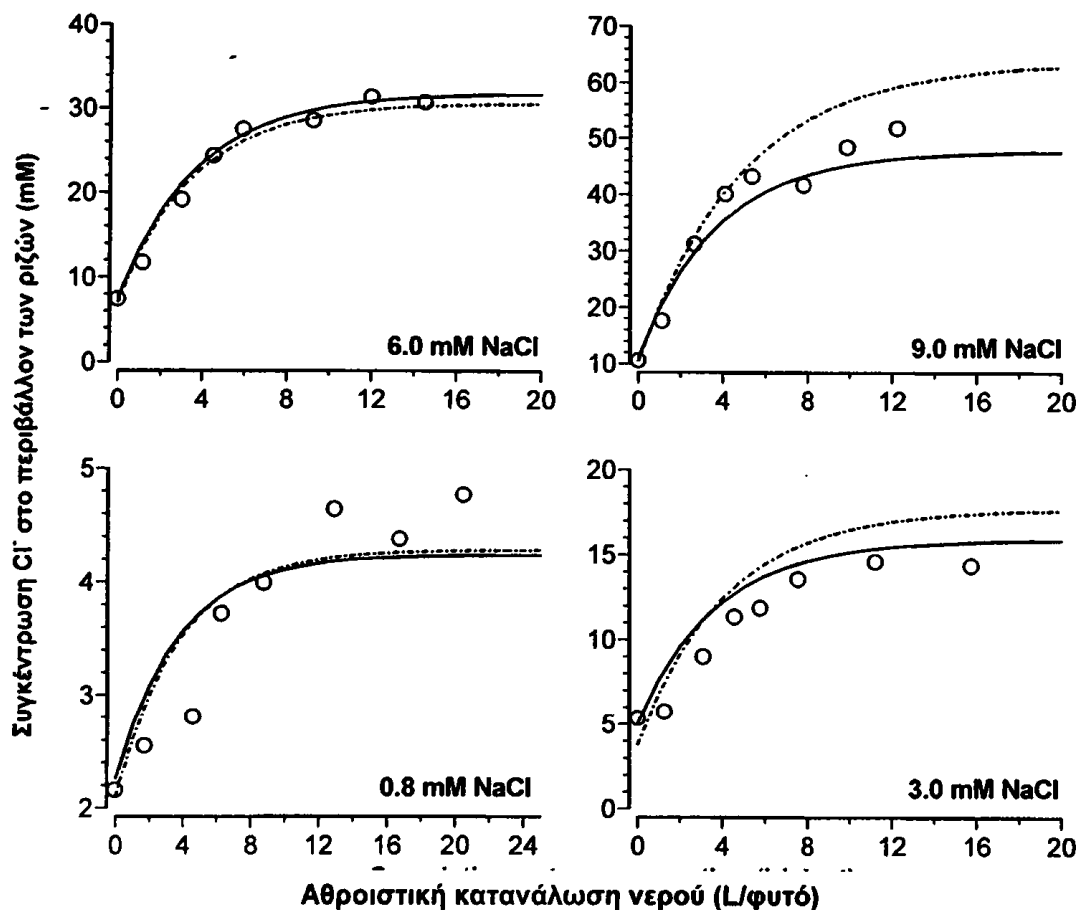
έναρξης της ανακύκλωσης στην συγκεκριμένη μεταχείριση και του V_w με το 0. Τελικά η (3.10) γράφεται:

$$C_{Cl_s} = \frac{\exp(-\frac{0,1886V_w}{0,7})b' + C_{Cl_w}}{0,1886} \quad (3.11)$$

Η εξίσωση (3.11), κατόπιν αντικατάστασης των αντίστοιχών τιμών b' και C_{Cl_w} σε κάθε μεταχείριση έδωσε τις καμπύλες που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.7 με συνεχή γραμμή.

Εφόσον όμως η εξίσωση (3.10) είναι η αναλυτική λύση της (3.9), οι παράμετροι a' και b' μπορούν να υπολογισθούν εναλλακτικά και απευθείας από την (3.10) με εφαρμογή μη γραμμικής ανάλυσης της παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας ως ζεύγη τιμών τις μετρηθείσες κατά τη διάρκεια του πειράματος τιμές της C_{Cl_s} και τις αντίστοιχες τιμές του V_w για κάθε διαφορετικό επίπεδο C_{Cl_w} . Τελικά προκύπτουν τέσσερα ζεύγη παραμέτρων a' και b' , ένα για κάθε διαφορετικό επίπεδο C_{Cl_w} και τέσσερις εξισώσεις, από τις οποίες προκύπτουν οι καμπύλες που παρουσιάζονται επίσης στο Σχήμα 3.7 με διακεκομμένη γραμμή.

Στην περίπτωση που η παράμετρος a' υπολογίστηκε με γραμμική ανάλυση της παλινδρόμησης μέσω της εξίσωσης (3.4) (Σχ. 3.7, συνεχής γραμμή) στη μεταχείριση με 0,8 mM NaCl στο νερό άρδευσης το μοντέλο έτεινε να υπερεκτιμά τις τιμές του Cl⁻, σε σχέση με τις τιμές που μετρήθηκαν στο περιβάλλον των ριζών, έως ότου η αθροιστική κατανάλωση νερού έφτασε τα 8 l/φυτό περίπου, ενώ στη συνέχεια τις υποεκτιμούσε. Η μέση απόκλιση των προβλεπόμενων από το μοντέλο τιμών από τις μετρηθείσες τιμές ήταν 9,45%. Στη μεταχείριση με 3 mM NaCl το μοντέλο έτεινε να υπερεκτιμά τη συγκέντρωση του Cl⁻ στο περιβάλλον των ριζών καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων και η μέση απόκλιση ήταν 14,82%. Όταν η συγκέντρωση του NaCl στο νερό άρδευσης ήταν 6 και 9 mM η πρόβλεψη της πορείας της συσσώρευσης του Cl⁻ στο περιβάλλον των ριζών ήταν πιο ακριβής με μια μέση υπερεκτίμηση των προβλεπόμενων από το μοντέλο τιμών της τάξης του 4,54%, στην πρώτη περίπτωση και μια υποεκτίμηση της τάξης του 7,87% στη δεύτερη.



Σχήμα 3.7. Συγκέντρωση Cl^- στο περιβάλλον των ριζών συναρτήσει της αθροιστικής κατανάλωσης νερού από τα φυτά κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας φασολιού σε κλειστό υδροπονικό σύστημα σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης. Σε κάθε γράφημα οι συνεχείς γραμμές αντιστοιχούν στις προβλεπόμενες από το μοντέλο τιμές όταν η παράμετρος α' υπολογίστηκε με μη γραμμική ανάλυση της παλινδρόμησης με τη χρήση της εξίσωσης (6). Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στις προβλεπόμενες από το μοντέλο τιμές όταν η παράμετρος α' υπολογίστηκε με μη γραμμική ανάλυση της παλινδρόμησης με τη χρήση της εξίσωσης (12), ενώ τα σύμβολα υποδηλώνουν μετρηθείσες τιμές που δε χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της παραμέτρου α' .

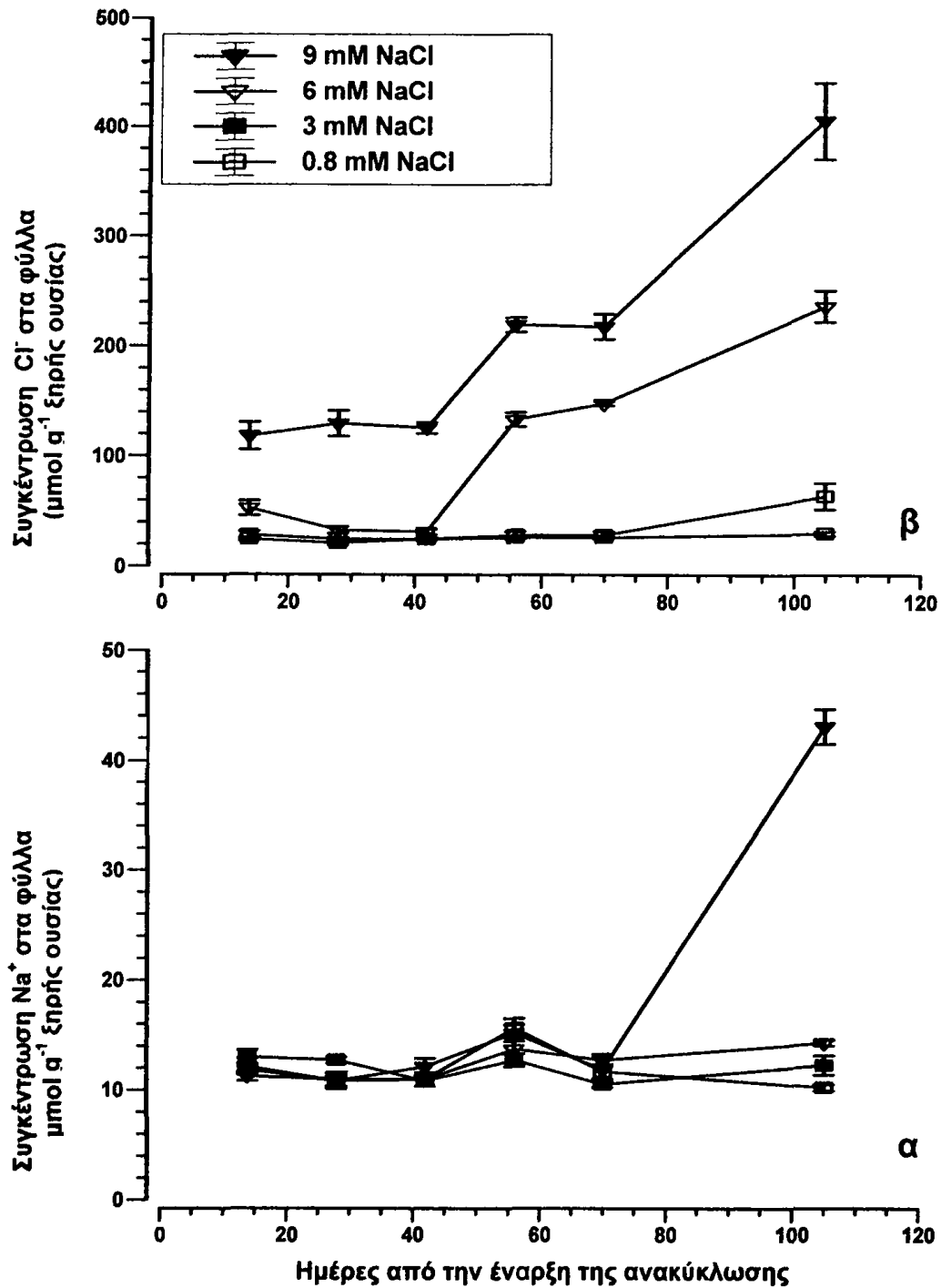
Στην περίπτωση που οι παράμετροι α' και b' υπολογίστηκαν με μη γραμμική ανάλυση της παλινδρόμησης μέσω της εξίσωσης (3.10) ("μηχανιστικό μοντέλο"), οι προβλέψεις του μοντέλου είναι πολύ κοντά σε αυτές που υπολογίστηκαν με την προηγούμενη μέθοδο στις μεταχειρίσεις με 0,8 και 6 mM NaCl στο νερό άρδευσης, ενώ διαφέρουν αρκετά στις άλλες δύο μεταχειρίσεις (Σχ. 3.7, διακεκομμένη γραμμή). Στη μεταχείριση με 0,8 mM NaCl στο νερό άρδευσης οι προβλεπόμενες τιμές του Cl^- απέκλιναν από τις πραγματικές κατά μέσο όρο 8,75%. Στη μεταχείριση με 3 mM NaCl η μέση υπερεκτίμηση των τιμών του Cl^- από το μοντέλο ήταν, μετά την πρώτη μέτρηση, 21,24%, ενώ στη μεταχείριση με 6 mM NaCl ήταν 4,58%. Τέλος στη

μεταχείριση με 9 mM NaCl το μοντέλο έτεινε να υπερεκτιμά τη συγκέντρωση του Cl^- στο περιβάλλον των ριζών καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων και η μέση απόκλιση ήταν 10,89%.

3.6. Συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- στα φύλλα

Τα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης και η επακόλουθη συσσώρευση των ιόντων Na^+ και Cl^- στο περιβάλλον των ριζών δεν επιδρούν με τον ίδιο τρόπο στη συγκέντρωση των δύο ιόντων στα νεαρά φύλλα των φυτών. Οι συγκεντρώσεις του Na^+ στα φύλλα των φυτών όλων των μεταχειρίσεων παρέμειναν σχεδόν σταθερές μέχρι και την 5η δειγματοληψία (70η ημέρα από την έναρξη της ανακύκλωσης) (Σχ. 3.8.α). Επιπλέον σε καμία μεταχείριση δεν εμφανίστηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές κατά το παραπάνω χρονικό διάστημα. Αύξηση στις συγκεντρώσεις του Na^+ στα φύλλα των φυτών και σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων εμφανίστηκαν μόνο στην τελευταία δειγματοληψία. Ειδικότερα, στην τελευταία δειγματοληψία η συγκέντρωση του Na^+ στη μεταχείριση με 0,8 mM NaCl στο νερό άρδευσης (που ουσιαστικά παρέμεινε αμετάβλητη από την έναρξη του πειράματος) ήταν $11 \mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας, ενώ στις μεταχειρίσεις με 3 και 6 mM NaCl ήταν 12,5 και $14 \mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας αντίστοιχα. Τέλος στη μεταχείριση με 9 mM NaCl στο νερό άρδευσης καταγράφηκε η μεγαλύτερη συγκέντρωση Na^+ στα φύλλα, $43 \mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας.

Διαφορετική ήταν η εικόνα που παρουσίασε η πορεία της συγκέντρωσης του Cl^- στα φύλλα των φυτών (Σχ.3.8.β). Στη μεταχείριση με 0,8 mM NaCl στο νερό άρδευσης η συγκέντρωση του Cl^- παρέμεινε σχεδόν σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος ($25 \mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας). Στη μεταχείριση με 3 mM NaCl η συγκέντρωση παρέμεινε σταθερή και στα ίδια επίπεδα με αυτή της μεταχείρισης με 0,8 mM NaCl μέχρι και την 5η μέτρηση, ενώ αυξήθηκε σημαντικά στην τελευταία ($50 \mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας). Στη μεταχείριση με 6 mM NaCl η συγκέντρωση παρέμεινε σχετικά σταθερή και στα ίδια επίπεδα με των άλλων δύο μεταχειρίσεων στις τρεις πρώτες μετρήσεις, ενώ στη συνέχεια αυξάνεται δραματικά και φτάνει τελικά τα $235 \mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας. Τέλος στη μεταχείριση με 9 mM NaCl στο νερό άρδευσης η συγκέντρωση του Cl^- ήταν επίσης σταθερή στις τρεις πρώτες μετρήσεις, αλλά σε πολύ υψηλότερα επίπεδα από αυτά των άλλων τριών ($120 \mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας) και στη συνέχεια αυξήθηκε ακόμη περισσότερο για να φτάσει τελικά τα $400 \mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας.



