

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ, ΙΧΘΥΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΝΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Φυσιολογία – αποτελεσματικότητα φυτοαποκατάστασης  
ζιζανίων και καλλιεργούμενων ειδών σε διάφορα  
επίπεδα Cu

Πυριανιάν Νικόλαος

Βόλος, 2006

Φυσιολογία – αποτελεσματικότητα φυτοαποκατάστασης  
ζιζανίων και καλλιεργούμενων ειδών σε διάφορα  
επίπεδα Cu

Πυριανιάν Νικόλαος

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Βόλος, 2006

## **Τριμελής εξεταστική επιτροπή**

**Επιβλέπων**

**Π. Λόλας**

**Καθηγητής**

**Μέλος**

**Ν. Τσιρόπουλος**

**Αναπλ. Καθηγητής**

**Μέλος**

**Β. Σαμαράς**

**Ερευνητής Β'**

στην οικογένειά μου και τους  
πολύτιμους φίλους μου...

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με βοήθησαν για την πραγματοποίηση της μεταπτυχιακής μου διατριβής.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Π. Λόλα, Καθηγητή Ζιζανιολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, για την επιλογή του θέματος, την καθοδήγηση και τις συμβουλές του, καθώς και τις υποδείξεις – διορθώσεις στην συγγραφή της διατριβής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Ν. Τσιρόπουλο και τον ερευνητή Β' κ. Β. Σαμαρά για την βοήθειά τους στην ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής αυτής διατριβής.

Επίσης ευχαριστώ πολύ τους γεωπόνους Δρ. Θανάση Κορκόβελο και Αλέξη Σταράκη ΜΔΕ για τις υποδείξεις τους στην στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων του πειράματος. Ακόμα την Δρ. Ευαγγελία Γκόλια για τις υποδείξεις τις στην χρήση του φασματοφωτόμετρου ατομικής απορρόφησης.

Ευχαριστώ θερμά τους γεωπόνους και πάνω απ' όλα φίλους μου, Σαββίνα Τσατσαρή, Νατάσα Χαριλάου, Δήμο Δάενα, Κατερίνα Βουδούρη και Νάνσυ Γκαγκούλια, για την βοήθειά τους και την ηθική υποστήριξη που μου προσέφεραν κατά την διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου διατριβής.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, που ήταν δίπλα μου και με στήριζε ψυχολογικά και οικονομικά όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. ΦΥΤΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....</b>	<b>3</b>
2.1 Γενικά.....	3
2.2 Μηχανισμοί αποτοξικοποίησης.....	3
2.2.1. Υποβάθμιση.....	3
2.2.2. Εξαγωγή.....	5
2.2.3. Φυτοακινητοποίηση/Ριζοδιήθηση.....	6
2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αποκατάστασης εδαφών με τη χρήση φυτών.....	7
2.4 Το μέλλον της φυτοαποκατάστασης.....	8
2.5 Προσρόφηση και μεταφορά των βαρέων μετάλλων μέσα στα φυτά.....	9
2.6 Ο χαλκός (Cu) στο περιβάλλον.....	11
2.7 Ο χαλκός στο φυτό.....	12
2.8 Η σημασία του pH στη φυτοαποκατάσταση εδαφών επιβαρημένων με χαλκό (Cu).....	14
<b>3. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ.....</b>	<b>16</b>
3.1 Γενικά.....	16
3.2 Φυτοαποκατάσταση και χαλκός.....	28
3.3 Ο ρόλος του pH στη φυτοαποκατάσταση.....	32
<b>4. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....</b>	<b>43</b>
4.1. Γενικά.....	43
4.2. Πειράματα εργαστηρίου .....	43
4.2.1. Πειραματικό σχέδιο.....	43
4.2.2. Εγκατάσταση.....	44
4.2.2.α. Προετοιμασία εδάφους .....	44
4.2.2.β. Ενσωμάτωση του χαλκού στο έδαφος.....	44

4.2.2.γ. Σπορά και άρδευση.....	45
4.2.2.δ. Μετρήσεις.....	45
4.3. Πειράματα αγρού.....	47
4.3.1. Γενικά.....	47
4.3.2. Πειραματικό σχέδιο.....	47
4.3.3. Εγκατάσταση του πειράματος στον αγρό.....	47
4.3.4. Ενσωμάτωση χαλκού (Cu) στο έδαφος.....	48
4.3.5. Σπορά και άρδευση.....	48
4.3.6. Μετρήσεις.....	48
<b>5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>49</b>
5.1. Πείραμα εργαστηρίου.....	49
5.1.α. Χλωρό βάρος υπέργειου τμήματος του φυτού.....	49
5.1.β. Ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος του φυτού.....	54
5.1.γ. Χλωρό βάρος ρίζας.....	57
5.1.δ. Ξηρό βάρος ρίζας.....	61
5.1.ε. Ύψος φυτού.....	64
5.1.στ. Αριθμός φύλλων.....	68
5.1.ζ. Εμβαδόν 3 <sup>ο</sup> φύλλου.....	71
5.1.η. Χλωροφύλλη στο 3 <sup>ο</sup> φύλλο.....	75
5.1.θ. Συγκέντρωση Cu στο φυτό.....	79
5.2. Πείραμα αγρού.....	84
5.2.α. Χλωρό βάρος υπέργειου τμήματος του φυτού (pH = 8,3).....	84
5.2.β. Ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος του φυτού (pH = 8,3).....	85
5.2.γ. Χλωρό βάρος ρίζας (pH = 8,3).....	87
5.2.δ. Ξηρό βάρος ρίζας (pH = 8,3).....	88
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>91</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>95</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>104</b>



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ρύπανση των εδαφών από διάφορους ανόργανους ρύπους, όπως τα βαρέα μέταλλα και από διάφορους οργανικούς, όπως για παράδειγμα τα ζιζανιοκτόνα και τα εντομοκτόνα, αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους κινδύνους τόσο για το οικοσύστημα όσο και για τη δημόσια υγεία. Το οικοσύστημα, αποτελώντας έναν ευαίσθητο μηχανισμό είναι επιρρεπές σε καταστροφικές μεταβολές που οφείλονται στις επιπτώσεις που προέρχονται από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Έτσι η αποκατάσταση των εδαφών από τις μεταβολές αυτές κρίνεται αναγκαία.

Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών έχει στραφεί προς την ανεύρεση φυτικών ειδών, τόσο καλλιεργούμενων όσο και μη, τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την αποκατάσταση εδαφών τα οποία είναι επιβαρημένα με ρύπους και κυρίως με βαρέα μέταλλα όπως As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se και Zn.

Ο χαλκός (Cu), ο οποίος ανήκει στα βαρέα μέταλλα, είναι ένα στοιχείο που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην γεωργία. Σκευάσματα χαλκού χρησιμοποιούνται τόσο στην βιολογική γεωργία όσο και στην Ολοκληρωμένη Διαχείριση Καλλιεργειών. Τα σκευάσματα αυτά έχουν κυρίως φυτοπροστατευτικό χαρακτήρα και χρησιμοποιούνται για την πρόληψη ή/ και την αντιμετώπιση διαφόρων ασθενειών τόσο σε θερμοκηπιακές, όσο και σε υπαίθριες καλλιέργειες.

Σκοπός της έρευνας ήταν η μελέτη έξι (6) διαφορετικών φυτικών ειδών (2 καλλιεργούμενων και 4 ζιζανίων) για την αποτελεσματικότητά τους στην αποκατάσταση εδαφών επιβαρημένων με χαλκό μέσω της μελέτης διαφόρων μορφολογικών χαρακτηριστικών τους καθώς και της ποσότητας χαλκού που συγκέντρωσαν τόσο στο υπέργειο, όσο και υπόγειο τμήμα τους.

Τα πειράματα διεξήχθησαν σε φυτοδοχεία αλλά και στον αγρό. Τα δύο εδάφη που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ένα όξινο με pH 4,6 και ένα αλκαλικό με pH 8,3. Το πειραματικό σχέδιο που χρησιμοποιήθηκε τόσο για τα πειράματα σε φυτοδοχεία όσο και για το πείραμα αγρού ήταν οι τυχαιοποιημένες πλήρεις ομάδες (Randomized Complete Blocks – RCB), με τρεις επαναλήψεις για κάθε επέμβαση. Τα 6 φυτικά είδη που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δύο καλλιεργούμενα: το καλαμπόκι (*Zea mays*) και ο ηλίανθος (*Helianthus annuus*) και τέσσερα ζιζάνια: το βλίτο (*Amaranthus retroflexus*), ο βρόμος (*Bromus spp.*), η ήρα (*Lolium multiflorum*) και το άγριο σινάπι (*Sinapis arvensis*).

Οι συγκεντρώσεις Cu που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα σε φυτοδοχεία ήταν 0, 5 10, 20, 40, 80, 120, 160 και 200 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους, τόσο για το αλκαλικό, όσο και για το όξινο έδαφος, ενώ για τα πειράματα αγρού οι συγκεντρώσεις του Cu ήταν 0, 20, 40 και 60 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους.

Έγινε παρακολούθηση των παραμέτρων: χλωρό και ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος των φυτών και της ρίζας, το ύψος των φυτών, ο αριθμός των φύλλων τους, το εμβαδόν του 3<sup>ου</sup> φύλλου, η τιμή SPAD στο 3<sup>ο</sup> φύλλο τους, καθώς και η συγκέντρωση χαλκού στο υπέργειο και υπόγειο τμήμα (ριζικό σύστημα) των φυτών.

Στα εργαστηριακά πειράματα σε φυτοδοχεία σε όξινο έδαφος (pH=4,6) το σινάπι είχε την μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή σε σχέση με τον μάρτυρα με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος, ενώ τα είδη βρόμος και καλαμπόκι, ήταν εκείνα που παρουσίασαν την μικρότερη αρνητική μεταβολή. Το καλαμπόκι ήταν το είδος που είχε την μεγαλύτερη συγκέντρωση χαλκού στην ρίζα του (3,11 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηράς μάζας) ενώ η μεγαλύτερη συγκέντρωση χαλκού στο υπέργειο τμήμα του φυτού παρατηρήθηκε στην ήρα (0,465 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηράς μάζας.).

Η σειρά από την μεγαλύτερη προς την μικρότερη συγκέντρωση Cu στα φυτά και η αντίστοιχη συγκέντρωση Cu στο έδαφος ήταν για το υπέργειο τμήμα: ήρα, 0,465 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηράς μάζας στην επέμβαση 120 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους, ηλίανθος, 0,201 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηράς μάζας στην επέμβαση 200 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους, βρόμος, 0,08 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηράς μάζας στην επέμβαση 200 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους, καλαμπόκι, 0,062 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηράς μάζας στην επέμβαση 200 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους, σινάπι, 0,04 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηράς μάζας στην επέμβαση 40 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους και βλήτο, 0,045 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηράς μάζας στην επέμβαση 120 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους

Αντίστοιχα, η συγκέντρωση Cu στην ρίζα ήταν: καλαμπόκι, 3,11 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηράς μάζας στην επέμβαση 200 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους, ήρα, 1,64 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηράς μάζας στην επέμβαση 120 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους, ηλίανθος, 0,91 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηράς μάζας στην επέμβαση 200 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους, βρόμος, 0,61 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηράς μάζας στην επέμβαση 200 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους, βλήτο, 0,42 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηράς μάζας στην επέμβαση 120 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους και σινάπι, 0,16 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηράς μάζας στην επέμβαση 40 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους.

Στα εργαστηριακά πειράματα που διεξήχθησαν σε αλκαλικό έδαφος (pH=8,3), βρέθηκε ότι το βλήτο παρουσίασε την μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή σε σχέση με

τον μάρτυρα, σε όλα τα χαρακτηριστικά που μελετήθηκαν, ενώ στο καλαμπόκι παρατηρήθηκε η μικρότερη αρνητική μεταβολή.

Η συγκέντρωση του χαλκού στα φυτά, μελετήθηκε στα ζιζάνια βρόμο και ήρα. Βρέθηκε ότι η ήρα είχε την ικανότητα να απορροφά και να συγκρατεί μεγαλύτερη ποσότητα χαλκού τόσο στο υπέργειο τμήμα του φυτού, όσο και στην ρίζα σε σχέση με τον βρόμο.

Η μεγαλύτερη συγκέντρωση χαλκού που μετρήθηκε στην ήρα και τον βρόμο και η αντίστοιχη συγκέντρωση του χαλκού στο έδαφος όπου και παρατηρήθηκε ήταν, για το υπέργειο τμήμα: ήρα,  $1,5 \cdot 10^{-4}$  mgCu kg<sup>-1</sup> ξηράς μάζας στην επέμβαση 200 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους και στον βρόμο,  $1,6 \cdot 10^{-4}$  mgCu kg<sup>-1</sup> ξηράς μάζας στην επέμβαση 200 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους. Για την ρίζα ήταν: ήρα, 0,68 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηράς μάζας στην επέμβαση 200 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους και για τον βρόμο, 0,4 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηράς μάζας στην επέμβαση 200 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους.

Στο πείραμα αγρού (pH = 8,3), βρέθηκε ότι η ήρα παρουσίασε την μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή σε σχέση με τον μάρτυρα σε όλα τα χαρακτηριστικά που μελετήθηκαν, ενώ στην περίπτωση του ηλίανθου, η αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος είχε πολύ μικρή αρνητική επίδραση στα χαρακτηριστικά που μελετήθηκαν σε σχέση με τον μάρτυρα.

Συμπερασματικά, στο όξινο έδαφος (pH = 4,6), από τα φυτικά είδη που μελετήθηκαν αυτά που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε ένα πρόγραμμα φυτοαποκατάστασης εδαφών επιβαρυνμένων με Cu φαίνεται ότι είναι η ήρα και ο ηλίανθος, ενώ στο αλκαλικό έδαφος (pH= 8,3), το καλαμπόκι και ο ηλίανθος.

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η καθημερινή υποβάθμιση του οικοσυστήματος από την εδαφική ρύπανση που προκαλούν οι ανόργανοι ρύποι όπως τα βαρέα μέταλλα και διάφοροι άλλοι οργανικοί όπως τα ζιζανιοκτόνα και τα εντομοκτόνα , αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους κινδύνους για το οικοσύστημα και τη δημόσια υγεία. Συνέπεια αυτού είναι ο ευαίσθητος μηχανισμός του οικοσυστήματος να απειλείται από τις καταστροφικές μεταβολές που οφείλονται στις εισροές που προέρχονται από την ανθρωπογενή δραστηριότητα. Αναγκαία λοιπόν κρίνεται η αποκατάσταση του εδάφους από τις παραπάνω καταστροφικές εισροές.

Η διαφορά στη χημική συμπεριφορά των ανόργανων ρύπων από τους οργανικούς έγκειται στο ότι οι οργανικοί ρύποι μπορούν να αποδομηθούν σε λιγότερο τοξικές έως καθόλου τοξικές ενώσεις, ενώ οι ανόργανοι και κυρίως τα βαρέα μέταλλα δεν αποδομούνται και παρουσιάζουν την ικανότητα να ενώνονται με άλλες ουσίες σχηματίζοντας ακόμα πιο τοξικές ενώσεις. Απόρροια των παραπάνω αποτελεί η αναγκαιότητα της απομάκρυνσής τους ή της αδρανοποίησής τους στο έδαφος ώστε να μην αποτελούν κίνδυνο.

Οι παραδοσιακές μέθοδοι αποκατάστασης εδαφών επιβαρημένων με μέταλλα όπως η μηχανική κατεργασία ( πχ. απομάκρυνση εδαφικού στρώματος όπου εμφανίζεται το μέταλλο σε μεγάλη συγκέντρωση κ.α.), η θερμική ( πχ. εφαρμογή υψηλών θερμοκρασιών, καύση κ.α.), η φυσική ( πχ. έκπλυση κ.α), η χημική ( πχ. εφαρμογή σκευασμάτων που δεσμεύουν ή/ και καθιστούν μη επιβλαβή τα μέταλλα) αποτελούν μία κάποια λύση, η οποία όμως είναι μη εφικτή για πολλούς γεωργούς, αφού το κόστος τους είναι αποτρεπτικό. Οι ίδιοι σε έρευνά τους αναφέρουν ότι για την αποκατάσταση ενός τόνου εδάφους με μηχανικό τρόπο απαιτούνται από 50 δολάρια έως και 1000 δολάρια σε ειδικές περιπτώσεις. Επιπλέον, οι τεχνικές αυτές, επιδρούν αρνητικά τόσο στην μηχανική σύσταση του εδάφους, εφόσον την αλλοιώνουν, όσο και στη γονιμότητά του.