Σχήμα 3.8. Συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- στα νεαρά φύλλα φυτών φασολιού που καλλιεργήθηκαν σε κλειστό υδροπονικό σύστημα σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης.

3.7. Συγκέντρωση K^+ , Ca^{2+} και Mg^{2+} στο περιβάλλον των ριζών

Κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας, τα ιόντα του K^+ , του Ca^{2+} και του Mg^{2+} παρουσίασαν τάσεις συσσώρευσης στο περιβάλλον των ριζών, όπως διαπιστώνεται από τις συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν στο διάλυμα απορροής. Το K^+ σε όλες τις μεταχειρίσεις (Σχ. 3.9) παρουσίασε τάση έντονης συσσώρευσης από την 13η ημέρα από την έναρξη του πειράματος έως και την 42η ημέρα (4η δειγματοληψία) όπου και μετρήθηκαν οι μέγιστες συγκεντρώσεις. Στη συνέχεια και αφού μειώθηκε η παροχή του K^+ στα νέα θρεπτικά διαλύματα, οι συγκεντρώσεις του ιόντος στα διαλύματα απορροής όλων των μεταχειρίσεων παρουσίασαν πτωτική τάση μέχρι το τέλος του πειράματος. Στατιστικά σημαντικές διαφορές παρουσιάστηκαν μεταξύ της μεταχείρισης με 0,8 mM NaCl στο νερό άρδευσης και των άλλων τριών μεταχειρίσεων από την 4η έως και την τελευταία (8η) μέτρηση. Οι μέγιστες τιμές που μετρήθηκαν (4η δειγματοληψία) ήταν 13,81 mmol l^{-1} στη μεταχείριση με 0,8 mM NaCl στο νερό άρδευσης, 15,52 mmol l^{-1} στη μεταχείριση με 3 mM NaCl, 15,82 mmol l^{-1} στη μεταχείριση με 6 mM NaCl και 15,86 mmol l^{-1} σε αυτή με 9 mM NaCl, ενώ οι τελικές τιμές ήταν 8,39, 11,18 13,2 και 12,48 mmol l^{-1} αντίστοιχα.

Οι συγκεντρώσεις του Ca^{2+} στο περιβάλλον των ριζών, σε όλες τις μεταχειρίσεις, (Σχ. 3.9) αυξάνονταν συνεχώς μετά την 13η ημέρα από την έναρξη του πειράματος. Η αύξηση των επιπέδων Ca^{2+} στο διάλυμα απορροής συνεχίστηκε μέχρι το τέλος του πειράματος οπότε μετρήθηκαν οι μέγιστες τιμές (16,43 mmol l^{-1} στη μεταχείριση με 0,8 mM NaCl στο νερό άρδευσης, 17,02 mmol l^{-1} στη μεταχείριση με 3 mM NaCl, 15,83 mmol l^{-1} σε αυτή με 6 mM NaCl και 13,93 mmol l^{-1} στη μεταχείριση με 9 mM NaCl). Στατιστικά σημαντική διαφορά εμφανίστηκε μόνο στην τελευταία μέτρηση μεταξύ της μεταχείρισης με 9 mM NaCl και των άλλων τριών.

Τέλος και το ιόν του Mg^{2+} παρουσίασε τάση συσσώρευσης στο περιβάλλον των ριζών από τη 2η μέτρηση και μετά, σε όλες τις μεταχειρίσεις (Σχ. 3.9). Σε αντίθεση με το K^+ , η συσσώρευση του Mg^{2+} συνεχίστηκε μέχρι την 84η ημέρα από την έναρξη του πειράματος, παρά τη μείωση της παροχής Mg^{2+} στα νέα θρεπτικά διαλύματα από την 42η ημέρα και έπειτα (από αυτό το χρονικό σημείο η παροχή του στοιχείου στα θρεπτικά διαλύματα γίνονταν μόνο μέσω του Mg^{2+} που περιείχε το νερό άρδευσης). Οι μέγιστες τιμές

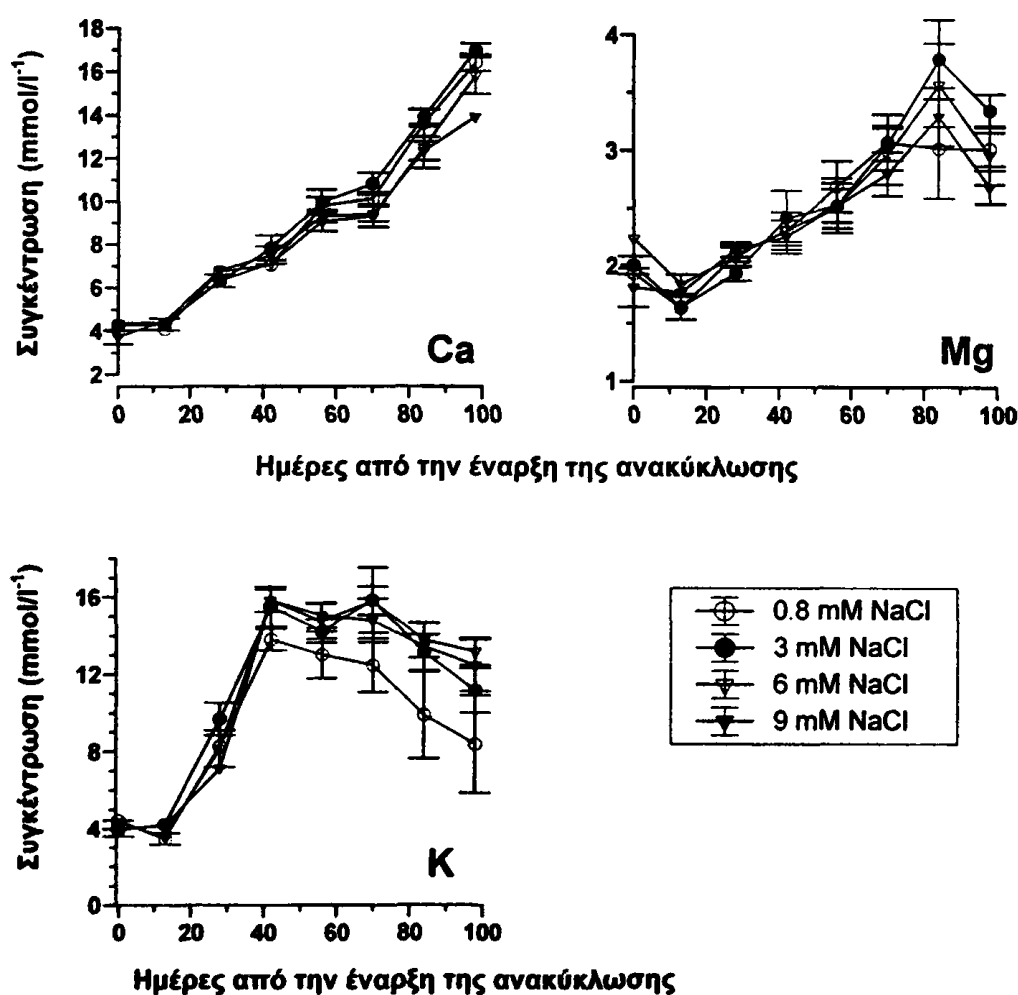
3.7. Συγκέντρωση K^+ , Ca^{2+} και Mg^{2+} στο περιβάλλον των ριζών

Κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας, τα ιόντα του K^+ , του Ca^{2+} και του Mg^{2+} παρουσίασαν τάσεις συσσώρευσης στο περιβάλλον των ριζών, όπως διαπιστώνεται από τις συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν στο διάλυμα απορροής. Το K^+ σε όλες τις μεταχειρίσεις (Σχ. 3.9) παρουσίασε τάση έντονης συσσώρευσης από την 13η ημέρα από την έναρξη του πειράματος έως και την 42η ημέρα (4η δειγματοληψία) όπου και μετρήθηκαν οι μέγιστες συγκεντρώσεις. Στη συνέχεια και αφού μειώθηκε η παροχή του K^+ στα νέα θρεπτικά διαλύματα, οι συγκεντρώσεις του ιόντος στα διαλύματα απορροής όλων των μεταχειρίσεων παρουσίασαν πτωτική τάση μέχρι το τέλος του πειράματος. Στατιστικά σημαντικές διαφορές παρουσιάστηκαν μεταξύ της μεταχείρισης με 0,8 mM NaCl στο νερό άρδευσης και των άλλων τριών μεταχειρίσεων από την 4η έως και την τελευταία (8η) μέτρηση. Οι μέγιστες τιμές που μετρήθηκαν (4η δειγματοληψία) ήταν 13,81 mmol l⁻¹ στη μεταχείριση με 0,8 mM NaCl στο νερό άρδευσης, 15,52 mmol l⁻¹ στη μεταχείριση με 3 mM NaCl, 15,82 mmol l⁻¹ στη μεταχείριση με 6 mM NaCl και 15,86 mmol l⁻¹ σε αυτή με 9 mM NaCl, ενώ οι τελικές τιμές ήταν 8,39, 11,18 13,2 και 12,48 mmol l⁻¹ αντίστοιχα.

Οι συγκεντρώσεις του Ca^{2+} στο περιβάλλον των ριζών, σε όλες τις μεταχειρίσεις, (Σχ. 3.9) αυξάνονταν συνεχώς μετά την 13η ημέρα από την έναρξη του πειράματος. Η αύξηση των επιπέδων Ca^{2+} στο διάλυμα απορροής συνεχίστηκε μέχρι το τέλος του πειράματος οπότε μετρήθηκαν οι μέγιστες τιμές (16,43 mmol l⁻¹ στη μεταχείριση με 0,8 mM NaCl στο νερό άρδευσης, 17,02 mmol l⁻¹ στη μεταχείριση με 3 mM NaCl, 15,83 mmol l⁻¹ σε αυτή με 6 mM NaCl και 13,93 mmol l⁻¹ στη μεταχείριση με 9 mM NaCl). Στατιστικά σημαντική διαφορά εμφανίστηκε μόνο στην τελευταία μέτρηση μεταξύ της μεταχείρισης με 9 mM NaCl και των άλλων τριών.

Τέλος και το ιόν του Mg^{2+} παρουσίασε τάση συσσώρευσης στο περιβάλλον των ριζών από τη 2η μέτρηση και μετά, σε όλες τις μεταχειρίσεις (Σχ. 3.9). Σε αντίθεση με το K^+ , η συσσώρευση του Mg^{2+} συνεχίστηκε μέχρι την 84η ημέρα από την έναρξη του πειράματος, παρά τη μείωση της παροχής Mg^{2+} στα νέα θρεπτικά διαλύματα από την 42η ημέρα και έπειτα (από αυτό το χρονικό σημείο η παροχή του στοιχείου στα θρεπτικά διαλύματα γίνονταν μόνο μέσω του Mg^{2+} που περιείχε το νερό άρδευσης). Οι μέγιστες τιμές

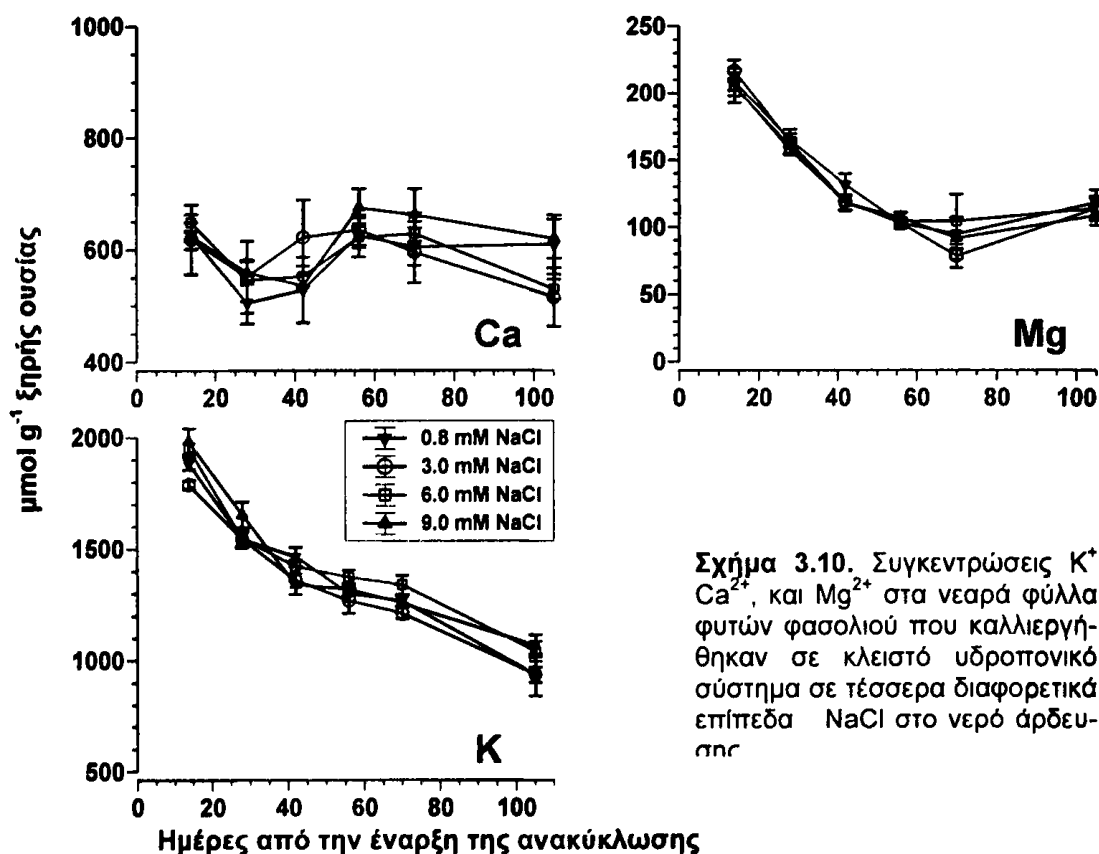
συγκέντρωσης Mg^{2+} μετρήθηκαν στην προτελευταία δειγματοληψία (7η) και ήταν $3,02 \text{ mmol l}^{-1}$ στη μεταχείριση με $0,8 \text{ mM NaCl}$ στο νερό άρδευσης, $3,79 \text{ mmol l}^{-1}$ στη μεταχείριση με 3 mM NaCl , $3,57 \text{ mmol l}^{-1}$ στη μεταχείριση με 6 mM NaCl και $3,29 \text{ mmol l}^{-1}$ σε αυτή με 9 mM NaCl , ενώ στην τελευταία μέτρηση οι τιμές παρουσίασαν μικρή πτώση και ήταν $3,02$, $3,35$, $2,96$ και $2,69 \text{ mmol l}^{-1}$ αντίστοιχα. Συστηματικές στατιστικά σημαντικές διαφορές δεν εμφανίστηκαν μεταξύ των μεταχειρίσεων.



Σχήμα 3.9. Συγκεντρώσεις K^+ , Ca^{2+} , και Mg^{2+} στο διάλυμα απορροής καλλιέργειας φασολιού σε κλειστό υδροπονικό σύστημα σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα $NaCl$ στο νερό άρδευσης.