Έτσι η έρευνα επικεντρώθηκε στην εύρεση και εφαρμογή νέων τεχνικών, μία από τις οποίες είναι και η φυτοαποκατάσταση η οποία συνιστά μία οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον τεχνική. Το κόστος της τεχνικής αυτής ανέρχεται περί τα 0,05 δολάρια το κυβικό μέτρο εδάφους.

Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών έχει στραφεί προς την ανεύρεση φυτικών ειδών, τόσο καλλιεργούμενων όσο και μη (π.χ. ζιζάνια), τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την αποκατάσταση εδαφών τα οποία είναι

επιβαρημένα με ρύπους και κυρίως με βαρέα μέταλλα όπως As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se και Zn.

Ο χαλκός (Cu), ο οποίος ανήκει στα βαρέα μέταλλα, είναι ένα στοιχείο που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην γεωργία. Σκευάσματα χαλκού χρησιμοποιούνται τόσο στην βιολογική γεωργία όσο και στην Ολοκληρωμένη Διαχείριση Καλλιεργειών. Τα σκευάσματα αυτά έχουν κυρίως φυτοπροστατευτικό χαρακτήρα και χρησιμοποιούνται για την πρόληψη ή/ και την αντιμετώπιση διαφόρων ασθενειών τόσο σε θερμοκηπιακές, όσο και σε υπαίθριες καλλιέργειες.

Αν και ο χαλκός αποτελεί ένα απαραίτητο ιχνοστοιχείο, τόσο για τα φυτά, όσο και για τον άνθρωπο, μεγάλες συγκεντρώσεις αυτού στο περιβάλλον δημιουργούν τοξικές συνθήκες. Πηγές των εισροών χαλκού στο περιβάλλον αποτελούν διάφορες ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως τα ορυχεία, τα εργοστάσια (κατεργασίας χαλκού, γεωργικών φαρμάκων, καλωδίων κ.α.), καθώς και διάφορες γεωργικές εφαρμογές. Αποτέλεσμα των εισροών αυτών μπορεί να είναι η επιβάρυνση των εδαφών με υψηλές συγκεντρώσεις χαλκού. Έτσι η χρήση φυτών για την αποκατάσταση τέτοιων εδαφών κρίνεται αναγκαία.

Σκοπός της έρευνας αυτής ήταν η μελέτη έξι (6) διαφορετικών φυτικών ειδών (2 καλλιεργούμενων και 4 ζιζανίων) για την αποτελεσματικότητά τους στην αποκατάσταση εδαφών επιβαρημένων με χαλκό μέσω διαφόρων μορφολογικών χαρακτηριστικών τους καθώς και της ποσότητας χαλκού που συγκέντρωσαν τόσο στο υπέργειο, όσο και υπόγειο τμήμα τους.

## 2. ΦΥΤΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

### 2.1. Γενικά

Ως φυτοαποκατάσταση ορίζεται κάθε σύστημα στο οποίο χρησιμοποιούνται φυτά, είτε για την μείωση και/ ή το μηδενισμό των περιβαλλοντικών ρύπων σε εδάφη, ιζήματα ή νερά, είτε για να τους καταστήσουν ακίνδυνους (Λόλας, 2001). Δηλαδή, καλλιεργούνται (ή ενσωματώνονται στο έδαφος) ορισμένα είδη φυτών για κάποιο χρονικό διάστημα και αυτά αφαιρούν τον περιβαλλοντικό ρύπο πχ. από το έδαφος ή μεταβάλλουν τις φυσικοχημικές ιδιότητες του περιβαλλοντικού ρύπου μέσα στο έδαφος και έτσι αυτός δεν παρουσιάζει πλέον κίνδυνο για τον άνθρωπο ή το περιβάλλον (Λόλας, 2003).

Η λέξη «φυτοαποκατάσταση» προέρχεται από την αγγλική λέξη «phytoremediation». Η λέξη αυτή περιέχει το phyto- που προέρχεται από την ελληνική λέξη «φυτό» και το -remediation, η οποία μεταφράζεται ως θεραπεύω – αποκαθιστώ.

Η φυτοαποκατάσταση συνιστά ένα πολύπλοκο σύστημα με απλή λειτουργία. Αν και ο στόχος είναι ένας – αποκατάσταση του περιβάλλοντος – οι μηχανισμοί για να επιτευχθεί αυτός είναι αρκετοί. Τα «μονοπάτια» που εξηγούν την φυτοαποκατάσταση αναπτύσσονται παρακάτω:

### 2.2. Μηχανισμοί φυτοαποκατάστασης

#### 2.2.1. Διάσπαση (rhizodegradation, phytodegradation)

Η ριζόσφαιρα, ή η περιοχή του χώματος 1mm από την ρίζα των φυτών, είναι ένα δυναμικό και σύνθετο περιβάλλον (Olson *et al*, 2003). Η αυξημένη μικροβιακή δραστηριότητα και η βιομάζα σε αυτήν την περιοχή της αλληλεπίδρασης φυτών-μικροβίων αναφέρεται ως "επίδραση της ριζόσφαιρας" και είναι κρίσιμη για τη πραγματοποίηση της βιοαποκατάστασης (Olson *et al*. 2003). Οι ρίζες των φυτών εκκρίνουν ένζυμα και άλλες οργανικές ουσίες. Αυτές οι ουσίες που απελευθερώνονται ενισχύουν σε μεγάλο βαθμό τον αριθμό της μικροβιακής μάζας και τη μεταβολική της δραστηριότητα, και αυξάνουν τη διάσπαση και την μείωση της διαθεσιμότητας των ρύπων για την πρόσληψή τους από τις ρίζες (Christensen - Kirsh, 1996). Η διεργασία κατά την οποία ένας περιβαλλοντικός ρύπος διασπάται ή μεταβολίζεται από την δράση της μικροβιακής μάζας, η οποία δράση ενισχύεται από

το περιβάλλον που δημιουργεί η ριζόσφαιρα είναι γνωστή ως ριζοδιάσπαση (McCutcheon και Schnoor, 2003).

Το ποσό και το είδος των ενώσεων που απελευθερώνονται στο έδαφος από τις ρίζες και η επίδραση των μικροβιακών αποικιών στην ριζόσφαιρα είναι συγκεκριμένες για κάθε είδος φυτού (Olson *et al*, 2003). Η συνεργιστική αυτή δράση, φυτού – μικροβίων, βασίζεται στην ανταλλαγή νερού και θρεπτικών ουσιών και παρουσιάζεται συχνά μεταξύ των ριζών και των εξειδικευμένων εδαφολογικών μυκήτων ή των μυκοριζών. Αυτή η σχέση ενισχύει την ανάπτυξη των φυτών (Banks *et. al*, 2000).

Αν και τα φυτά δεν είναι γενικά σε θέση να χρησιμοποιούν τους περιβαλλοντικούς ρύπους που απορροφούν, όπως PAHs, έχει παρατηρηθεί ότι αυτά μπορούν και αναπτύσσονται και επιταχύνουν τον μεταβολισμό των υδρογονανθράκων με την ενίσχυση της μικροβιακής δραστηριότητας (Banks *et al*, 2000). Το ριζικό σύστημα μπορεί να υποβοηθήσει την μικροβιακή διάσπαση των οργανικών ρύπων μεγάλου μοριακού βάρους (όπως PAHs) (McCutcheon *et al*, 2003). Σε μερικές περιπτώσεις, τα ένζυμα που εκκρίνονται από την ρίζα είναι σε θέση να διασπούν οργανικές ενώσεις χωρίς μικροβιακή βοήθεια, μια διαδικασία γνωστή και ως φυτοδιάσπαση (McCutcheon και Schnoor, 2003).

Τα φυτά έχουν την ικανότητα να μετασχηματίζουν ορισμένους περιβαλλοντικούς ρύπους μέσω αντιδράσεων οξειδωσης ή αναγωγής, συμπλοκοποίηση (μία ξένη ένωση που ενώνεται από ένα αμινοξύ ή ένα μόριο γλουταθειόνης) και της απόθεσης των συμπλόκων στα χυμοτόπια ή /και στα κυτταρικά τοιχώματα (Dzantor και Beauchamp, 2002; Subramanian και Shanks, 2003).

Η διαθεσιμότητα ενός περιβαλλοντικού ρύπου για την πρόσληψή του και τον μετασχηματισμό του εξαρτάται επίσης και από την ηλικία του ρύπου και βεβαίως το είδος των φυτών (US EPA, 2000). Αυτή η διεργασία κατά την οποία ο περιβαλλοντικός ρύπος διασπάται από την μεταβολική δραστηριότητα των φυτών αναφέρεται ως φυτοδιάσπαση (phytodegradation) ή φυτομετατροπή (phytotransformation). Αυτοί οι όροι μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και στην περίπτωση όπου η διάσπαση των περιβαλλοντικών ρύπων γίνεται έξω από τα φυτά με την δράση των ενζύμων που απελευθερώνονται από τα φυτά (US EPA, 2000).

### 2.2.2. Εξαγωγή (phytoextraction/phytomining, rhizofiltration, phytovolatilization)

Εξαρτώμενη από το είδος των φυτών και τον περιβαλλοντικό ρύπο, η άμεση πρόσληψη του τελευταίου μπορεί να θεωρηθεί είτε μια παθητική ή /και μία ενεργητική διεργασία (Chiou, 2002). Η κύρια διεργασία είναι η παθητική μεταφορά με κύριο μέσο μεταφοράς το νερό ή το εδαφικό διάλυμα. Στην ενεργητική μεταφορά τα φυτά καταναλώνουν ενέργεια που προέρχεται από διάφορα θρεπτικά στοιχεία, αλλά και από διάφορα οργανικά και ανόργανα ιόντα (Chiou, 2002).

Τα φυτά χρειάζονται τα μέταλλα, όπως ψευδάργυρο και χαλκό, καθώς επίσης και θρεπτικές ουσίες, για να αναπτυχθούν κανονικά. Όταν το έδαφος που περιβάλλει τις ρίζες των φυτών είναι ανεπαρκές στα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία, τα φυτά θα παρουσιάσουν συμπτώματα τροφοπενιών (Stern, 2000). Μερικά φυτά, καλούμενα ως υπερσυσσωρευτές, δεν κάνουν καμία διάκριση μεταξύ των βαρέων μετάλλων (όπως το σελήνιο, το κάδμιο) και εκείνων των μετάλλων που είναι θρεπτικά απαραίτητα για την αύξησή τους (Raskin και Ensley, 2000; Stern, 2000). Αυτά τα φυτά απορροφούν τα μέταλλα μέσω της ρίζας και τα αποθηκεύουν στα χυμοτόπια των κυττάρων, όπου οι ιστοί, έχει μετρηθεί να περιέχουν 1.000 έως 10.000 mgkg<sup>-1</sup> των διάφορων βαρέων μετάλλων (Stern, 2000).

Τα βαρέα μέταλλα, όπως ο ψευδάργυρος, ο χαλκός, το κάδμιο και ο μόλυβδος, μπορούν να απορροφηθούν από τις ρίζες και τους βλαστούς και των υδρόβιων φυτών (Fritoff και Greger, 2003). Τα μέταλλα μπορούν να προσρροφηθούν και να απομακρυνθούν ή να συσσωρευτούν και στις ρίζες των αυτοφυών φυτών.

Ο σημαντικότερος παράγοντας του μηχανισμού φυτοαπομάκρυνσης είναι η διαθεσιμότητα του ρύπου (Dzantor και Beanchamp, 2002). Η λιποφιλικότητα, ή η μεταφορά μίας χημικής ουσίας από το εδαφικό διάλυμα στα λιπίδια των κυττάρων των φυτών, είναι ο πρωταρχικός παράγοντας στην ικανότητα των φυτών να απορροφούν και να μεταφέρουν τις οργανικές χημικές ουσίες (McCutcheon *et al*, 2003). Μία τέτοια χημική ένωση μπορεί να μεταφερθεί στα κύτταρα φυτών, και να μεταβολιστεί με παρόμοιο τρόπο, όπως γίνεται στο ήπαρ των θηλαστικών. Αυτή η διεργασία στα φυτά αναφέρεται από τους Dzantor και Beauchamp (2002) ως "πράσινο ήπαρ".

Η φυτοεξάτμιση (phytovolatilization) είναι μία διεργασία στην οποία οι περιβαλλοντικοί ρύποι μπορούν να προσληφθούν και να μετασχηματιστούν σε



πτητική μορφή, και να διαφύγουν στην ατμόσφαιρα μέσω των ριζών, των μίσχων ή των φύλλων του φυτού (Doucette, Bugbee, Smith, Pajak, και Ginn, 2003). Το σελήνιο, παραδείγματος χάριν, μπορεί να μετασχηματιστεί στο πτητικό διμεθυλικό σεληνίδιο, που είναι γνωστό ότι δεν συνιστά κίνδυνο για την υγεία όταν εισέλθει στην ατμόσφαιρα. Οι πτητικές οργανικές ενώσεις μπορούν να ληφθούν και ενεργά να απελευθερωθούν μέσω των ριζών, των μίσχων και του φυλλώματος (Doucette *et al.*, 2003). Η χρησιμοποίηση της φυτοεξάτμισης (phytonovolatilization) απαιτεί μια λεπτομερή εξέταση των πιθανών κινδύνων υγείας που συνδέονται με την μεταφορά με τον αέρα του περιβαλλοντικού ρύπου ή της τροποποιημένης μορφής του.

### **2.2.3. Φυτοακίνητοποίηση (phytostabilization) / Ριζοδιήθηση (rhizofiltration)**

Η ρίζα και οι μικροβιακή δράση μπορούν να ακίνητοποιήσουν τους οργανικούς και μερικούς ανόργανους περιβαλλοντικούς ρύπους με τη δέσμευση τους στα εδαφολογικά μόρια και κατά συνέπεια, να μειωθεί η μετακίνηση του ρύπου στα υπόγεια νερά (Christensen - Kirsh, 1996). Η διεργασία κατά την οποία το μολυσμένο χώμα κατακρατείται από την ρίζα, με αποτέλεσμα την μείωση της κινητικότητας του περιβαλλοντικού ρύπου αναφέρεται ως φυτοακίνητοποίηση (phytostabilization) (McCutcheon και Schnoor, 2003).

Η διεργασία κατά την οποία τα βαρέα μέταλλα που βρίσκονται διαλυμένα στο νερό προσλαμβάνονται ή συγκρατούνται επάνω στις ρίζες των φυτών αναφέρεται ως ριζοδιήθηση (rhizofiltration). Τα φυτά άλλοτε μπορούν και άλλοτε όχι να προσλαμβάνουν και να μεταφέρουν τον περιβαλλοντικό ρύπο. Ο περιβαλλοντικός ρύπος μπορεί να προσληφθεί, να ακίνητοποιηθεί ή/ και να συσσωρευτεί στο ριζικό σύστημα του φυτού. Γενικά, αυτή η διεργασία συνδέεται με τους περιβαλλοντικούς ρύπους που είναι διαλυτοί στο νερό παρά σε αυτούς που βρίσκονται προσροφημένοι πάνω στα εδαφικά μόρια (US EPA, 2000). Αυτή η διαδικασία εξαρτάται σημαντικά από τα επίπεδα του pH του περιβάλλοντος του φυτού και η συγκομιδή των φυτών που χρησιμοποιούνται πρέπει να γίνεται συχνά ώστε να μειώνεται η επανεισαγωγή του μολυσματικού παράγοντα στο εδαφικό διάλυμα.

### **2.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αποκατάστασης εδαφών με την χρήση φυτών**

Τα πλεονεκτήματα της αποκατάστασης με φυτά ρυπασμένων εδαφών και υδάτων από βαρέα μέταλλα είναι τα εξής:

- Μικρό κόστος για την αποκατάσταση εδαφών και υδάτων συγκρινόμενο με άλλες μεθόδους βελτίωσης
- Η φυτοαποκατάσταση συνιστά μία φυσική και με ευχάριστο αποτέλεσμα μέθοδο, καθώς δημιουργεί ζώνες πρασίνου σε υποβαθμισμένες περιοχές. Αυτές οι ζώνες δημιουργούνται στην περίπτωση που τα φυτά που χρησιμοποιούνται είναι πολυετή και δέντρα.
- Μείωση της δυνατότητας μεταφοράς των ρύπων με τον αέρα και τη διάβρωση των εδαφών εφόσον οι τελευταίοι σταθεροποιούνται ή μεταλλάσσονται από τα φυτά.
- Μικρότερος όγκος τοξικών ρυπασμένων φυτικών υπολειμμάτων λόγω της υπερσυσσώρευσης των ρυπαντών. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση φυτών υπερσυσσωρευτών.
- Απομάκρυνση πολλών κατηγοριών ρύπων με τα ίδια φυτά, εφόσον έχει αποδειχθεί ότι πολλά φυτά μπορούν να προσλάβουν περισσότερους από έναν ρύπο.