3.8. Συγκεντρώσεις K^+ , Ca^{2+} και Mg^{2+} στα φύλλα

Οι συγκεντρώσεις Ca^{2+} , K^+ και Mg^{2+} στα νεαρά φύλλα φασολιού δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων σε συστηματική βάση παρά μόνο σε ορισμένες μεμονωμένες δειγματοληψίες. Για το K^+ (Σχ. 3.10), οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις μετρήθηκαν στην πρώτη δειγματοληψία (από 1790 $\mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας στη μεταχείριση με 3 mM NaCl έως 2000 $\mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας στη μεταχείριση με 9 mM NaCl). Στη συνέχεια ακολούθησαν φθίνουσα πορεία ως το τέλος του πειράματος, οπότε μετρήθηκαν οι μικρότερες συγκεντρώσεις (από 930 $\mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας στις μεταχειρίσεις με 0,8 και 3 mM NaCl έως 1100 $\mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας στη μεταχείριση με 9 mM NaCl).



Σχήμα 3.10. Συγκεντρώσεις K^+ , Ca^{2+} , και Mg^{2+} στα νεαρά φύλλα φυτών φασολιού που καλλιεργήθηκαν σε κλειστό υδροπονικό σύστημα σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης

Οι συγκεντρώσεις Ca^{2+} (Σχ. 3.10) παρουσίασαν μικρές αυξομειώσεις κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας. Ειδικότερα, οι μικρότερες τιμές καταγράφηκαν στη δεύτερη δειγματοληψία (από 510 $\mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας στη μεταχείριση με 0,8 mM NaCl στο νερό άρδευσης έως 560 $\mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας στη μεταχείριση με 9 mM NaCl) ενώ οι μεγαλύτερες στην τέταρτη (από 630 $\mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας στη μεταχείριση με 0,8 mM NaCl έως 630 $\mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας στη μεταχείριση με 9 mM NaCl).

g^{-1} ξηρής ουσίας στη μεταχείριση με 6 mM NaCl έως 675 $\mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας στη μεταχείριση με 9 mM NaCl).

Οι συγκεντρώσεις του Mg^{2+} (Σχ. 3.10) ακολούθησαν επίσης φθίνουσα πορεία στη διάρκεια της καλλιέργειας μέχρι την πέμπτη μέτρηση, ενώ στη συνέχεια εμφάνισαν μικρή άνοδο. Έτσι, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις καταγράφηκαν στην πρώτη μέτρηση (από 202 $\mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας στη μεταχείριση με 9 mM NaCl στο νερό άρδευσης έως 218 $\mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας στη μεταχείριση με 3 mM NaCl) και οι μικρότερες στην πέμπτη (από 80 $\mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας στη μεταχείριση με 3 mM NaCl στο νερό άρδευσης έως 103 $\mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας στη μεταχείριση με 6 mM NaCl). Στην τελευταία δειγματοληψία οι συγκεντρώσεις του Mg^{2+} στα νεαρά φύλλα κυμαίνονταν από 108 έως 120 $\mu\text{mol g}^{-1}$ ξηρής ουσίας.

3.9. Βλαστική ανάπτυξη φυτών

Το νωπό και το ξηρό βάρος των υπέργειων τμημάτων του φασολιού (Σχ. 3.11) διαφοροποιήθηκαν μεταξύ των μεταχειρίσεων, με το πέρασμα του χρόνου και τη σταδιακή αύξηση της συσσώρευσης των ιόντων Na^+ και Cl^- στο περιβάλλον των ριζών. Η μεγαλύτερη αλατότητα στο νερό άρδευσης και συνεπώς η μεγαλύτερη συγκέντρωση ιόντων στο διάλυμα απορροής οδήγησε σε μείωση τόσο νωπού όσο και ξηρού βάρους.

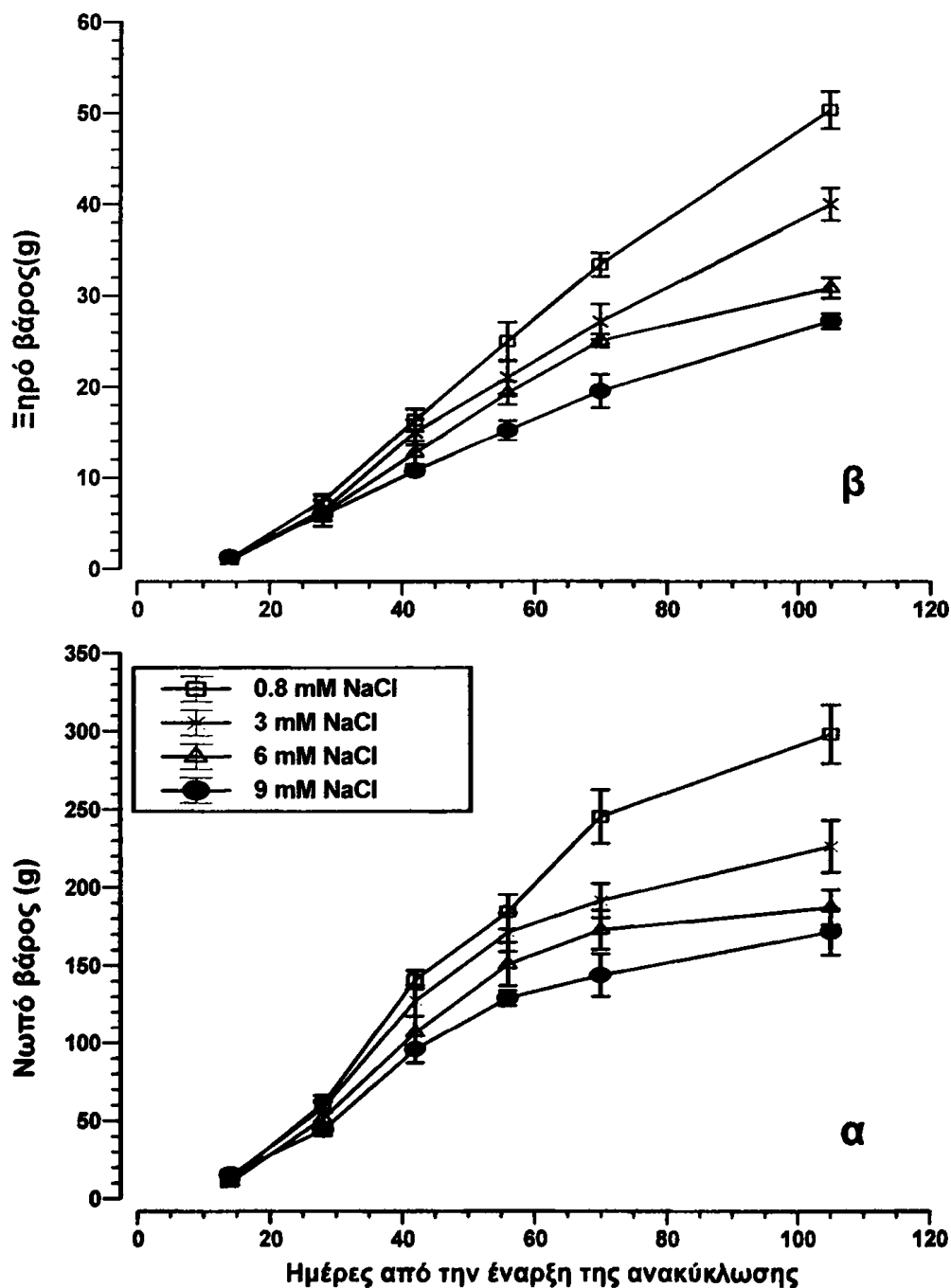
Η διαφοροποίηση στις τιμές του νωπού βάρους των φυτών (Σχ. 3.11.α) μεταξύ των μεταχειρίσεων εμφανίστηκε από τη δεύτερη μέτρηση (28η ημέρα από την έναρξη της ανακύκλωσης). Στατιστικά σημαντικές διαφορές όμως παρουσιάσθηκαν από την τέταρτη ημερομηνία δειγματοληψίας (56η ημέρα από τη αρχή του πειράματος) και μετά. Έτσι, οι τιμές του νωπού βάρους των φυτών στην μεταχείριση με 0,8 mM NaCl στο νερό άρδευσης διαφέρουν σημαντικά από όλες τις υπόλοιπες στις δύο τελευταίες μετρήσεις, ενώ οι τιμές στις μεταχειρίσεις με τη μέση αλατότητα (3 και 6 mM NaCl) διαφέρουν από τη μεταχείριση με 9 mM NaCl, στις τρεις τελευταίες μετρήσεις και μεταξύ τους μόνο στην τελευταία μέτρηση.

Οι τελικές τιμές νωπού βάρους που μετρήθηκαν ήταν 300 g/φυτό στη μεταχείριση με την πιο χαμηλή αλατότητα, 228 g/φυτό στη μεταχείριση με 3 mM NaCl, 189 g/φυτό σε αυτή με 6 mM NaCl και 171 g/φυτό στη μεταχείριση με 9 mM NaCl στο νερό άρδευσης. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε μείωση του νωπού βάρους σε σχέση με το μάρτυρα κατά 24%, 37% και 43%.

Οι τιμές του ξηρού βάρους, των υπέργειων τμημάτων των φυτών φασολιού (Σχ. 3.11.β), άρχισαν να διαφοροποιούνται, μεταξύ των μεταχειρίσεων από την τρίτη δειγματοληψία. Το ξηρό βάρος των φυτών που εκτέθηκαν στο πλέον υψηλό επίπεδο αλατότητας ήταν σημαντικά χαμηλότερο από αυτό των υπολοίπων μεταχειρίσεων αλατότητας κατά την 56η, την 70η και την 105η ημέρα από την έναρξη της ανακύκλωσης. Στη μεταχείριση με 0,8 mM NaCl το ξηρό βάρος κατά την 5η και 6η δειγματοληψία ήταν σημαντικά υψηλότερο σε σύγκριση με αυτό που μετρήθηκε όταν η συγκέντρωση NaCl στο νερό άρδευσης ήταν 3 ή 6 mM, ενώ μεταξύ των δύο τελευταίων το ξηρό βάρος διέφερε μόνο κατά την τελευταία δειγματοληψία.

Το ξηρό βάρος ανά φυτό στο τέλος της καλλιέργειας ήταν 50 g στη μεταχείριση με τη μικρότερη συγκέντρωση NaCl στο νερό άρδευσης, 39,5 g

στη μεταχείριση με 3 mM NaCl, 30,5 g σε αυτή με 6 mM NaCl και 28 g στη μεταχείριση με 9 mM NaCl. Σε ποσοστιαία βάση, τα ξηρά βάρη στις μεταχειρίσεις με αυξημένη αλατότητα ήταν μικρότερα κατά 21%, 39% και 44% αντίστοιχα σε σύγκριση με το μάρτυρα.



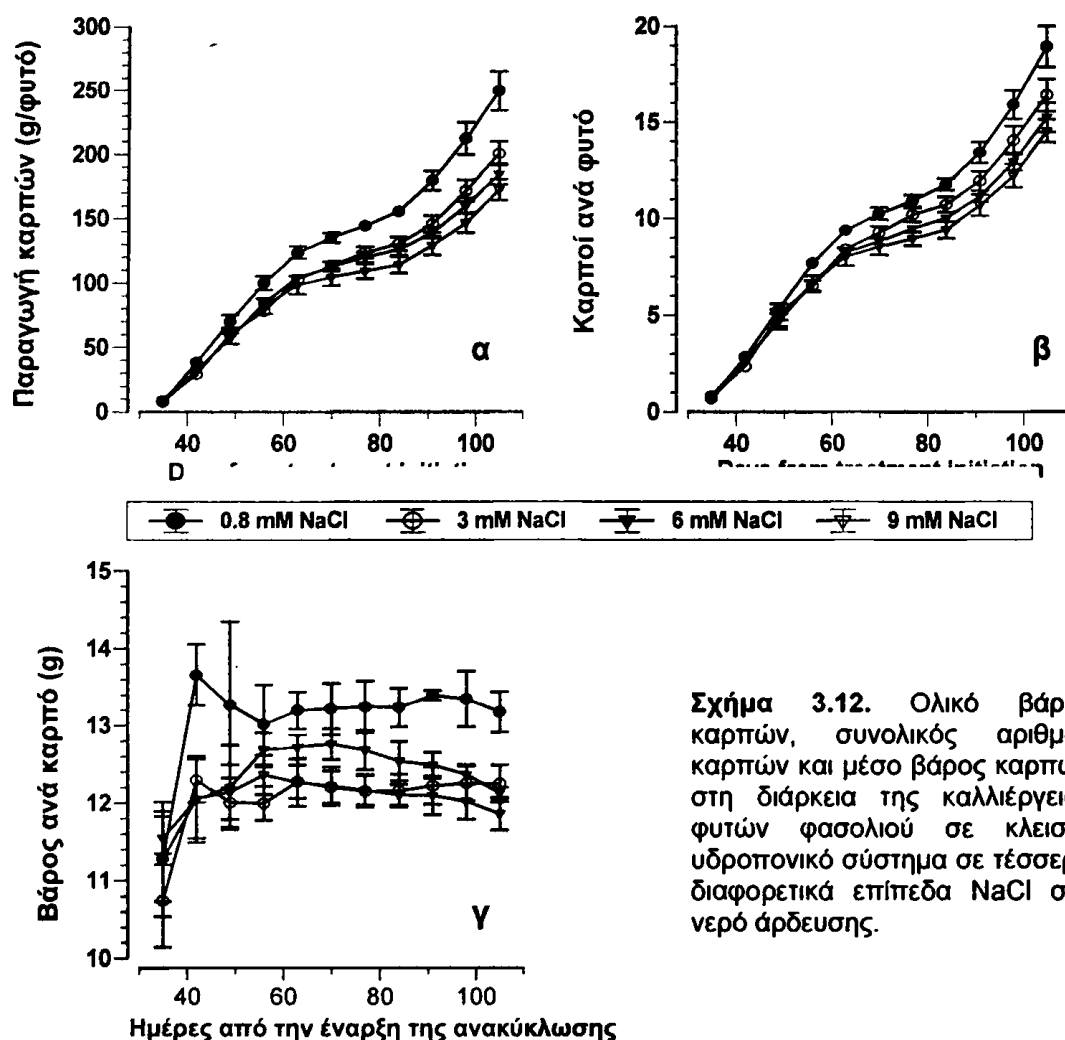
Σχήμα 3.11. Νωπό και ξηρό βάρος υπέργειων τμημάτων φυτών φασολιού που καλλιεργήθηκαν σε κλειστό υδροπονικό σύστημα σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης.