Τα μειονεκτήματα της αποκατάστασης με φυτά ρυπασμένων εδαφών και υδάτων από βαρέα μέταλλα είναι τα εξής:

- Οι ρυθμοί αποκατάστασης των εδαφών είναι βραδείς και δεν επιτυγχάνονται άμεσα τα επιθυμητά επίπεδα των ρύπων.
- Η αποτελεσματικότητα της βελτίωσης των εδαφών με φυτά καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη φύση του ρύπου και την ικανότητά του να διασπάται από φυσικούς μηχανισμούς.
- Υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να εισέλθουν στην τροφική αλυσίδα τα επιβαρυνόμενα με ρύπους φυτά. Πολλά από τα φυτά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποκατάσταση εδαφών είναι καλλιεργούμενα είδη, τα οποία με λάθος χειρισμούς ή επιτηδευμένους να καταλήξουν τροφή για

διάφορους οργανισμούς.

- Τα φυτικά υπολείμματα μπορεί να αποτελέσουν υλικά που θα ρυπάνουν το περιβάλλον στην περίπτωση που δεν υπάρχει σχέδιο για την ασφαλή διαχείρισή τους.
- Πιθανότητα ρύπανσης του περιβάλλοντος από τη φυλλόπτωση των δέντρων που έχουν χρησιμοποιηθεί για την αποκατάσταση διαφόρων περιοχών.

## 2.4. Το μέλλον της φυτοαποκατάστασης

Αν και η φυτοαποκατάσταση συνιστά μία ενδεδειγμένη, ασφαλή και αποτελεσματική μέθοδο δεν παύει να αποτελεί έναν τομέα που επιδέχεται βελτίωση. Η βελτίωση αυτή αναφέρεται κυρίως στην αποτελεσματικότερη αποκατάσταση του περιβάλλοντος που είναι επιβαρημένο με κάποιον ή κάποιους ρύπους. Τις βελτιώσεις αυτές έρχεται να τις προωθήσει η επιστημονική έρευνα και κυρίως η βιοτεχνολογία.

Παγκοσμίως, ένας μεγάλος αριθμός ερευνητών ασχολείται με την ανεύρεση νέων ειδών φυτών, τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά στην αποκατάσταση εδαφών και υδάτων. Το εύρος αυτών το φυτών εκτείνεται από το συνηθέστερο ζιζάνιο έως τα πιο σπάνια είδη πολυετών και δέντρων.

Ο τομέας της βιοτεχνολογίας είναι αυτός όπου έχει παρουσιάσει τα σημαντικότερα επιτεύγματα. Βασική αρχή αποτελεί η μεταφορά γονιδίων από διάφορους οργανισμούς στα φυτά ώστε να ενισχυθεί η αποτελεσματικότητά τους στην φυτοαποκατάσταση. Αυτά τα φυτά που ονομάζονται διαγονιδιακά, φέρουν ιδιότητες που εκφράζουν το γενετικό υλικό που πάρηκε από άλλους οργανισμούς. Τα χαρακτηριστικά που επιδιώκεται να πάρουν τα φυτά παρουσιάζονται στον τομέα της ικανότητας που έχουν κάποιοι οργανισμοί να μεταβολίζουν κάποια στοιχεία που θα ήταν τοξικά για άλλους οργανισμούς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα όπως αναφέρεται από τους Bennett *et. al.* (2003) αποτελεί το φυτό *Brassica juncea*, στο οποίο εισήχθη το γονίδιο *gsh1* από το βακτήριο *E. coli*, και απέκτησε την ικανότητα να μεταβολίζει αποτελεσματικότερα οργανικές ενώσεις που περιείχαν Cd, Cu και Pb.

## **2.5. Προσρόφηση και μεταφορά των βαρέων μετάλλων μέσα στα φυτά**

Η διεργασία της συσσώρευσης μετάλλων περιλαμβάνει διάφορα βήματα, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

### **I. Αποδέσμευση του μετάλλου από το εδαφικό υπόστρωμα**

Πολλά μέταλλα που βρίσκονται στο έδαφος υπάρχουν σε αδιάλυτες μορφές. Τα φυτά για να τα αποδεσμεύσουν χρησιμοποιούν δύο μεθόδους. Η πρώτη μέθοδος απαιτεί την οξίνιση της περιοχής της ριζόσφαιρας μέσω της λειτουργίας αντλιών πρωτονίων που βρίσκονται στις μεμβράνες των κυττάρων, ενώ η δεύτερη απαιτεί την έκκριση από το φυτό χηλικών ενώσεων οι οποίες είναι ικανές να σχηματίζουν δεσμούς με τα μέταλλα και να είναι προσροφήσιμες από την ρίζα του φυτού.

Τα φυτά έχουν εξελίξει αυτές τις διαδικασίες ώστε να μπορούν να αποδεσμεύουν τα απαραίτητα για αυτά μέταλλα με συνέπεια να προσλαμβάνουν και τοξικά μέταλλα που ελευθερώθηκαν στο εδαφικό διάλυμα από την δράση των ουσιών που εκκρίνονται από τις ρίζες (Blaylock και Huang 2000).

### **II. Πρόσληψη από την ρίζα**

Τα διαλυτά μέταλλα μπορούν να εισέλθουν στη ρίζα συμπλαστικά μέσω της πλασματικής μεμβράνης των κυττάρων της ενδοδερμίδας ή αποπλαστικά μέσω των μεσοκυττάρων διαστημάτων. Ενώ είναι δυνατό για τις διαλυτές ουσίες να μετακινηθούν προς τα πάνω μέσα στο φυτό με την αποπλαστική ροή, η αποδοτικότερη μέθοδος είναι μέσω του αγγειακού συστήματος των φυτών που ονομάζεται ξύλωμα. Για να εισαχθούν στο ξύλωμα, οι διαλυτές ουσίες πρέπει να διασχίσουν την ζώνη Caspari. Τα περισσότερα τοξικά μέταλλα διασχίζουν τις μεμβράνες των κυττάρων μέσω αντλιών και διόδων που προορίζονται για να μεταφέρουν τα απαραίτητα στοιχεία μέσα στο φυτό (Hall, 2002; Meharg και Macnair 1992a, 1992b).

### **III. Μεταφορά στα φύλλα**

Με την ροή του νερού μέσα στο ξύλωμα μεταφέρονται διάφορα ανόργανα στοιχεία όπως διάφορα μέταλλα, τα οποία καταλήγουν στα φύλλα του φυτού. Τα

μέταλλα αυτά καταλήγουν στα κύτταρα του φύλλου αφού διαπεράσουν πρώτα τις κυτταρικές μεμβράνες. Οι τύποι κυττάρων όπου τα μέταλλα καταλήγουν διαφέρουν ανά είδος φυτού συσσωρευτή. Παραδείγματος χάριν, το *Thlaspi caerulescens* βρέθηκε να έχει περισσότερο Zn στα κύτταρα της επιδερμίδας απ' ότι στα κύτταρα του μεσοφύλλου (Kupfer *et. al.*, 1999), ενώ το *Arabidopsis halleri* συσσωρεύει κατά προτίμηση το Zn στα κύτταρα του μεσοφύλλου και όχι στα επιδερμικά κύτταρα (Kupfer *et al* 2000).

#### IV. Αποτοξίνωση/ δημιουργία χηλικών ενώσεων

Κατά την διάρκεια της μετακίνησής τους τα μέταλλα μπορούν να μετατραπούν σε ενώσεις λιγότερο τοξικές ή να σχηματίσουν άλλες ενώσεις με διαφορετικές ιδιότητες. Οι διάφορες οξειδωμένες μορφές των τοξικών στοιχείων έχουν διαφορετικούς τρόπους πρόσληψης, μεταφοράς, απομάκρυνσης ή τοξικότητας στα φυτά. Η δημιουργία χηλικών ενώσεων με τα τοξικά μέταλλα, έχουν και αυτές πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά ανάλογα τις συνθήκες που επικρατούν στο φυτό. Τα περισσότερα φυτά παράγουν χηλικές ενώσεις οι οποίες περιέχουν θεικές ομάδες. Τα θειικά βιοσυνθετικά μονοπάτια έχουν δείξει ότι είναι πολύ αποτελεσματικά στις περιπτώσεις φυτών υπερσυσσωρευτών (Pickering *et. al.*, 2003, Van Huysen *et. al.*, 2004). Το στρεσάρισμα των φυτών από οξειδωτικές συνθήκες στο εσωτερικό του, είναι το πιο κοινό σύμπτωμα στην περίπτωση συσσώρευσης βαρέων μετάλλων μέσα στο φυτό και η αύξηση της αντιοξειδωτικής ικανότητας των υπερσυσσωρευτών επιτρέπει την ανοχή των τελευταίων σε υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων (Freeman *et. al.*, 2004).

#### V. Απομάκρυνση / Αεριοποίηση

Το τελικό στάδιο για την συσσώρευση των περισσότερων μετάλλων είναι η απομάκρυνση του μετάλλου με διάφορες λειτουργίες του κυττάρου. Τα μέταλλα καταλήγουν στο χυμοτόπιο των κυττάρων αφού πρώτα διαπεράσουν την μεμβράνη του χυμοτοπίου. Το μέταλλο μπορεί να έχει την μορφή ιόντων ή να έχει δημιουργήσει σύμπλοκα με άλλες ενώσεις. Τα μέταλλα μπορούν επίσης να παραμείνουν στα τοιχώματα των κυττάρων, χωρίς να μπορούν να μετακινηθούν προς τα έξω ή προς τα μέσα σε αυτό (Wang και Evangelou 1994).

## 2.6. Ο χαλκός (Cu) στο περιβάλλον

Ο χαλκός αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα και απαραίτητα στοιχεία, τόσο για τα φυτά όσο και για τα ζώα. Στην μεταλλική του κατάσταση, ο χαλκός έχει χαρακτηριστική μεταλλική λάμψη και χρώμα κόκκινο. Στη φύση ο χαλκός εμφανίζεται σε διάφορες ενώσεις και σχηματισμούς όπως σουλφίδια, από τα οποία ελευθερώνεται σε όξινο περιβάλλον, θεικές ενώσεις και ανθρακικά άλατα. Σε αναγωγικές συνθήκες βρίσκεται κυρίως με τη μεταλλική του μορφή.

Ο χαλκός που βρίσκεται στο έδαφος όπως αναφέρεται από τον Μήτσιο (2004) εμφανίζεται με διάφορες μορφές, όπως:

- Υδατοδιαλυτά ιόντα του μετάλλου, καθώς και ανόργανα και οργανικά σύμπλοκα του στο εδαφικό διάλυμα.
- Ανταλλάξιμος χαλκός.
- Σταθερά οργανικά σύμπλοκα με την οργανική ουσία.
- Προσροφημένος χαλκός στα οξειδία και υδροξειδία του σιδήρου, μαγγανίου και αργιλίου.
- Προσροφημένος χαλκός στα κολλοειδή σωματίδια της αργίλου ή των χουμικών οξέων.
- Χαλκός που είναι δεσμευμένος στο κρυσταλλικό πλέγμα των ορυκτών του εδάφους.

Ο χαλκός που βρίσκεται συγκρατημένος από την οργανική ουσία, από τα οξειδία και υδροξειδία του σιδήρου και μαγγανίου, αλλά και από τα πυριτικά ορυκτά δεν είναι εύκολο να αποδεσμευτεί στο εδαφικό διάλυμα ώστε να γίνει απορροφήσιμος από τα φυτά (Cavallaro και McBride, 1978; McGrath και Cegarra, 1992). Μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε εδάφη και ιζήματα έδειξαν ότι η μορφή του χαλκού που επικρατεί είναι αυτή που είναι δεσμευμένη με την οργανική ουσία, ακολουθεί η μορφή που είναι δεσμευμένη από τα οξειδία και υδροξειδία του σιδήρου και του μαγγανίου και τέλος, η μορφή του χαλκού που είναι συγκρατημένη στα ορυκτά της αργίλου.

Στα επιφανειακά στρώματα του εδάφους, η ολική συγκέντρωση του χαλκού στο

εδαφικό διάλυμα κυμαίνεται από 0,01 μέχρι 0,6 μM (Μήτσιος, 2004). Η μικρή αυτή τιμή της συγκέντρωσης του χαλκού, οφείλεται στη τάση του να προσροφάται από τα οργανικά και ανόργανα κολλοειδή.

Τοξικά φαινόμενα παρατηρούνται όταν τα επίπεδα του χαλκού στο εδαφικό διάλυμα κυμαίνονται από 1,5 μέχρι 4,5 mgCuL<sup>-1</sup> με αποτέλεσμα σοβαρές καταστροφές στο ριζικό σύστημα του φυτού. Αν και ο χαλκός είναι ένα από τα λιγότερο ευκίνητα βαρέα μέταλλα, η συγκέντρωσή του στο εδαφικό διάλυμα ποικίλει ανάλογα τον τύπο του εδάφους και κυμαίνονται από 3 μέχρι 135 μgCu L<sup>-1</sup> εδαφικού διαλύματος.

Οι μορφές του χαλκού που μπορούν να βρεθούν στο περιβάλλον παρουσιάζονται στον πίνακα 1:

**Πίν. 1 Μορφές του χαλκού στο έδαφος**

Ιονικές μορφές		Χημικές ενώσεις
Cu <sup>2+</sup>	Cu(OH) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Cu-O-Fe
Cu <sup>+</sup>	CuCO <sub>3</sub>	
CuOH <sup>+</sup>	Cu(OH) <sub>2</sub> <sup>2-</sup>	Cu-O-Al
Cu(OH) <sub>2</sub> <sup>2+</sup>	Cu(OH) <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	
Cu(OH) <sub>2</sub>	Cu(OH) <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cu-O-Mn
CuO	CuO <sub>2</sub> <sup>2-</sup>	

## 2.7. Ο χαλκός στο φυτό

Ο χαλκός είναι ένα στοιχείο το οποίο σε χαμηλές συγκεντρώσεις είναι απαραίτητο τόσο για την κανονική ανάπτυξη των φυτών, όσο και για την ανάπτυξη των ζώων και του ανθρώπου. Υπάρχουν είδη φυτών τα οποία έχουν την ικανότητα να συσσωρεύουν μεγάλες ποσότητες χαλκού στους ιστούς τους και τα οποία ονομάζονται υπερσυσσωρευτές χαλκού.

Η συγκέντρωση του χαλκού στους φυτικούς ιστούς είναι συνάρτηση των επιπέδων του μετάλλου στο θρεπτικό διάλυμα ή στο εδαφικό διάλυμα (Schmidt *et al.* 1976; Cavallaro και McBride, 1978). Η πρόσληψη του χαλκού από τα φυτά δεν είναι μία πλήρως γνωστή διεργασία. Αυτή η διεργασία είναι άλλοτε ενεργητική, δηλαδή καταναλώνεται ενέργεια από το φυτό και άλλοτε παθητική στις περιπτώσεις στις οποίες τα φυτά αναπτύσσονται σε ρυπασμένα εδάφη.

Οι βιοχημικές λειτουργίες του χαλκού μέσα στο φυτό αναφέρονται κατωτέρω:

- Στους ιστούς της ρίζας παρουσιάζεται κυρίως με τη μορφή συμπλόκου με οργανικές ενώσεις χαμηλού μοριακού βάρους, καθώς και με πρωτεΐνες.
- Σε πολλές περιπτώσεις ο χαλκός περιέχεται σε ενώσεις που δεν έχουν γνωστό βιοχημικό ρόλο, αλλά και σε ένζυμα τα οποία παίζουν καθοριστικό ρόλο στον μεταβολισμό των φυτών.
- Ο χαλκός συμμετέχει σε μεγάλο αριθμό φυσιολογικών λειτουργιών που πραγματοποιούνται στο φυτό. Τέτοιες λειτουργίες είναι η φωτοσύνθεση, η αναπνοή, η αναγωγή του αζώτου, η σύνθεση των υδρογονανθράκων, ο σχηματισμός αλλά και η αποικοδόμηση των τοιχωμάτων των κυττάρων καθώς και στον μεταβολισμό των πρωτεϊνών.
- Ο χαλκός επηρεάζει τη μετακίνηση του ύδατος στα ξυλώδη αγγεία και επομένως καθορίζει τη διαθεσιμότητα του ύδατος στο φυτό.
- Καθορίζει την παραγωγή των νουκλεϊνικών οξέων (DNA και RNA). Συγκεκριμένα η έλλειψή του αναστέλλει την αναπαραγωγή των φυτών, καθώς ελαττώνεται σημαντικά η σποροπαραγωγή.
- Εμπλέκεται στους μηχανισμούς άμυνας των φυτών στις ασθένειες. Φυτά τα οποία έχουν πλεονάζοντα αποθέματα χαλκού, παρουσιάζουν ευαισθησία σε μεγάλο αριθμό ασθενειών, ενώ η έλλειψή του σε αρκετές περιπτώσεις έδειξε ενίσχυση της αντίστασης των φυτών στις ασθένειες.