3.10. Παραγωγή καρπών

Στο Σχήμα 3.12 παρουσιάζονται η συνολική παραγωγή καρπών ανά φυτό, ο συνολικός αριθμός καρπών ανά φυτό και το μέσο βάρος των καρπών καθώς αυξάνεται η συσσώρευση των ιόντων Na^+ και Cl^- στο περιβάλλον των ριζών, ανά εβδομάδα καλλιέργειας. Σε γενικές γραμμές, το συνολικό βάρος (g) των καρπών ανά φυτό ήταν αντιστρόφως ανάλογο της συγκέντρωσης του NaCl στο νερό άρδευσης (Σχ. 3.12.α). Ειδικότερα, το συνολικό βάρος των καρπών ανά φυτό στη μεταχείριση με τη μικρότερη συγκέντρωση NaCl στο νερό άρδευσης ήταν 249,2 g, ενώ στις μεταχειρίσεις με 3, 6 και 9 mM NaCl το συνολικό βάρος των καρπών μειώθηκε στα 200,2, 184,3 και 172,1 g/φυτό αντίστοιχα. Σε ποσοστιαία βάση η μείωση ανήλθε σε 19,8%, 26,1% και 31,0% στις μεταχειρίσεις με 3, 6 και 9 mM NaCl αντίστοιχα, σε σύγκριση με το επίπεδο των 0,8 mM NaCl . Στατιστικά σημαντικές διαφορές εμφανίζονται μεταξύ της μεταχείρισης με τη μικρότερη συγκέντρωση NaCl στο νερό άρδευσης και των υπολοίπων από τη 3η εβδομάδα μετά την έναρξη της συγκομιδής (7η από την αρχή του πειράματος), ενώ το εύρος τους αυξάνεται με το πέρασμα του χρόνου. Μεταξύ των τριών άλλων μεταχειρίσεων σημαντικές διαφορές εμφανίζονται μόνο μεταξύ αυτής με 3 και αυτής με 9 mM NaCl , από την 6η εβδομάδα μετά την έναρξη της συγκομιδής. Σε όλες τις μεταχειρίσεις από την 9η έως την 12η εβδομάδα από την έναρξη της ανακύκλωσης παρατηρήθηκε μείωση της παραγωγής.

Ο αριθμός των καρπών ανά φυτό παρουσιάζει εικόνα παρόμοια με αυτή του βάρους των καρπών (Σχ. 3.12.β) και εμφανίζεται μεγαλύτερος όσο μικρότερη είναι η συγκέντρωση του NaCl στο νερό άρδευσης. Στη μεταχείριση με τη μικρότερη συγκέντρωση NaCl στο νερό άρδευσης ο συνολικός αριθμός καρπών/φυτό ήταν 18,9, ενώ στις μεταχειρίσεις με 3, 6 και 9 mM NaCl οι καρποί ανά φυτό μειώθηκαν στους 16,4 (13,4%), 15,2 (19,6%) και 14,5 (23,3%) αντίστοιχα. Στατιστικά σημαντικές διαφορές υπήρχαν μεταξύ της πρώτης μεταχείρισης και των υπολοίπων (από την τέταρτη εβδομάδα μετά την έναρξη της συγκομιδής), μεταξύ των μεταχειρίσεων με 3 και 6 mM NaCl (στην 7η, 8η και 9η εβδομάδα συγκομιδής) και μεταξύ αυτών με 3 mM NaCl και 9 mM NaCl από τη 7η εβδομάδα και μετά.

Τέλος, το μέσο βάρος των καρπών (Σχ. 3.12.γ) στις μεταχειρίσεις με 0,8, 3 και 9 mM NaCl στο νερό άρδευσης αυξήθηκε μεταξύ της πρώτης και της



Σχήμα 3.12. Ολικό βάρος καρπών, συνολικός αριθμός καρπών και μέσο βάρος καρπών στη διάρκεια της καλλιέργειας φυτών φασολιού σε κλειστό υδροπονικό σύστημα σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης.

δεύτερης εβδομάδας συγκομιδής, ενώ στη συνέχεια παρέμεινε σταθερό με μικρές διακυμάνσεις. Οι μεγαλύτερες τιμές του μέσου βάρους μετρήθηκαν στη μεταχείριση με τη μικρότερη συγκέντρωση NaCl στο νερό άρδευσης ($13,11 \pm 1,82 \pm 0,57$ g/καρπό). Οι παραπάνω τιμές διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά από τις τιμές που μετρήθηκαν στις υπόλοιπες τρεις μεταχειρίσεις από την πέμπτη εβδομάδα συγκομιδής και μετά. Τις αμέσως μικρότερες τιμές μέσου βάρους είχε η μεταχείριση με 6 mM NaCl ($12,38 \pm 0,84 \pm 0,37$ g/καρπό, μείωση 7,62%) με σημαντικές διαφορές από τις μεταχειρίσεις με 3 και 9 mM NaCl στην 6η και 7η εβδομάδα συγκομιδής. Στις δύο τελευταίες μεταχειρίσεις μετρήθηκαν οι μικρότερες τιμές ($12,05 \pm 1,31 \pm 0,24$ g/καρπό, μείωση 8,31%, για την μεταχείριση με 3 mM NaCl και $12,03 \pm 1,03 \pm 0,33$ g/καρπό, μείωση 11,19%, σε αυτή με 9 mM NaCl), χωρίς να υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.

Με την αύξηση της EC από $4,55 \text{ dS m}^{-1}$ (μέση τιμή μεταχείρισης με $0,8 \text{ mM NaCl}$ στο γερó άρδευσης) σε $6,40 \text{ dS m}^{-1}$ (μέση τιμή μεταχείρισης με 3 mM NaCl) η μείωση της παραγωγής ήταν $10,07\%$ ανά dS m^{-1} . Η αύξηση της EC από τα $6,4 \text{ dS m}^{-1}$ σε 8 dS m^{-1} (μέση τιμή μεταχείρισης με 6 mM NaCl) είχε σαν αποτέλεσμα μείωση της παραγωγής κατά $4,5\%$ ανά dS m^{-1} , ενώ τέλος η αύξηση της EC σε $8,85 \text{ dS m}^{-1}$ (μέση τιμή μεταχείρισης με 9 mM NaCl) μείωσε την παραγωγή κατά $5,77\%$ ανά μονάδα αύξησης της EC στο περιβάλλον των ριζών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1. Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Η αύξηση της EC είναι συνηθισμένο φαινόμενο στα κλειστά υδροπονικά συστήματα και οφείλεται στη συσσώρευση ιόντων που περιέχονται στο νερό άρδευσης σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από την αναλογία ιόντος/νερό με την οποία απορροφώνται από τα φυτά (Sonneveld et al., 1999a, Carmassi et al., 2005, Savvas et al., 2005 a). Τα ιόντα που κυρίως συσσωρεύονται στα κλειστά υδροπονικά συστήματα είναι το Na^+ και το Cl^- , ενώ σε μικρότερο βαθμό υπεύθυνα για την αύξηση της EC μπορούν να είναι και τα ιόντα Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} και HCO_3^- (Σάββας, 2001).

Η συσσώρευση των ιόντων είναι αποτέλεσμα των μηχανισμών άμυνας που έχουν αναπτύξει τα γλυκόφυτα ενάντια στην αλατότητα και οι οποίοι συνίστανται στον έλεγχο της εισόδου των ιόντων στο εσωτερικό της ρίζας και τον ενεργό αποκλεισμό αυτών που δεν είναι χρήσιμα για την θρέψη του φυτού από τους αγωγούς ιστούς (κύτταρα ενδοδερμίδας - ταινία Κάσπαρι) και στην ενεργό εξαγωγή τους στο εξωτερικό διάλυμα (Greenway and Munns 1980, Κωνσταντινίδου, 2003). Με την άνοδο της συγκέντρωσης των ιόντων στο περιβάλλον των ριζών η περατότητα των κυτταρικών μεμβρανών αυξάνεται και η αποτελεσματικότητα των μηχανισμών άμυνας μειώνεται, με αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού εισόδου των ιόντων στα κύτταρα των φυτών (Sonneveld et al., 1999a, Savvas et al., 2005 a).

Συνεπώς, η συσσώρευση των ιόντων στο διάλυμα απορροής και άρα η EC, αυξάνεται όσο η αναλογία ιόν/νερό για κάποια ιόντα που εισέρχονται στο κλειστό σύστημα μέσω του νερού άρδευσης είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης αναλογίας απορρόφησής τους από τα φυτά. Αυτό σημαίνει ότι η EC σταθεροποιείται όταν οι δύο παραπάνω αναλογίες εξισωθούν για όλα τα ιόντα που εισέρχονται στο κλειστό υδροπονικό σύστημα μέσω νωπού θρεπτικού διαλύματος. Οι μέγιστες τιμές της EC, στις οποίες επέρχεται η σταθεροποίηση εξαρτώνται από τη συγκέντρωση του NaCl στο νερό άρδευσης. Η παραπάνω θεώρηση συμφωνεί με τα αποτελέσματα του πειράματος (Σχ. 3.1), ενώ παρόμοια αποτελέσματα αναφέρουν και οι Savvas et al. (2004) σε καλλιέργεια αγγουριού σε κλειστό υδροπονικό σύστημα.

Σύμφωνα με τους Maas and Hoffman (1977) και Maas (1986) το φασόλι είναι φυτό ευαίσθητο στην αλατότητα και η ανώτατη επιτρεπτή αλατότητα είναι 1 dS m^{-1} , μετρημένη σε εδαφικό εκχύλισμα κορεσμού η οποία αντιστοιχεί σε $1,6 \text{ dS m}^{-1}$ περίπου στο εδαφικό διάλυμα (Sonneveld et al., 1990). Συνεπώς οι μέγιστες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας που μετρήθηκαν σε όλες τις μεταχειρίσεις στο παρόν πείραμα (από $4,6 \text{ dS m}^{-1}$ στη μεταχείριση με $0,8 \text{ mM NaCl}$ στο νερό άρδευσης έως $9,6 \text{ dS m}^{-1}$ στη μεταχείριση με 9 mM NaCl) ήταν υψηλές και συνεπώς προκάλεσαν αλατούχο καταπόνηση στα φυτά. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι, για να μην προκαλούνται προβλήματα συσσώρευσης αλάτων σε καλλιέργειες φασολιού σε κλειστά υδροπονικά συστήματα, η συγκέντρωση NaCl στο νερό άρδευσης θα πρέπει να είναι σχεδόν μηδενική.

4.2. Συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- στο περιβάλλον των ριζών

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η αύξηση της EC που παρατηρήθηκε στο διάλυμα απορροής οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην συσσώρευση των ιόντων Na^+ και Cl^- . Πράγματι, όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.2 και 3.3 η αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων αυτών στο διάλυμα απορροής, ακολουθεί το ίδιο πρότυπο με την αύξηση της EC. Προφανώς η αύξηση της συγκέντρωσης Na^+ και Cl^- στο διάλυμα απορροής οφείλεται στην διαφορά μεταξύ της αναλογίας NaCl/νερό κατά την είσοδό τους στο σύστημα (συγκέντρωση NaCl στο νερό άρδευσης) και της αναλογίας απορρόφησης Na/νερό και Cl/νερό . Ανάλογα αποτελέσματα κατέγραψαν και οι Savvas et al. (2005a) σε καλλιέργεια αγγουριού σε κλειστό υδροπονικό σύστημα, ενώ οι Silberbush and Ben-Asher (2001) και οι Silberbush et al. (2005) προβλέπουν παρόμοια αύξηση της συσσώρευσης για το ιόν του Na βασισμένοι σε μελέτες προσομοίωσης με μαθηματικά μοντέλα.

Στο περιγραφόμενο πείραμα, σε όλες τις μεταχειρίσεις, η σταθεροποίηση της συσσώρευσης του Na^+ στο διάλυμα απορροής επήλθε αργότερα χρονικά και σε υψηλότερα επίπεδα από τη σταθεροποίηση της συγκέντρωσης του Cl^- (Σχ. 3.2 και 3.3). Αυτό υποδηλώνει ότι το φασόλι αποκλείει με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα από το εσωτερικό των κυττάρων του τα ιόντα Na^+ από αυτά του Cl^- .

4.3. Κατανάλωση νερού

Με την αύξηση της συγκέντρωσης του NaCl στο νερό άρδευσης η κατανάλωση νερού από τα φυτά μειώθηκε (Σχ. 3.4). Το φαινόμενο αυτό έχει περιγραφεί στο παρελθόν και από άλλους συγγραφείς για διάφορα φυτά, μεταξύ των οποίων από τους Meiri and Poljiakoff-Mayber (1970) για το φασόλι, τους Sonneveld and Van Der Burg (1991) για την τομάτα, την πιπεριά και το αγγούρι και τους Savvas et al. (2005b) για το αγγούρι. Η μείωση της κατανάλωσης νερού σε συνθήκες αυξημένης εξωτερικής αλατότητας αποδίδεται στη μείωση της διαπνοής των φυτών. αφενός μεν λόγω μερικού κλεισίματος των στοματίων τους και αφετέρου λόγω περιορισμού της έκτασης της φυλλικής τους επιφάνειας. Ειδικά για το φασόλι, είναι διαπιστωμένο ότι η αλατότητα μειώνει την κατανάλωση νερού ανά φυτό τόσο λόγω μείωσης της συνολικής διαπνέουσας επιφάνειας (μείωση του αριθμού και του μεγέθους των φύλλων, αλλά και της έκπτυξης νέων φύλλων) όσο και λόγω μείωσης της αγωγιμότητας των στοματίων του (Meiri and Poljiakoff-Mayber, 1970, Seeman and Critchley, 1985, Brugnoli and Lauteri, 1991, Lopez et al., 2002).

Η ελάττωση της συνολικής διαπνέουσας επιφάνειας και της αγωγιμότητας των στομάτων αναφέρεται επίσης, ως αποτέλεσμα υψηλής αλατότητας και από άλλους ερευνητές για διάφορα φυτά και ειδικότερα από τον Chartzoulakis (1994) στο αγγούρι, τους Li and Stanghellini (2001) στην τομάτα, τους Saied et al. (2003 και 2005) στη φράουλα, τους Lycoskoufis et al. (2005) στην πιπεριά, κ.λ.π..

4.4. Αναλογίες απορρόφησης Na/νερό και Cl/νερό

Όπως διαπιστώθηκε στην παρούσα εργασία, η σχέση μεταξύ της αναλογίας απορρόφησης ιόντος/νερό από το φασόλι και της συγκέντρωσης του αντίστοιχου ιόντος στο περιβάλλον των ριζών είναι μη γραμμική για το Na⁺ και γραμμική για το Cl⁻. Επιπλέον, φαίνεται ότι το Cl⁻ γενικά απορροφάται από το φασόλι με πιο γρήγορους ρυθμούς από ό,τι το Na⁺ (Σχ. 3.5). Αυτά τα αποτελέσματα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω (βλ. 4.2), υποδηλώνουν ότι το φασόλι αποκλείει πιο αποτελεσματικά το Na⁺ σε σύγκριση με το Cl⁻ από το εσωτερικό των κυττάρων του.

Οι αναλογίες απορρόφησης Na/νερό και Cl/νερό έχουν υπολογιστεί για την τομάτα, την πιπεριά και το αγγούρι όταν οι εξωτερικές συγκεντρώσεις NaCl



ανερχόταν σε <5, 12.5 και 25 mM (Sonneveld and Van Der Burg, 1991). Επιπλέον, οι (Sonneveld et al., 1999a) και (Savvas et al., 2005a) υπολόγισαν για διάφορα καλλωπιστικά φυτά και για το αγγούρι αντίστοιχα, εμπειρικές μαθηματικές σχέσεις οι οποίες συνδέουν τις αναλογίες απορρόφησης Na/νερό και Cl/νερό με τις εξωτερικές συγκεντρώσεις NaCl για ένα μεγάλο εύρος εξωτερικών συγκεντρώσεων Na^+ και Cl^- . Από τις παραπάνω εργασίες φαίνεται ότι η γραμμικότητα ή μη της σχέσης μεταξύ της αναλογίας απορρόφησης και της εξωτερικής συγκέντρωσης του Na και του Cl εξαρτάται κυρίως από το είδος του φυτού. Το Cl^- , όπως και στην καλλιέργεια του φασολιού, απορροφάται συνήθως πιο έντονα από το Na^+ με εξαίρεση το λίλιο (*Lilium* sp.) και το aster. Ειδικά για το αγγούρι, αυτό συμβαίνει όταν οι εξωτερικές συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- είναι μεγαλύτερες από 35 mM. Τέλος, το φασόλι, σε σχέση με τα παραπάνω φυτά, παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλη διαφορά μεταξύ αναλογίας απορρόφησης Na^+ και Cl^- και στο σημείο αυτό μπορεί να συγκριθεί μόνο με τη ζέρμπερα.