Η πρόσληψη του χαλκού από τα φυτά μπορεί να περιοριστεί από την παρουσία ιόντων  $Zn^{2+}$ , διότι τα δύο ιόντα ( $Zn^{2+}$  και  $Cu^{2+}$ ) δρουν ανταγωνιστικά. Ανάλογη είναι και η δράση των ιόντων  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$  και  $NH_4^+$ . Τα ιόντα αυτά μεταβάλουν την διαπερατότητα των μεμβρανών και περιορίζουν την είσοδο των ιόντων  $Cu^{2+}$  στα κύτταρα των ριζών.

Ο Tiffin (1972), καθώς και ο Loneragan (1981), διατύπωσαν την άποψη ότι ο χαλκός συγκρατείται ισχυρά στους ιστούς της ρίζας, με αποτέλεσμα να αναστέλλεται η μετακίνησή του προς το βλαστό του φυτού. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε τόσο σε περιπτώσεις έλλειψης, όσο και σε περιπτώσεις υψηλής συγκέντρωσης χαλκού στο εδαφικό διάλυμα. Οι ανωτέρω ερευνητές κατέληξαν επίσης στο συμπέρασμα ότι ο κύριος μηχανισμός για τη μετακίνηση του χαλκού μέσα στο φυτό



είναι η απελευθέρωσή του από τα κύτταρα της ρίζας και η μετάβασή του στα αγγεία του βλαστού, όπου ο χαλκός μετατρέπεται σε μορφές περισσότερο ευκίνητες. Η κινητικότητα του χαλκού επηρεάζεται ακόμα από τους σταθερούς δεσμούς που δημιουργεί με τις αζωτούχες ομάδες των αμινοξέων.

Όπως αναφέρθηκε η χαμηλή κινητικότητα του χαλκού στο φυτό, οδηγεί σε συσσώρευση του σε μεγαλύτερο ποσοστό στις ρίζες, αλλά και στα φύλλα. Ελάχιστες ποσότητες του μετάλλου μετακινούνται προς τα νεώτερα όργανα του φυτού. Παράλληλα υπάρχει σημαντική τάση για συσσώρευση του χαλκού στα μέρη αναπαραγωγής του φυτού (Loneragan, 1981).

## **2.7. Η σημασία του pH στην φυτοαποκατάσταση εδαφών επιβαρημένων με χαλκό (Cu)**

Τα κolloειδή του εδάφους έχουν την ικανότητα να προσροφούν ιόντα χαλκού από το εδαφικό διάλυμα, ανάλογα με το ηλεκτρικό φορτίο που διαθέτουν. Το ηλεκτρικό φορτίο που παρουσιάζουν οι επιφάνειες των δομικών στοιχείων του εδάφους ελέγχεται από την τιμή του pH (Papadopoulos και Rowell, 1988). Επομένως, η προσρόφηση του χαλκού από την στερεή φάση του εδάφους, καθώς και οι μορφές του χαλκού που παρουσιάζονται στα εδάφη καθορίζονται από την τιμή του pH του εδάφους.

Η διαλυτότητα τόσο των κατιονικών όσο και των ανιονικών μορφών του χαλκού ελαττώνεται σε τιμές pH από 7 μέχρι 8. Έχει παρατηρηθεί ότι τα προϊόντα υδρόλυσης του χαλκού, δηλαδή τα ιόντα  $\text{CuOH}^+$  και  $\text{Cu}_2(\text{OH})_2^{2-}$ , παρουσιάζονται σε pH μικρότερο της τιμής 7 ( $\text{pH} < 7$ ), ενώ σε τιμή pH μεγαλύτερη του 8 ( $\text{pH} > 8$ ), υπερτερούν τα ανιονικά υδροξυ-σύμπλοκα του χαλκού:  $\text{Cu}(\text{OH})_3^-$  και  $\text{Cu}(\text{OH})_4^{2-}$ .

Υπάρχουν περιπτώσεις όπως υποστηρίζεται από τους Sanders και Bloomfield (1980), όπου το pH δεν παίζει ρόλο στην διαλυτότητα μίας ένωσης του χαλκού όπως είναι η περίπτωση του ανθρακικού χαλκού. Ο ανθρακικός χαλκός αποτελεί την πιο διαδεδομένη ανόργανη υδατοδιαλυτή ένωση του χαλκού σε εδαφικά διαλύματα ουδέτερων και αλκαλικών εδαφών, ενώ σε πολύ μικρότερα ποσοστά εμφανίζονται τα νιτρικά, χλωριούχα και θειικά άλατα του χαλκού.

Το είδος αυτό της προσρόφησης που ελέγχεται από την τιμή του pH του

εδάφους εμφανίζεται κυρίως σε περιπτώσεις όπου τα ορυκτά του εδάφους παρουσιάζουν μεταβλητό φορτίο (James και Barrow, 1981).

Ο Harter (1979), αναφέρει ότι υπάρχει σημαντική συσχέτιση ανάμεσα στην ποσότητα του χαλκού που προσροφάται και των αλκαλικών μορφών που βρίσκονται στην επιφάνεια των εδαφών (0-20 cm), ενώ σε μεγαλύτερα βάθη η ποσότητα του χαλκού που προσροφάται σχετίζεται άμεσα με την περιεκτικότητα των εδαφών σε βερμικουλίτη.

Ένας ακόμα παράγοντας που καθορίζει την διαθεσιμότητα του χαλκού στο φυτό είναι η ύπαρξη οργανικής ουσίας (Randle και Harymann, 1995).

Οι τροφοπενίες χαλκού παρουσιάζονται συχνότερα σε οργανικά εδάφη (Histosols), κατόπιν σε Podzols (spodosols), τα οποία περιέχουν υψηλά ποσοστά άμμου και δεν έχουν την ικανότητα να συγκρατούν ικανοποιητικές ποσότητες ύδατος και θρεπτικών στοιχείων. Επίσης, σημαντικές τροφοπενίες χαλκού παρατηρούνται σε εδάφη νατριωμένα, στα οποία η τιμή του pH είναι ιδιαίτερα υψηλή ( $pH > 8$ ), το ποσοστό διασποράς της αργίλου είναι ιδιαίτερα υψηλό και έχουν πολύ μικρό ποσοστό υγρασίας.

Εδάφη Ustolls, στις ημίξηρες στέπες που περιέχουν μεγάλο ποσοστό οργανικής ουσίας, υψηλό ποσοστό βάσεων και υψηλές τιμές pH, παρουσιάζουν δέσμευση των στοιχείων χαλκού, ψευδαργύρου, σιδήρου και μαγγανίου σε σημαντικό βαθμό. Το ίδιο παρατηρείται και σε εδάφη που υπερλιπάνθηκαν με αζωτούχα λιπάσματα (Μήτσιος, 2004).

## 3. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

### 3.1 Γενικά

Η ανάγκη για αποκατάσταση των επιβαρυσμένων εδαφών είναι επιτακτική, όχι μόνο λόγω αυτής καθαυτής της ακαταλληλότητας των εδαφών, άλλα και επειδή η επιβάρυνση είναι μακροχρόνια και δεν αποκαθίσταται σε βάθος χρόνου. Από τον 19<sup>ο</sup> αιώνα, ο Baumann (1885) προσδιόρισε φυτικά είδη τα οποία ήταν ικανά να προσλαμβάνουν και να ανέχονται ασυνήθιστα υψηλά επίπεδα ψευδαργύρου. Το 1935, ο Byers τεκμηρίωσε τη συσσώρευση του σεληνίου σε είδη *Astragalus spp.* Μια δεκαετία αργότερα, οι Minguzzi και Vergnani (1948) προσδιόρισαν είδη φυτών ικανά να ανέχονται συγκεντρώσεις νικελίου μέχρι 1%.