4.5. Μοντέλο συσχέτισης συσσώρευσης Na^+ και Cl^- με κατανάλωση νερού

Η πρόβλεψη της συσσώρευσης του Na^+ στο περιβάλλον των ριζών σε σχέση με την κατανάλωση νερού από τα φυτά μέσω της εξίσωσης (3.8) είναι αρκετά ακριβής (Σχ. 3.6). Η μέση απόκλιση των προβλεπόμενων τιμών από τις πραγματικές ήταν γύρω στο 10%. Ακόμη και στη μεταχείριση με 6 mM NaCl στο νερό άρδευσης, που η απόκλιση του μοντέλου ξεπερνά το 13%, η μέση διαφορά σε απόλυτες τιμές ήταν 3,4 mM Na^+ , τιμή αποδεκτή για υδροπονικά συστήματα που εφαρμόζονται στην πράξη για παραγωγικούς σκοπούς.

Η πρόβλεψη της συσσώρευσης του Cl^- στο περιβάλλον των ριζών μέσω της εξίσωσης (3.12), όταν η παράμετρος a' υπολογίστηκε εμπειρικά μέσω της εξίσωσης (3.4), είναι πιο ακριβής από αυτή του Na^+ , στις μεταχειρίσεις με 6 και 9 mM NaCl (Σχ. 3.7). Η μεγαλύτερη ποσοστιαία απόκλιση (14,82%) εμφανίζεται στη μεταχείριση με 3 mM NaCl στο νερό άρδευσης, η οποία αντιστοιχεί σε μια μέση διαφορά σε απόλυτες τιμές 1,39 mM Cl^- .

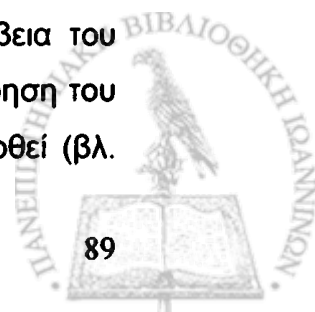
Όταν οι παράμετροι a' και b' υπολογίστηκαν με μη γραμμική ανάλυση της παλινδρόμησης μέσω της εξίσωσης (3.10), η πρόβλεψη της συσσώρευσης

του Cl^- στο περιβάλλον των ριζών είναι πολύ κοντά στην πρόβλεψη που έγινε με το εμπειρικό μοντέλο στις μεταχειρίσεις με 0,8 και 6 mM NaCl στο νερό άρδευσης, ενώ παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις στις άλλες δύο μεταχειρίσεις. Η μεγαλύτερη μέση απόκλιση εμφανίζεται στη μεταχείριση με 3mM NaCl (21,24%), η οποία όμως αντιστοιχεί σε μόλις 2,12 mM Cl^- σε απόλυτες τιμές. Φαίνεται ότι ο υπολογισμός μιας μοναδικής παραμέτρου α' για ένα μεγάλο εύρος εξωτερικών συγκεντρώσεων Cl^- με τη χρήση της εξίσωσης (3.4) είχε σαν αποτέλεσμα ένα πιο σταθερό μοντέλο, πιθανώς λόγω εξισορρόπησης πειραματικών σφαλμάτων που μπορεί να συμβαίνουν σε κάθε διαφορετικό επίπεδο εξωτερικής συγκέντρωσης Cl^- .

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του υπολογισμού της παραμέτρου α' μέσω της (3.4) είναι η αξιοπιστία που αυτή παρουσιάζει σε ένα ευρύ φάσμα εξωτερικών συγκεντρώσεων NaCl. Μάλιστα η αξιοπιστία αυτή δεν περιορίζεται από το γεγονός ότι η b' υπολογίζεται από την εξίσωση (3.10) ξεχωριστά για κάθε επίπεδο εξωτερικής συγκέντρωσης NaCl. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι ο υπολογισμός του b' απαιτεί μόνο την αρχική τιμή της C_{xs} και όχι τα δεδομένα μιας πειραματικής διαδικασίας. Το τελευταίο διευκολύνει πάρα πολύ την εφαρμογή του μοντέλου στην πράξη, αφού για την εύρεση της αρχικής τιμής της C_{xs} αρκεί η μέτρηση της συγκέντρωσης του ιόντος στο διάλυμα απορροής την ημέρα έναρξης της ανακύκλωσης.

Σε ανάλογο πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε καλλιέργεια αγγουριού (Savvas et al., 2005b), η εφαρμογή του προαναφερόμενου μοντέλου πρόβλεψε με κάπως μεγαλύτερη ακρίβεια τις τιμές του Na^+ στο περιβάλλον των ριζών στις μεταχειρίσεις με αλατότητα. Στη μεταχείριση με 0,8 mM NaCl στο νερό άρδευσης, αντίθετα με τα αποτελέσματα του παρόντος πειράματος, το μοντέλο, έτεινε να υπερεκτιμά τη συσσώρευση του Na^+ στο περιβάλλον των ριζών. Η ακρίβεια της πρόβλεψης για τη συσσώρευση του Cl^- ήταν ανάλογη με αυτή της παρούσας εργασίας, αν και η σχέση μεταξύ της αναλογίας απορρόφησης του Cl^- και της συγκέντρωσής του στο περιβάλλον των ριζών ήταν εκθετική.

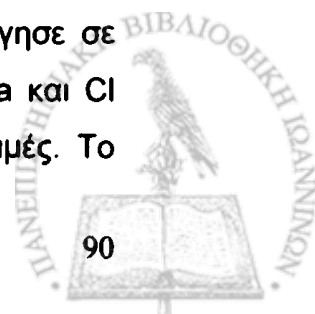
Το εύρος της απόκλισης των τιμών που προβλέπονται από τις εξισώσεις (3.8) και (3.11) από τις μετρημένες τιμών εξαρτάται από την ακρίβεια του υπολογισμού των παραμέτρων α , b και α' , καθώς και την ακριβή μέτρηση του καταναλισκόμενου από τα φυτά νερού (V_w). Όπως έχει ήδη αναφερθεί (βλ.



παράγραφο 4.4) οι παράμετροι a , b και a' εξαρτώνται από το είδος του φυτού και υπολογίζονται με εμπειρικό υπολογισμό με τη χρήση ανάλυσης της παλινδρόμησης (Sonneveld, 2000, Savvas et al., 2005b). Στην παρούσα εργασία ο υπολογισμός των τιμών των παραμέτρων αυτών έγινε για ένα μεγάλο εύρος εξωτερικών συγκεντρώσεων NaCl (0 – 70 mM). Είναι όμως γνωστό ότι η ικανότητα των φυτών να ανταποκρίνονται στην αύξηση της εξωτερικής συγκέντρωσης Na^+ και/ή Cl^- ελέγχεται από περισσότερα του ενός γονίδια και είναι βάσιμα πιθανό διαφορετικά γονίδια να εκφράζονται σε διαφορετικές εξωτερικές συγκεντρώσεις NaCl (Flowers, 2004). Επιπλέον, σε χαμηλές εξωτερικές συγκεντρώσεις ιόντων οι μηχανισμοί απορρόφησης των φυτών είναι πιο εκλεκτικοί από ό,τι σε υψηλές (Reid, 2000, Rengel, 2000). Έτσι, μπορεί να υποτεθεί, ότι οι μηχανισμοί που ενεργοποιούνται για τον αποκλεισμό του Na^+ και του Cl^- στα γλυκόφυτα μεταβάλλονται καθώς η εξωτερική συγκέντρωση του NaCl αυξάνει.

Τέτοιες αλλαγές δεν ταιριάζουν ακριβώς με τη μοναδική καμπύλη παλινδρόμησης που υπολογίστηκε στην παρούσα εργασία, κάτι που σημαίνει ότι για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας στην πρόβλεψη είναι πιθανό να απαιτούνται διαφορετικοί υπολογισμοί των παραμέτρων a , b και a' για χαμηλές και υψηλές εξωτερικές συγκεντρώσεις NaCl.

Ένα δεύτερο θέμα που πρέπει να συζητηθεί, ως προς την ακρίβεια της πρόβλεψης των συγκεντρώσεων των ιόντων Na^+ και Cl^- στο περιβάλλον των ριζών, είναι η χρήση των ίδιων παραμέτρων a , b και a' κάτω από διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Είναι γνωστό ότι η αύξηση της έντασης φωτισμού και της θερμοκρασίας οδηγεί στην αύξηση της αναλογίας απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων (Adams, 2002). Έτσι, η εντονότερη ηλιακή ακτινοβολία και οι υψηλότερες θερμοκρασίες στους μήνες του Φθινοπώρου είχε σαν αποτέλεσμα υψηλότερες αναλογίες απορρόφησης κατά την περίοδο αυτή, από αυτές που αντιστοιχούν στις τιμές των παραμέτρων a , b και a' που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Υπενθυμίζεται ότι οι τελευταίες βασίστηκαν σε δεδομένα που συλλέχθηκαν κυρίως κατά τη διάρκεια του Χειμώνα. Κατά συνέπεια, η χρήση των ίδιων τιμών για τις παραμέτρους a , b και a' καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος οδήγησε σε υπερεκτίμηση, από το μοντέλο, των συγκεντρώσεων των ιόντων Na και Cl κατά τη διάρκεια του Φθινοπώρου σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές. Το



συμπέρασμα αυτό φαίνεται να ταιριάζει με τα αποτελέσματα για το Na^+ (όπου η σχέση μεταξύ της αναλογίας απορρόφησης και της εξωτερικής του συγκέντρωσης είναι εκθετική) στις μεταχειρίσεις με 3, 6 και 9 mM NaCl στο νερό άρδευσης, ενώ στην περίπτωση του Cl^- , όπου η σχέση μεταξύ της αναλογίας απορρόφησης και της εξωτερικής του συγκέντρωσης είναι γραμμική, συμφωνεί στις μεταχειρίσεις με 0,8 και 3 mM NaCl στο νερό άρδευσης. Είναι συνεπώς πιθανό, για ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια πρόβλεψης να απαιτούνται διαφορετικοί υπολογισμοί των παραμέτρων a , b και a' για διαφορετικές εποχές του έτους.

Τέλος, όπως ήδη αναφέρθηκε, η ακρίβεια των προβλέψεων του μοντέλου που εξετάστηκε στο παρόν πείραμα, εξαρτάται και από την ακριβή μέτρηση της κατανάλωσης νερού από τα φυτά (V_w). Για τη μέτρηση της παραμέτρου αυτής θεωρήθηκε ότι οι απώλειες νερού από το κλειστό υδροπονικό σύστημα μέσω εξάτμισης και αστοχιών ήταν αμελητέες. Παρ' όλα αυτά η εξάτμιση νερού μέσω των ανοιγμάτων φύτευσης στο πλαστικό κάλυψης των καναλιών καλλιέργειας (βλ. Υλικά και Μέθοδοι, Εγκατάσταση του πειράματος) δεν μπορούν να αποφευχθούν, ενώ και σποραδικές απώλειες θρεπτικού διαλύματος της τάξης των δεκάδων ή σπανιότερα των εκατοντάδων λίτρων είναι αναπόφευκτες σε ένα εμπορικού τύπου κλειστό υδροπονικό σύστημα. Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι ακριβέστερη μέτρηση του V_w μπορεί να βελτιώνει οριακά την ακρίβεια των προβλέψεων του μοντέλου, πρακτικά όμως, σε συνθήκες θερμοκηπιακής καλλιέργειας, ακριβέστερη μέτρηση είναι αδύνατο να επιτευχθεί.

Οι Carmassi et al., (2005) αναφέρουν τη δημιουργία ενός ανάλογου μοντέλου πρόβλεψης της συσσώρευσης του Na σε σχέση με την κατανάλωση νερού από τα φυτά, το οποίο εφαρμόστηκε σε καλλιέργειες τομάτας. Οι ερευνητές αυτοί υπέθεσαν μία γραμμική σχέση μεταξύ της αναλογίας της αναλογίας απορρόφησης του Na και της συγκέντρωσής του στο περιβάλλον των ριζών. Επιπλέον, το υδροπονικό σύστημα που χρησιμοποίησαν δεν ήταν κλειστό, αλλά κατά διαστήματα και όταν η EC του διαλύματος απορροής έφτανε σε μια ορισμένη τιμή το διάλυμα απορροής αποβαλλόταν στο περιβάλλον. Τα αποτελέσματά τους για το Na ήταν σε καλή συμφωνία με τις τιμές που προέβλεψε το μοντέλο τους. Η συμφωνία που παρατηρήθηκε μεταξύ των πειραματικών και των θεωρητικών τιμών ήταν μεγαλύτερη στην



καλλιέργεια που πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του Φθινοπώρου σε σύγκριση με αυτή που πραγματοποιήθηκε στη διάρκεια της Άνοιξης.

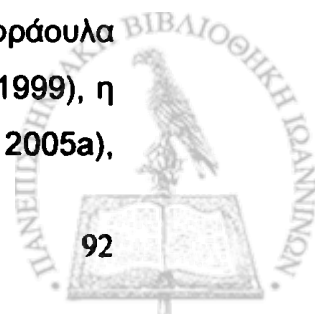
4.6. Συγκέντρωση Na^+ και Cl^- στα φύλλα

Η συσσώρευση του ιόντος του Na^+ στο περιβάλλον των ριζών δεν οδήγησε σε αντίστοιχη αύξηση της συγκέντρωσης του ιόντος στα νεαρά φύλλα των φυτών. Αντίθετα η συσσώρευση του ιόντος του Cl^- στο εξωτερικό διάλυμα είχε σαν αποτέλεσμα σημαντική αύξηση της συγκέντρωσής του στα φύλλα. Το Na^+ ανιχνεύτηκε σε σημαντικές ποσότητες στα φύλλα μόνο όταν η εξωτερική του συγκέντρωση ξεπέρασε τα 60 mM, ενώ το Cl^- όταν η συγκέντρωσή του στο εξωτερικό διάλυμα ξεπέρασε τα 20 mM (Σχ. 3.8).

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι τα φυτά φασολιού, πέραν της ισχυρότερης αντίστασης που προβάλλουν στην είσοδο του Na στα ζωντανά κύτταρα του φυτού, κατανέμουν ανισομερώς το Na^+ μέσα στους φυτικούς ιστούς με στόχο να ελαχιστοποιήσουν την συσσώρευσή του στα νεαρά και φωτοσυνθετικώς πιο ενεργά φύλλα του φυτού. Αντίθετα, το Cl^- τείνει να κατανέμεται σχεδόν ισομερώς σε όλο το φυτικό σώμα.

Η αντίδραση αυτή των φυτών φασολιού σε περιβάλλον αλατότητας είναι γνωστή και έχει περιγραφεί από διάφορους ερευνητές. Ήδη από το 1964 ο Jacoby αναφέρει ότι το Na^+ , αφού απορροφηθεί από τα φυτά συσσωρεύεται στις ρίζες και στα κατώτερα μέρη του βλαστού (στο παρέγχυμα του ξυλώδους παρεγχύματος) και μόνο όταν η εξωτερική συγκέντρωση του NaCl ξεπεράσει τα 50 mM ανιχνεύεται σε σημαντικές ποσότητες στα ανώτερα μέρη του βλαστού και στα φύλλα. Αντίθετα, το Cl^- κατανέμεται πιο ομοιόμορφα στα διάφορα φυτικά όργανα ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις NaCl στο περιβάλλον των ριζών. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρουν οι Lahaye and Epstein (1971), οι Greenway and Munns (1980) και οι Seemann and Critchley (1985).

Ανάλογη συμπεριφορά με αυτή του φασολιού αναφέρεται ότι παρουσιάζουν και άλλα καλλιεργούμενα γλυκόφυτα όπως η πιπεριά (Sonneveld and Van Der Burg, 1991), το ταρό (*Colocasia esculenta*) (Hill et al., 1998), το τριαντάφυλλο (Cabrera and Perdomo, 2003) και η φράουλα (Saied et al., 2005). Άλλα φυτά όμως, όπως το πεπόνι (Amor et al., 1999), η τομάτα (Mavrogianopoulos et al., 2002) και το αγγούρι (Savvas et al., 2005a),



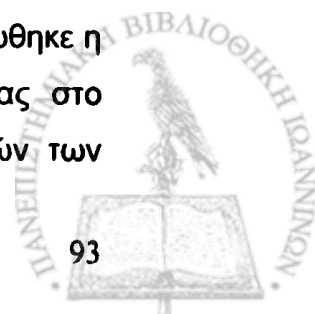
αποκλείουν το Na^+ σε σημαντικά μικρότερο βαθμό από τα ανώτερα και φωτοσυνθετικώς ενεργά μέρη τους, αφού σε αυτά η αύξηση της συγκέντρωσης του NaCl στο περιβάλλον των ριζών οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση της συγκέντρωσης του Na^+ στα φύλλα.

4.7. Συγκεντρώσεις K^+ , Ca^{2+} και Mg^{2+} στο περιβάλλον των ριζών

Η συσσώρευση του K^+ , του Ca^{2+} και του Mg^{2+} , που εμφανίστηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος στο περιβάλλον των ριζών (Σχ. 3.9), ήταν αποτέλεσμα της διαφοράς μεταξύ της υψηλότερης αναλογίας ιόντος/νερό (ión προς νωπό θρεπτικό διάλυμα) που εισέρχονταν στο κλειστό σύστημα, από την αναλογία ιόντος/νερό με την οποία απορροφούσαν τα φυτά τα παραπάνω ιόντα. Η συσσώρευση αυτή συνείσφερε κατά ένα σημαντικό μέρος στην αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας που παρατηρήθηκε στο διάλυμα απορροής κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Σύμφωνα με τους Sonneveld et al. (1999b) αύξηση των συγκεντρώσεων του K^+ και του Ca^{2+} κατά 10 mmol l^{-1} στο διάλυμα απορροής (τόση περίπου ήταν και η παρατηρηθείσα αύξηση των συγκεντρώσεων τους στο παρόν πείραμα στις μέγιστες τιμές που μετρήθηκαν στο διάλυμα απορροής) μπορεί να αυξήσει την EC του διαλύματος κατά 1 dS m^{-1} για το K^+ και κατά 2 dS m^{-1} για το Ca^{2+} . Επιπλέον, η αύξηση της συγκέντρωσης του Mg^{2+} κατά $1,5$ με 2 mmol l^{-1} μπορεί να συνεισφέρει στην αύξηση της EC κατά $0,3 \text{ dS m}^{-1}$ ακόμη. Στην πράξη, σ' ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα, η αύξηση της EC που προκαλείται από τη συσσώρευση των ιόντων αυτών στο διάλυμα απορροής είναι κατά πολύ μικρότερη από αυτή που υπολογίστηκε. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τόσο το Ca^{2+} , όσο και το Mg^{2+} αλλά σε κάποιο βαθμό και το K^+ , η παρουσία SO_4^{2-} δημιουργούν διαλυτές ενώσεις CaSO_4 , MgSO_4 και KSO_4 , μέρος των οποίων παραμένει σε αδιάστατη μορφή η οποία δεν επηρεάζει την EC (De Rijck and Schrevens, 1998).

Με βάση τα παραπάνω, όταν διαπιστώθηκε η υπερβολική συσσώρευση του K^+ , αλλά και του Mg^{2+} στο διάλυμα απορροής, αποφασίστηκε η μείωση της παροχής τους στα νέα θρεπτικά διαλύματα, η οποία άρχισε να εφαρμόζεται από την 23η Νοεμβρίου 2004 και μετά. Αντίθετα, δεν μειώθηκε η παροχή του Ca^{2+} γιατί ήταν γνωστό ότι η αύξηση της αλατότητας στο περιβάλλον των ριζών έχει σαν συνέπεια την αύξηση των αναγκών των



φυτών για Ca^{2+} (Grattan and Grieve, 1999) και ότι χαμηλή συγκέντρωση Ca^{2+} ή/και υψηλή αναλογία Na/Ca στο περιβάλλον των ριζών επηρεάζει αρνητικά την περατότητα των μεμβρανών και μειώνει την εκλεκτικότητά τους (Dorais et al., 2001, Yokoi et al., 2002).

Η μείωση της παροχής του K^+ στα νέα θρεπτικά διαλύματα είχε σαν αποτέλεσμα την άμεση μείωση της συγκέντρωσης του στοιχείου αυτού στα διαλύματα απορροής όλων των μεταχειρίσεων (Σχ. 3.9). Η μεγαλύτερη μείωση παρατηρήθηκε στη μεταχείριση με τη μικρότερη συγκέντρωση NaCl στο νερό άρδευσης κάτι που υποδηλώνει ότι τα φυτά της μεταχείρισης αυτής απορροφούσαν K^+ με μεγαλύτερη ένταση από τα φυτά των άλλων μεταχειρίσεων. Αντίθετα με το K^+ , το Mg^{2+} συνέχισε να συσσωρεύεται στο διάλυμα απορροής, παρά τη μείωση της παροχής του στα νέα θρεπτικά διαλύματα. Φαίνεται ότι οι ανάγκες των φυτών για Mg^{2+} τη συγκεκριμένη εποχή του χρόνου ήταν μικρές, ενώ η μείωση της συγκέντρωσής του στην τελευταία μέτρηση, που αντανακλά την αύξηση της απορρόφησής του από τα φυτά, πιθανόν να οφείλεται σε ένα χρονικό διάστημα 20 περίπου ημερών με έντονη ηλιοφάνεια και υψηλές για την εποχή θερμοκρασίες που παρατηρήθηκε τον Ιανουάριο του 2005 και που είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της απορρόφησης του στοιχείου από τα φυτά.

4.8. Συγκεντρώσεις K^+ , Ca^{2+} και Mg^{2+} στα φύλλα

Τα διαφορετικά επίπεδα NaCl στο νερό άρδευσης δεν επέφεραν διαφορές στις συγκεντρώσεις των μακροκατιόντων στα νεαρά φύλλα των φυτών φασολιού, ενώ κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας παρατηρήθηκε μία προοδευτική μείωση των συγκεντρώσεων του K^+ και του Mg^{2+} όχι όμως και του Ca^{2+} που παρέμεινε λίγο πολύ σταθερή (Σχ. 3.10).

Η σταδιακή μείωση του K^+ στα νεαρά φύλλα του φασολιού ήταν πιθανόν το αποτέλεσμα ενός συνδυασμού δύο παραγόντων. Από τη μια πλευρά προκλήθηκε από την μείωση της απορρόφησης των παραπάνω στοιχείων λόγω της σταδιακής μείωσης των θερμοκρασιών στην περιοχή της ριζόσφαιρας (Dorais et al., 2001). Ταυτόχρονα όμως, σημαντικό ρόλο στην μείωση του K των φύλλων με την πάροδο του χρόνου διαδραμάτισε πιθανότατα και η υψηλή κινητικότητα των ιόντων K^+ και Mg^{2+} εντός του φυτού, τα οποία μέσω του φλοιώματος κατευθύνονται εκεί που υπάρχουν οι



μεγαλύτερες ανάγκες, δηλαδή στις αναπτυσσόμενες κορυφές των βλαστών και, ειδικά για το K^+ , στους καρπούς (Σάββας, 2001, Mengel and Kirkby, 2002). Η συγκέντρωση του Ca^{2+} στα φύλλα των φυτών όλων των μεταχειρίσεων παρέμεινε σχετικά σταθερή κατά τη διάρκεια του πειράματος πιθανότατα επειδή η ελάττωση της πρόσληψης του ιόντος λόγω της μείωσης της διαπνοής των φυτών, με την έλευση του Χειμώνα, εξισορροπήθηκε από την έντονη συσσώρευση του ιόντος στο διάλυμα απορροής.

Σύμφωνα με τους Seemann and Critchley (1985) η συγκέντρωση του K^+ των φύλλων αυξήθηκε καθώς ανυψωνόταν η εξωτερική αλατότητα ενώ οι συγκεντρώσεις των Ca^{2+} και Mg^{2+} δεν μεταβλήθηκαν σε φυτά φασολιού που αναπτύχθηκαν σε θρεπτικά διαλύματα με 0, 25, 50, 100 και 150 mM NaCl και μέσα σε θαλάμους ελεγχόμενων συνθηκών. Οι Meiri et al. (1971) αναφέρουν επίσης αύξηση της συγκέντρωσης του K σε νεαρά φύλλα φυτών φασολιού που αναπτύχθηκαν σε θρεπτικά διαλύματα προκαθορισμένης αλατότητας. Η αύξηση δε, ήταν περισσότερο σημαντική όταν η αλατότητα οφείλονταν στην προσθήκη $NaSO_4$, σε σχέση με την προσθήκη NaCl. Η ασυμφωνία των παραπάνω με τα αποτελέσματα του παρόντος πειράματος είναι πιθανόν να οφείλεται στις διαφορετικές συνθήκες καλλιέργειας των φυτών φασολιού μεταξύ των διαφορετικών πειραμάτων ή στα διαφορετικά επίπεδα αλατότητας.

Γενικά, η σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης των μακροκατιόντων στα φύλλα γλυκοφυτικών φυτών και της συγκέντρωσης του NaCl στο περιβάλλον των ριζών τους εξαρτάται τόσο από το είδος του φυτού, όσο και από το κατιόν και τον τρόπο που αυτό αλληλεπιδρά με τα ιόντα Na^+ και Cl^- , αλλά και τα υπόλοιπα θρεπτικά στοιχεία (Greenway and Munns, 1980, Grattan and Grieve, 1999, Dorais et al., 2001). Ιδιαίτερα για το ιόν του K αναφέρεται ότι, συνήθως, η αύξηση της αλατότητας και/ή του λόγου Na/Ca στο περιβάλλον των ριζών οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης του ιόντος στα φύλλα των φυτών λόγω ανταγωνισμού στην απορρόφηση μεταξύ των ιόντων K και Na. Παρόλα αυτά σε άλλα φυτά, και ιδιαίτερα σε φυτά ευαίσθητα στην αλατότητα που συσσωρεύουν Na^+ στους βλαστούς, το K^+ μπορεί να απορροφάται με έντονο ρυθμό παρά τη μεγάλη συγκέντρωση του Na^+ στο περιβάλλον των ριζών με αποτέλεσμα να παρατηρείται ακόμη και αύξηση της συγκέντρωσης του στα φύλλα (Greenway and Munns, 1980, Grattan and Grieve, 1999).

4.9. Βλαστική ανάπτυξη φυτών

Η αύξηση της συγκέντρωσης του NaCl στο νερό άρδευσης επέφερε μείωση στην ανάπτυξη των φυτών φασολιού, όπως αυτή αντικατοπτρίζεται στις μετρήσεις του νωπού (NB) και του ξηρού (ΞΒ) βάρους των υπέργειων τμημάτων των φυτών (Σχ. 3.11). Η μείωση της ανάπτυξης χαρακτηρίζεται ως το πιο συχνό σύμπτωμα της δυσμενούς επίδρασης της αλατότητας στα γλυκόφυτα που αναπτύσσονται σε περιβάλλον υψηλής αλατότητας (Greenway and Munns, 1980). Καθώς η συγκέντρωση των αλάτων ξεπερνά ένα όριο, που μπορεί να ποικίλλει για τα διαφορετικά φυτικά είδη, τόσο ο ρυθμός ανάπτυξης των φυτών όσο και το απόλυτο μέγεθός τους μειώνεται. Ειδικά η μείωση του NB και του ΞΒ των υπέργειων τμημάτων των φυτών αναφέρεται σαν αποτέλεσμα της αύξησης της αλατότητας από πολλούς ερευνητές, μεταξύ των οποίων οι Shannon et al. (2000), οι Sternberg et al. (2001), οι Tadesse and Nichols (2003), ο Λυκοσκούφης (2003) και οι Savvas et al. (2005b).

Το παραπάνω φαινόμενο αποδίδεται κυρίως στη μείωση της φωτοσυνθετικής ικανότητας των φυτών. Η τελευταία είναι αποτέλεσμα της μείωσης της φυλλικής επιφάνειας, της μείωσης της χλωροφύλλης και της διατάραξης των μεταβολικών διαδικασιών, η οποία, στην περίπτωση του φασολιού, συνδέεται περισσότερο με αυξημένη συσσώρευση Cl⁻ στα φύλλα, τόσο στους χλωροπλάστες όσο και στο κυτόπλασμα (Seemann and Critchley, 1985). Επιπλέον στα φυτά που υπόκεινται σε καταπόνηση λόγω αλατότητας παρατηρείται μείωση του μεταβολισμού του αζώτου και της πρωτεινοσύνθεσης (Pesarakli et al., 1989), ενώ απαιτείται από αυτά σημαντική δαπάνη μεταβολικής ενέργειας για τον αποκλεισμό και την απέκκριση των ιόντων Na και Cl (Maas and Hoffman, 1977). Τέλος, η μείωση του υδατικού δυναμικού του υπέργειου μέρους των φυτών, κυρίως των φύλλων, και συνεπώς της σπαργής των κυτάρων λόγω της αύξησης του ωσμωτικού δυναμικού του υποστρώματος μπορεί επίσης να συμβάλλει, σε μικρό όμως βαθμό, στη μείωση του NB και του ΞΒ (Chartzoulakis, 1994).

Για το φασόλι οι Brugnoli and Lauteri (1991) αναφέρουν μείωση του ΞΒ κατά 76% σε φυτά που αναπτύχθηκαν σε θρεπτικό διάλυμα προκαθορισμένης αλατότητας (50 mM NaCl) και σε περιβάλλον ελεγχόμενων συνθηκών, σε σχέση με φυτά που αναπτύχθηκαν σε θρεπτικό διάλυμα



απουσία NaCl. Η παραπάνω μείωση είναι κατά πολύ υψηλότερη από αυτή που παρατηρήθηκε στο παρόν πείραμα και η οποία έφτανε το 44% στις τελικές συγκεντρώσεις Na^+ (76 mM) και Cl^- (48 mM). Οι Seemann and Critchley (1985) όμως, αναφέρουν μείωση του NB κατά 50% και του ΞΒ κατά 58% και οι Jebara et al. (2005) μείωση του ΞΒ κατά 37% σε φυτά που αναπτύχθηκαν επίσης σε διαλύματα προκαθορισμένης αλατότητας (50 mM NaCl) και σε περιβάλλον ελεγχόμενων συνθηκών. Οι παραπάνω διαφορές θα πρέπει να αποδοθούν στις διαφορετικές συνθήκες ανάπτυξης των φυτών και στις καλλιεργούμενες ποικιλίες. Τα αποτελέσματα του παρόντος πειράματος, στις δύο μεταχειρίσεις με την υψηλότερη αλατότητα (Σχ. 3.11), είναι συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα που αναφέρουν οι Seemann and Critchley και οι Jebara et al., παρά το γεγονός ότι στο περιγραφόμενο πείραμα ο μάρτυρας δεν αναπτύχθηκε σε διάλυμα ελεύθερο από NaCl. Επιπλέον, το γεγονός ότι η αύξηση της αλατότητας, στο παρόν πείραμα ήταν σταδιακή δε φαίνεται να είχε ιδιαίτερο όφελος για τα φυτά.

4.10. Παραγωγή καρπών

Η συνολική παραγωγή ανά φυτό μειώθηκε με την αύξηση της συγκέντρωσης του NaCl στο νερό άρδευσης, λόγω της μείωσης τόσο του αριθμού των λοβών ανά φυτό όσο και του μέσου βάρους των λοβών (Σχ. 3.12). Η μείωση της παραγωγής λόγω αύξησης της αλατότητας στο περιβάλλον των ριζών είναι συνηθισμένο φαινόμενο στα καλλιεργούμενα γλυκόφυτα (Navaro et al., 1999, D' Anna et al., 2003, Tadesse and Nichols, 2003, Savvas et al., 2005b) και αποδίδεται αφενός μεν στην αύξηση του ωσμωτικού δυναμικού του υποστρώματος, που οδηγεί στη μείωση του υδατικού δυναμικού των φυτών και κατ' επέκταση τη μείωση της ροής του νερού στους καρπούς (Chartzoulakis, 1994, Dorais et al., 2001) και αφετέρου στις τοξικές επιδράσεις των ιόντων Na^+ και Cl^- σε ενδοκυτταρικό επίπεδο (μείωση της φωτοσύνθεσης, διατάραξη των μεταβολικών διαδικασιών κλπ.) (Seemann and Critchley, 1985, Pesarakli et al., 1989).

Στο φασόλι μείωση της παραγωγής παρατηρείται όταν η EC στο εδαφικό ή το θρεπτικό διάλυμα ξεπεράσει τα $1,6 \text{ dSm}^{-1}$ (Maas and Hoffman, 1977, Sonneveld et al., 1990). Είναι λογικό λοιπόν, να υποτεθεί ότι στο παρόν



πείραμα η παραγωγή ήταν μειωμένη ακόμη και στη μεταχείριση με 0,8 mM NaCl στο νερό άρδευσης ($4,6 \text{ dSm}^{-1}$ η μέγιστη τιμή της EC στο περιβάλλον των ριζών) σε σύγκριση με αυτή που θα μπορούε να ληφθεί αν τα φυτά αναπτύσσονταν σε θρεπτικό διάλυμα απαλλαγμένο από NaCl.

Σύμφωνα με το μοντέλο των Maas and Hoffman (1977) (που εκφράζει τη σχέση μεταξύ της παραγωγής μιας καλλιέργειας και της EC του εδάφους), όπως αυτό έχει βελτιωθεί από τους Sonneveld et al. (1988) για φυτά που αναπτύσσονται σε υποστρώματα, η μείωση της παραγωγής του φασολιού όταν η EC στο υδατικό διάλυμα (εδαφικό διάλυμα ή θρεπτικό διάλυμα) που περιβάλλει τις ρίζες ξεπεράσει τα $1,6 \text{ dS m}^{-1}$ είναι γραμμική, ανέρχεται δε σε 14% ανά dSm^{-1} . Στο παρόν πείραμα η παρατηρηθείσα ποσοστιαία μείωση της παραγωγής ανά dS m^{-1} ήταν 10% έως ότου η EC έφτασε τα $6,5 \text{ dS m}^{-1}$, ενώ στη συνέχεια η σχέση μεταξύ μείωσης της παραγωγής και της αύξησης της EC δεν ήταν πλέον γραμμική.

Οι παραπάνω ασυμφωνίες μπορεί να οφείλονται σε διάφορους παράγοντες. Κατά πρώτο λόγο, οι τιμές των παραμέτρων που έχουν υπολογιστεί για την συσχέτιση της παραγωγής μιας καλλιέργειας και της EC μέσω του παραπάνω μοντέλου, δεν έχουν καθολική ισχύ, αλλά εξαρτώνται από τις συνθήκες καλλιέργειας και τις κλιματικές συνθήκες (Maas, 1986, Sonneveld et al., 2004). Έτσι π.χ., καλλιέργειες που αναπτύσσονται σε ψυχρές και υγρές σχετικά συνθήκες (όπως η παρούσα καλλιέργεια) τείνουν να είναι περισσότερο ανθεκτικές στις επιδράσεις της αλατότητας (Maas, 1986). Κατά δεύτερο λόγο, το παραπάνω μοντέλο λαμβάνει υπ' όψιν μόνο την αύξηση του ωσμωτικού δυναμικού στο υπόστρωμα και όχι τις τοξικές επιδράσεις των ιόντων Na^+ και Cl^- στα φυτά. Για τον συνυπολογισμό των τελευταίων στη μείωση της παραγωγής, άλλα μοντέλα, εκθετικά ή πολυωνυμικά, μπορεί να ταιριάζουν καλύτερα (Sonneveld et al., 2004).

Τα αποτελέσματα του παρόντος πειράματος υποδηλώνουν ότι όταν το φασόλι εκτίθεται σε χαμηλά σχετικά επίπεδα αλατότητας ($< 6,5 \text{ dS m}^{-1}$), οι επιδράσεις του αυξημένου ωσμωτικού δυναμικού του υποστρώματος υπερσχύουν των τοξικών επιδράσεων των ιόντων Na^+ και Cl^- οπότε η μείωση της παραγωγής είναι γραμμική. Το παραπάνω συμπέρασμα συμφωνεί με τα αποτελέσματα των Scholberg and Locassio (1999), οι οποίοι αναφέρουν

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

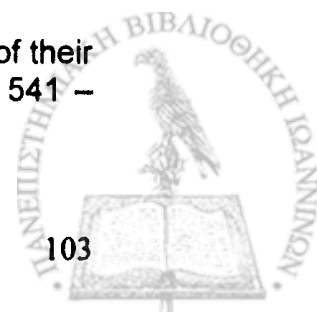
Οι προβλέψεις της συσσώρευσης των ιόντων Na^+ και Cl^- στο περιβάλλον των ριζών σε σχέση με την κατανάλωση νερού από τα φυτά μέσω του μοντέλου υπήρξαν αρκετά ακριβείς. Για ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια απαιτείται ο υπολογισμός των παραμέτρων a , b a' σε διαφορετικές εποχές του χρόνου, καθώς και σε διαφορετικά επίπεδα (χαμηλά και υψηλά) NaCl στο νερό άρδευσης. Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε “ευφυή” συστήματα αυτόματης διαχείρισης της υδρολίπανσης σε κλειστά υδροπονικά συστήματα που εφαρμόζονται στην πράξη για παραγωγικούς σκοπούς, ώστε να καθορίζεται αυτόματα πότε θα απορρίπτεται το διάλυμα απορροής με βάση τις ανώτατες επιτρεπτές τιμές αλατότητας για το συγκεκριμένο φυτό. Έτσι ελαχιστοποιούνται οι δυσμενείς επιδράσεις της αλατότητας στην καλλιέργεια. Κυρίως όμως, το παρόν μοντέλο επιτρέπει τον αυτόματο ποσοτικό υπολογισμό της επίπτωσης που ασκεί η συσσώρευση αλάτων στην ηλεκτρική αγωγιμότητα, ώστε να μπορεί να καθορίζεται αυτόματα η εκάστοτε τιμή-στόχος αυτής σε επίπεδα που διασφαλίζουν επαρκή παροχή θρεπτικών στοιχείων στην καλλιέργεια.

Η παρουσία NaCl στο νερό άρδευσης έχει ως αποτέλεσμα τη σταδιακή, αλλά γρήγορη αύξηση της αλατότητας στο περιβάλλον των ριζών με δυσμενείς επιπτώσεις στην ανάπτυξη των φυτών και στην παραγωγή. Η σταδιακή αυτή αύξηση δεν είχε σαν αποτέλεσμα την καλύτερη ανάπτυξη των φυτών σε σχέση με φυτά που αναπτύχθηκαν σε θρεπτικά διαλύματα προκαθορισμένης και σταθερής αλατότητας. Η παρατηρηθήσα μείωση της παραγωγής οφείλονταν τόσο στη μείωση του αριθμού των λοβών ανά φυτό, όσο και στη μείωση του μέσου βάρους των λοβών. Το φασόλι αποκλείει με επιτυχία τα ιόντα Na^+ από τα φωτοσυνθετικώς ενεργά μέρη του φυτού, ενώ αποτυγχάνει να αποκλείσει τα ιόντα Cl^- . Η αύξηση της αλατότητας στο περιβάλλον των ριζών δεν φαίνεται να επηρεάζει την απορρόφηση των μακροκατιόντων και τη συσσώρευσή τους στα νεαρά φύλλα των φυτών.

Τα παραπάνω αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι για την καλλιέργεια του φασολιού σε κλειστά υδροπονικά συστήματα απαιτείται καλής ποιότητας αρδευτικό νερό με περιεκτικότητα σε NaCl μικρότερη από 0,8 mM.

- Cabanero, F. J., Martinez, V. and Carvajal, M., 2004. Does calcium determine water uptake under saline conditions in pepper plants, or is it water flux which determines calcium uptake? *Plant Science*, 166: 443 – 450.
- Cabrera, R.I. and Perdomo, P., 2003. Reassessing the Salinity Tolerance of Greenhouse Roses under Soilless Production Conditions. *HortScience*, 38: 533 – 536.
- Campbell, R.C. and Plank O.C., 1998. Preparation of plant tissue for laboratory analysis. In: Kalra, Y.P.(eds): *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 37 – 49.
- Carmassi, G., Incrocci, L., Maggini, R., Malorgio, F., Tognoni, F. and Pardossi, A., 2005. Modelling salinity build-up in recirculating nutrient solution culture. *J. Plant Nutr.*, 28: 431 – 445.
- Chartzoulakis, K. S., 1994. Photosynthesis, water relations and leaf growth of cucumber exposed to salt stress. *Sci. Hort.*, 59: 27 – 35.
- Chartzoulakis, K. and Klapaki, G., 2000. Response of two greenhouse pepper hybrids to NaCl salinity during different growth stages. *Sci. Hort.*, 86: 247 – 260.
- D' Anna, F., Incalcaterra, G., Moncada, A. and Miceli, A., 2003. Effects of Different Electrical Conductivity Levels on Strawberry Grown in Soilless Culture. *Acta Horticulture*, 609: 355 – 360.
- Daum, D. and Schenk, M. K., 1998. Influence of nutrient solution pH on N₂O and N₂ emissions from a soilless culture system. *Plant and Soil*, 203: 279 – 287.
- De Kreij, C., 1995. Latest insights into water and nutrient control in soilless cultivation. *Acta Horticulturae*, 408: 47 – 61.
- De Kreij, C., Voogt, W. and Baas, R., 1999. Nutrient solutions and water quality for soilless cultures, Brochure 196. Research station for Floriculture and Glasshouse Vegetables (PBG), Naaldwijk, The Netherlands.
- De Rijck, G. and Schrevens, E., 1997. Elemental Bioavailability in Nutrient Solutions in Relation to Dissociation Reactions. *J. Plant Nutr.*, 20: 901 – 910.
- De Rijck, G. and Schrevens, E., 1998a. Elemental Bioavailability in Nutrient Solutions in Relation to Complexation Reactions. *J. Plant Nutr.*, 21: 849 – 859.
- De Rijck, G. and Schrevens, E., 1998b. Elemental Bioavailability in Nutrient Solutions in Relation to Precipitation Reactions. *J. Plant Nutr.*, 21: 2103 – 2113.

- del Amor, F.M., Martinez, V. and Cerda, A., 1999. Salinity Duration and Concentration Affect Fruit Yield and Quality, and Growth and Mineral Composition of Melon Plants Grown in Perlite. *HortScience*, 34: 1234 – 1237.
- Dorais, M., Papadopoulos, A. and Gosselin, A., 2001. Influence of electric conductivity management on greenhouse tomato yield and fruit quality. *Agronomie*, 21: 367 – 383.
- Eaton, A.D., Clesceri, L.S. and Greenberg, A.E. (eds), 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th ed., American Public Health Association, Washington, USA.
- Fernandez-Garcia, N., Martinez, V. and Carvajal, M., 2004. Effect of salinity on growth, mineral composition, and water relations of grafted tomato plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 167: 616 – 622.
- Flowers, T.J., 2004. Improving crop salt tolerance. *J. Exp. Bot.*, 55: 307 – 319.
- Gepts, P. and Debouck, D., 1993. Origin, Domestication, and evolution of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). In: van Schoonhoven, A., Voysest, O. (Ed.). *Common Beans, Research for Crop Improvement*. C.A.B. International, Wallingford, UK, pp. 7 – 53.
- Gizas, G., Savvas, D. and Mitsios, I., 1999. Availability of macrocations in perlite and pumice as influenced by the application of nutrient solutions having different cation concentrations ratios. *Acta Horticulturae*, 548 ; 277 – 284.
- Grattan, S.R. and Grieve, C. M., 1999. Salinity – mineral nutrient relations in horticultural crops. *Sci. Hort.*, 78: 127 – 157.
- Graves, C. J., 1983. The nutrient film technique. *Horticultural Reviews*, 5: 1 – 44.
- Greenway, H. and Munns, R., 1980. Mechanisms of salt tolerance in non-halophytes. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, 31: 149 – 190.
- Hill, S., Abaidoo, R. and Miyasaka, S., 1998. Sodium Chloride Concentration Affects Early Growth and Nutrient Accumulation in Taro. *HortScience*, 33: 1153 – 1156.
- Hewitt, E. J., 1966. Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition. Technical communication No 22 (revised). Commonwealth Bureau of Horticulture and Plantation Crops, East Malling, Maidstone, Kent, U.K.
- Hu, Y. and Schmidhalter, U., 2005. Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 168: 541 – 549.



- Islam, A. K. M. S., Edwards, D. G. and Asher, C. J., 1980. pH optima for crop growth. Results of a flowing solution culture experiment with six species. *Plant and Soil*, 54: 339 – 357.
- Jacoby, B., 1964. Function of Bean Roots and Stems in Sodium Retention. *Plant Physiol.*, 39: 445 – 449.
- Jebara, S., Jebara, M., Liman, F. and Aouani, M. E., 2005. Changes in ascorbate peroxidase, catalase, guaiacol peroxidase and superoxide dismutase activities in common bean (*Phaseolus vulgaris*) nodules under salt stress. *J. Plant Physiol.*, 162: 929 – 936.
- Jones, Jr. J. B., 1982. Hydroponics: its history and use in plant nutrition studies. *J. Plant Nutr.*, 5: 1003 – 1030.
- Κωνσταντινίδου, Ε.Ι.Α., 2003. Φυσιολογία αβιοτικών καταπονήσεων. Στο: Ρουμπελάκη – Αγγελάκη, Κ.Α. (επιμέλεια): Φυσιολογία φυτών. Από το μόριο στο περιβάλλον. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο, σ. 555 - 620.
- Lahaye, P.A. and Epstein, E., 1971. Calcium and Salt Toleration by Bean Plants. *Physiol. Plant.*, 25: 213 – 218.
- Lea-Cox, J. D. and Syvertsen, J. P., 1993. Salinity reduces water use and nitrate-N-use efficiency of citrus. *Ann. Bot.*, 72: 47 – 54.
- Li, Y. L., Stanghellini, C., 2001. Analysis of the effect of EC and potential transpiration on vegetative growth of tomato. *Sci. Hort.*, 89: 9 – 21 .
- Liu, L., 1998. Determination of Chloride in Plant Tissue. In: Kalra, Y.P.(eds): *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 37 – 49.
- Lopez, C. M. L., Takahashi, H. and Yamazaki, S., 2002. Plant – Water Relations of Kidney Bean Plants Treated with NaCl and Foliarly Applied Glycinebetaine. *J. Agronomy & Crop Science*, 188: 73 – 80.
- Λυκοσκούφης, Ι.Η., 2003. Οι επιπτώσεις της υψηλής αλατότητας του θρεπτικού διαλύματος υδροπονικών καλλιεργειών στη φωτοσύνθεση και την αγωγιμότητα των στοματίων. Μεταπτυχιακή Μελέτη, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.
- Lycoskoufis, I. H., Savvas, D. and Mavrogianopoulos, G., 2005. Growth, gas exchange, and nutrient status in pepper (*Capsicum annum* L.) grown in recirculating nutrient solution as affected by salinity imposed to half of the root system. *Sci. Hort.*, 106: 147 – 161.
- Maas, E. V., 1986. Salt tolerance of plants. *Appl. Agr. Res.*, 1: 12 – 26.

- Maas, E. V. and Hoffman, G. J., 1977. Crop salt tolerance. Current assessment. *J. Irrig. Drainage*, 103: 115 – 134.
- Maloupa, E., 2002. Hydroponic Systems. In: D. Savvas and H.C. Passam (eds). *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*. Embryo Publications, Athens, Greece, p. 143 – 178.
- Μανέτας, Ι., 2003. Προσληψη και μεταφορά νερού. Στο: Ρουμπελάκη – Αγγελάκη, Κ.Α. (επιμέλεια): *Φυσιολογία φυτών. Από το μόριο στο περιβάλλον*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο, σ. 41 - 98.
- Μανιός, Β., 1990. Υδροπονικές Καλλιέργειες (σημειώσεις). Τ.Ε.Ι. Ηρακλείου, Ηράκλειο.
- Martinez, V. and Cerda, A., 1989. Influence of N source on rate of Cl, N, Na and K uptake by cucumber seedlings grown in saline conditions. *J. Plant Nutr.*, 12: 971 – 983.
- Μαυρογιαννόπουλος, Ν. Γ., 1994. Υδροπονικές καλλιέργειες και θρεπτικά διαλύματα. Εκδόσεις Α. Σταμούλης, Αθήνα – Πειραιάς.
- Mavrogianopoulos, G., Savvas, D. and Vogli, V., 2002. Influence of NaCl-salinity imposed on half of the root system of hydroponically grown tomato on growth, yield, and tissue mineral composition. *J. Hort. Scie. Biot.*, 77: 557 – 565.
- Mengel, K. and Kirkby, A. E., 2002. *Principles of plant nutrition*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 481 – 552.
- Meiri, A. and Poljakoff – Mayber, A., 1970. Effect of various salinity regimes on growth, leaf expansion and transpiration rate of bean plants. *Soil Science*, 109: 26 – 34.
- Meiri, A., Kamburoff, J. and Poljakoff – Mayber, A., 1971. Response of bean plant to sodium chloride and sodium sulphate salinization. *Ann. Bot.*, 35: 837 – 847.
- Μήτσιος, Κ. Ι., 2001. *Εδαφολογία*. Εκδόσεις Zymel, Αθήνα.
- Mohr, H. and Schopfer, P., 1995. *Plant physiology*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany.
- Navaro, J. M., Botella, M. A. and Martinez, V., 1999. Yield and fruit quality of melon plants grown under saline conditions in relation to phosphate and calcium nutrition. *J. Hort. Scie. Biot.*, 74 : 573 – 578.
- Oki, L. R. and Lieth J. H., 2004. Effects of changes in substrate salinity on the elongation of *Rosa hybrida* L. "Kardinal" stems. *Sci. Hort.* 101: 103 – 119.

- Ολύμπιος, Χ. Μ., 1994. Στοιχεία Γενικής Λαχανοκομίας. Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Ολύμπιος, Χ. Μ., 2001. Η τεχνική της καλλιέργειας των κηπευτικών στα θερμοκήπια. Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε., Αθήνα, σ. 631 – 665.
- Pardossi, A., Falossi, F., Malorgio, F., Incrocci, L. and Bellocchi, G., 2004. Empirical models of macronutrient uptake in melon plants grown in recirculating nutrient solution culture. *J. Plant Nutr.*, 27: 1261-1280.
- Pesarakli, M., Huber, J. T. and Tucker, T.C., 1989. Protein synthesis in green beans under salt stress conditions. *J. Plant Nutr.*, 12: 1105 – 1121.
- Raviv, M., Wallach, R., Silber, A. and Bar-Tal, A., 2002. Substrates and their Analysis. In: D. Savvas and H.C. Passam (eds). *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*. Embryo Publications, Athens, Greece, p. 25 – 101.
- Reid, R.J., 2000. Kinetics of nutrient uptake by plant cells. In: Rengel, Z. (Ed.). *Mineral Nutrition of Crops. Fundamental Mechanisms and Implications*. The Haworth Press, Inc., Binghamton, NY, USA., pp. 41-66.
- Rengel, Z., 2000. Physiological mechanisms underlying differential nutrient efficiency of crop genotypes. In: Rengel, Z. (Ed.). *Mineral Nutrition of Crops. Fundamental Mechanisms and Implications*. The Haworth Press, Inc., Binghamton, NY, pp. 227-265.
- Resh, M. H., 1997. *Hydroponic Food Production*. Woodbridge Press Publishing Company, Santa Barbara, California, USA.
- Saied, A. S., Keutgen, A. J. and Noga, G., 2003. Effects of NaCl Stress on Leaf Growth, Photosynthesis and Ionic Contents of Strawberry cvs. 'Elsanta' and 'Korona'. *Acta Horticulture*, 609: 67 – 75.
- Saied, A. S., Keutgen, A. J. and Noga, G., 2005. The influence of NaCl salinity on growth, yield and fruit quality of strawberry cvs. 'Elsanta' and 'Korona'. *Sci. Hort.*, 103, 289 – 303.
- Σάββας, Δ., 1998. Υδροπονία καλλωπιστικών φυτών. Τ.Ε.Ι. Ηπείρου, Άρτα.
- Σάββας, Δ., 2001. Θρέψη φυτών (σημειώσεις). Τ.Ε.Ι. Ηπείρου, Άρτα.
- Savvas, D., 2001. Nutritional Management of Vegetables and Ornamental Plants in Hydroponics. In: Dris, R., Niskanen, R. and Jain, S. M. (Ed.). *Crop Management and Postharvest Handling of Horticultural Products. Volume I – Quality Management*. Science Publishers, Inc., Plymouth, UK, pp. 37 – 87.

- Savvas, D., 2002a. Nutrient Solution Recycling. In: D. Savvas and H.C. Passam (eds). Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals. Embryo Publications, Athens, Greece, pp. 299 – 343.
- Savvas, D., 2002b. Automated replenishment of recycled greenhouse effluents with individual nutrients in hydroponics by means of two alternative models. Bio. Eng., 83: 225 – 236.
- Σάββας, Δ., 2003. Γενική Ανθοκομία. Εκδόσεις Έμβρυο, Αθήνα.
- Savvas, D. and Lenz, F., 1995. Nahrstoffaufnahme von Aubergine (*Solanum melongena* L.) in Hydrokultur. Gartenbauwissenschaft, 60: 29 – 33.
- Savvas, D. and Adamidis, K., 1999. Automated management of nutrient solutions based on target electrical conductivity, pH, and nutrient concentration ratios. J. Plant Nutr., 22: 1415 – 1432.
- Savas, D. and Manos, G., 1999. Automated composition control of nutrient solution in closed soilless culture systems. J. Agric. Eng. Res., 73: 29 – 33.
- Savvas, D. and Lenz, F., 2000. Effects of NaCl or nutrient-induced salinity on growth, yield, and composition of eggplants grown in rockwool. Sci. Hort., 84: 37 – 47.
- Savvas, D., V. Karagianni, A. Kotsiras, V. Demopoulos, I. Karkamisi and P. Pakou, 2003. Interactions between ammonium and pH of the nutrient solution supplied to gerbera (*Gerbera jamesonii*) grown in soilless culture. Plant and Soil, 254: 393-402.
- Savvas, D., Pappa, V.A., Gizas, G. and Maglaras, L., 2004. Influence of NaCl concentration in the irrigation water on salt accumulation in the root zone and yield in a cucumber crop grown in a closed hydroponic system. Almeria, Spain.
- Savvas, D., Pappa, V.A., Gizas, G. and Kotsiras, A., 2005a. NaCl accumulation in a cucumber crop grown in a completely closed hydroponic system as influenced by NaCl concentration in irrigation water. European J. Hort. Sci., 70: 217 – 223.
- Savvas, D., Kotsiras, A., Meletiou, G., Margariti, S. and Tsirogiannis, I., 2005b. Modeling the relationship between water uptake by cucumber and NaCl accumulation in a closed hydroponic system. HortScience, 40: 802 – 807.
- Savvas, D., Nasi, E., Moustaka, E., Mantzos, N., Barouchas, P., Passam, H.C., Olympios, C., 2006. Effects of ammonium nitrogen on lettuce grown on pumice in a closed hydroponic system. HortScience (in press).

- Schwarz, M., 1995. *Soiless Culture Management*. Springer – Verlag, Heidelberg, Germany.
- Seemann, J.R. and Critchley, C., 1985. Effects of salt stress on the growth, ion content, stomatal behaviour and photosynthetic capacity of a salt – sensitive species, *Phaseolus vulgaris* L. *Planta*, 164: 151 – 162.
- Shannon, M. C., Grieve, C.M., Lesch, S.M. and Draper, J.H., 2000. Analysis of Salt Tolerance in Nine Leafy Vegetables Irrigated with Saline Drainage Water. *J. Amer. Hort. Sci.*, 125: 658 – 664.
- Silberbush, M. and Ben – Asher, J., 2001. Simulation study of nutrient uptake by plants from soilless cultures as affected by salinity buildup and transpiration. *Plant and Soil*, 233: 59 – 69.
- Silberbush, M., Ben – Asher, J. and Ephrath, J. E., 2005. A model for nutrient and water flow and their uptake by plants grown in a soilless culture. *Plant and Soil*, 271: 309 – 319.
- Singh, J. N. and Mack, H. J., 1966. Effects of soil temperatures on growth, fruiting and mineral composition of snap beans. *Proceedings of the American Society of Horticultural Science*, 88: 378 – 383.
- Sivritepe, H. O., Sivritepe, N., Eris, A. and Turham, E., 2005. The effects of NaCl pre-treatments on salt tolerance of melons grown under long-term salinity. *Sci. Hort.*, 106: 568 – 581.
- Sonneveld, C., 1981. Items for application of macro-elements in soilless culture. *Acta Horticulturae*, 126: 187 – 195.
- 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 Solutions. In: D. Savvas and H.C. Passam (eds). *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*. Embryo Publications, Athens, Greece, p. 179 – 210.
- Sonneveld, C. and Welles, G. W. H., 1988. Yield and quality of rockwool - grown tomatoes as affected by variations in EC - value and climatic conditions. *Plant and Soil*, 111: 37 – 42.
- Sonneveld, C. and Van Der Burg, A.M.M., 1991. Sodium chloride salinity in fruit vegetable crops in soilless culture. *Netherlands J. Agric. Sci.*, 39: 115 – 122.
- Sonneveld, C. and Straver, N., 1994. *Nutrient Solutions for Vegetables and Flowers Grown in Water or Substrates*, 10th Edition, Serie: Voedingsoplossingen Glastuinbouw, No. 8, P.B.G. Aalsmeer, The Netherlands, 12 pp.

- Sonneveld, C., Van den Ende, J. and De Bes, S. S., 1990. Estimating the chemical composition of soil solutions obtaining saturation extracts or specific 1:2 by volume extracts. *Plant and Soil*, 122: 169 – 175.
- Sonneveld, C., Van den Bos, A. L. and Voogt, W., 2004. Modeling Osmotic Salinity Effects on Yield Characteristics of Substrate-Grown Greenhouse Crops. *J. Plant Nutr.*, 27: 1931 – 1951.
- Sonneveld, C. and Voogt, S. J., 1980. The application of manganese in nutrient solutions for tomatoes grown in a recirculating system. *Acta Horticulturae*, 98: 171 – 178.
- Sonneveld, C. and 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. and Spaans, L., 1999. A universal algorithm for calculation of nutrient solutions. *Acta Horticulturae*, 481: 331 – 339.
- Sonneveld, C., Baas, R., Nijssen, H.M.C. and de Hoog, J., 1999a. Salt tolerance of flower crops grown in soilless culture. *J. Plant Nutr.*, 22: 1033 – 1048.
- Steiner, A. A., 1980. The selective capacity of plants for anions and its importance for the composition and treatment of the nutrient solution. *Acta Horticulturae*, 98: 87 – 97.
- Steiner, A. A., 1984. The universal nutrient solution. *ISOSC Proceedings*, 6th International Congress on Soilless Culture: 633 – 649.
- Sternberg, P. D., Ulery, A. L. and Villa – C, M., 2001. Salinity and Boron Effects on Growth and Yield of Tepary and Kidney Beans. *HortScience*, 36: 1269 – 1272.
- Tadesse, T. and Nichols, M.A., 2003. The Effect of Conductivity on the Yield Quality of Sweet Pepper (*Capsicum annum* L.). *Acta Horticulture* 609 : 197 – 199.
- Taiz, L. and Zeiger, E., 2002. *Plant Physiology*. Sinauer Associates, Inc., Sunderland, USA, pp. 611 – 620.
- Tapia, M. L. and Dabed, R., 1984. Nutrient uptake by sweet pepper grown in quartz. In: *Proceedings, 6th International Congress on Soilless Culture: ISOSC*, Wageningen, The Netherlands, pp. 683 – 696.
- Yokoi, S., Bressan, R. A. and Hasegawa, P.M., 2002. Salt Stress Tolerance of Plants. *JIRCAS Working Report*, 25 – 33.