Οι Brooks *et al.* (1977) χρησιμοποίησαν τον όρο υπερσυσσωρευτές (hyperaccumulators) για να περιγράψουν φυτά με συγκεντρώσεις Ni >1000 μg/g (0,1%) ξηρού βάρους φύλλων, οι οποίες θεωρούνται υπερβολικά υψηλές σε σχέση με τη συγκέντρωση Ni σε φυτά μη συσσωρευτές που απαντώνται σε νικελιοφόρα εδάφη. Ο Reeves (1992) διαμορφώνοντας τον παραπάνω ορισμό περιέλαβε μόνο αυτά τα είδη που συσσωρεύουν τέτοιες συγκεντρώσεις (>1000 μg/g ξηρού βάρους) όταν αναπτύσσονται στους φυσικούς τους βιότοπους. Αυτό το κριτήριο επίσης θεωρήθηκε κατάλληλο για να καθορίσει την υπερσυσσώρευση του χαλκού (Brooks *et al.*, 1980) και του μόλυβδου (Reeves και Brooks, 1983) ενώ για τον ψευδάργυρο προτάθηκε η συγκέντρωση 10000 μg/g (1,0%) ξηρού βάρους από τους ίδιους ερευνητές.

Η φυτοαποκατάσταση ως περιβαλλοντική τεχνική καθαρισμού προτάθηκε αρχικά για την επανόρθωση εδαφών επιβαρυσμένων με μέταλλα (Utsunamya, 1980, Chaney, 1983, Baker *et al.*, 1991).

Ο Pyatt (2001) ανέλυσε πτυχές της βιομηχανικής αρχαιολογίας στην Κύπρο, ένα νησί στο οποίο η ύπαρξη ορυχείων χαλκού είναι γνωστή από την αρχαιότητα. Ρύποι έως και δύο χιλιάδων χρόνων από τις εξορυκτικές δραστηριότητες εξακολουθούν να επηρεάζουν τους ζωντανούς οργανισμούς. Χημικές αναλύσεις που έγιναν σε *Acacia* και σε *Eucalyptus* καταδεικνύουν την ικανότητά τους να βιοσυσσωρεύουν βαριά μέταλλα και φώσφορο. Ο ίδιος ερευνητής, που έκανε μετρήσεις σε διάφορα τμήματα των δέντρων, αναφέρεται εκτενώς στο γεγονός ότι ενώ ο κορμός της ακακίας και ο καρπός του ευκαλύπτου μπορεί να έχουν αυξημένη

συγκέντρωση μετάλλων, εντούτοις οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις στους σπόρους των δέντρων είναι κατά πολύ μειωμένες. Ο Pyatt καταλήγει, λοιπόν, στο συμπέρασμα ότι τα δύο αυτά δέντρα είναι πολύ σημαντικά ως δείκτες της ποιότητας του εδάφους και του περιβάλλοντος.

Ο Cox S. (2000) αναφέρει ότι, σε γενικές γραμμές, η ποσότητα του μετάλλου που απορροφάται από ένα φυτό εξαρτάται από δύο παράγοντες: Την συγκέντρωση του μετάλλου στο έδαφος και την συνολική βιομάζα του φυτού. Το κάθε φυτό, βέβαια, έχει διαφορετική ικανότητα απορρόφησης, και συγκεντρώνει το απορροφηθέν μέταλλο σε διαφορετικά σημεία. Οι στρατηγικές για τη βελτίωση της απορρόφησης περιλαμβάνουν την αύξηση της συγκέντρωσης του μετάλλου στο εδαφοδιάλυμα, καθώς και την αύξηση της βιομάζας (ή και τα δύο σε συνδυασμό). Ο Panmar *et al* (1999) αναφέρουν ότι προσθέτοντας φώσφορο (P) στο έδαφος, μειωνόταν η συγκέντρωση Cd στο βλαστό του φυτού, αλλά αυξανόταν υπέρμετρα η βιομάζα, καθιστώντας έτσι την τεχνική ελκυστική.

Τα περισσότερα φυτά απορροφούν αρκετή ποσότητα μετάλλου από τις ρίζες και τη συσσωρεύουν εκεί, άλλα σε πολύ λίγα η αντίστοιχη συγκέντρωση Cd στο βλαστό είναι τέτοια ώστε να τα χαρακτηρίσει ικανά για φυτοαποκατάσταση. Έτσι, οι He και Singh (1994) ανέφεραν ότι, ως προς την δυνατότητα απορρόφησης (συγκέντρωσης) Cd, τα παρακάτω φυτά τοποθετούνται σε αυτή την σειρά:

σπανάκι > καρότο > ρύζι > βρώμη

Αντίστοιχα, οι Davis και Carlton-Smith (1980) ανέφεραν ότι το λάχανο, το σπανάκι, το μαρούλι και το κουνουπίδι απορροφούν περισσότερο Cd από την πατάτα, το καλαμπόκι και τα φασόλια.

Οι Chaney *et al* (1997) αναφέρονται, μεταξύ άλλων και στις δυνατότητες που προσφέρει η βιοτεχνολογία στην ανάπτυξη φυτών που προορίζονται για φυτοαποκατάσταση. Στην παραδοσιακή τεχνική διασταύρωσης φυτών μπορεί απλά να χρησιμοποιήσει την ήδη υπάρχουσα γενετική ποικιλότητα ενός είδους για να συνδυάσει τα απαραίτητα για την φυτοαποκατάσταση χαρακτηριστικά. Οι ερευνητές, όμως, υπέθεσαν ότι αυξάνοντας τη συγκέντρωση πρωτεϊνών και πεπτιδίων που δεσμεύουν τα μέταλλα στα κύτταρα του φυτού, θα αυξανόταν ανάλογα και η δυνατότητα απορρόφησης και διακράτησης μετάλλων του φυτού. Μετά από ενδεδειγμένα πειράματα και μετρήσεις, κατέληξαν σε συσχέτιση της ύπαρξης φυτοσελατινών (PCs)

με αύξηση της ανεκτικότητας ενός φυτού σε περιβάλλον με ακραίες συγκεντρώσεις Cd. Οι έρευνες αυτές βοήθησαν στην κλωνοποίηση γονιδίων που σχετίζονται με την ανεκτικότητα σε τοξικό περιβάλλον Cd.

Άλλος ένας στόχος αυτών των ερευνών για ανάπτυξη γενετικά τροποποιημένων φυτών με αυξημένη δυνατότητα δέσμευσης μετάλλων ήταν και η χρήση των παραγόντων που συνεισφέρουν σε αυτή την αυξημένη δυνατότητα, ώστε να διακρατείται το Cd στις ρίζες. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ελάττωση της κινητικότητας του Cd, άρα και η συνεπακόλουθη μειωμένη ανίχνευσή του στην τροφική αλυσίδα.

Οι Panfili *et al* (2005), μετά από πείραμα δύο ετών στο εργαστήριο με *Agrostis tenuis* και *Festuca rubra*, χρησιμοποιώντας ηλεκτρονική μικροσκοπία, φασματομετρία (SEM-EDS), μικροφθορισμό με ακτίνες χ (μ-SXRF) και φασματοσκοπία (μ-EXAFS), βρήκαν ότι ο θειούχος ψευδάργυρος, ο οποίος είναι ασταθής σε συνήθεις ατμοσφαιρικές συνθήκες, είχε σχεδόν εξ' ολοκλήρου διαλυθεί παρουσία των παραπάνω φυτών. Η εργασία τους κατέδειξε την σημασία της συνδυασμένης χρήσης τεχνικών ηλεκτρονικής μικροσκοπίας, ακτίνων-χ και ανάλυσης δεδομένων για την ανίχνευση (ποιοτική και ποσοτική) μετάλλων και των παραγόντων τους.

Μια αναλυτική παρουσίαση των δυνατοτήτων ορισμένων φυτών για χρήση σε φυτοαποκατάσταση έκανε ο Ernst (1996), ο οποίος αναφέρει ότι η κινητικότητα των βαρέων μετάλλων σε επιβαρυσμένα εδάφη εξαρτάται από παράγοντες φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς. Η επιτυχία μιας οργανωμένης φυτοαποκατάστασης εξαρτάται τόσο από την κινητικότητα αυτή, όσο και από το εύρος της επιβάρυνσης από τα μέταλλα, καθώς και από το αν το είδος του φυτού που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να δράσει ως υπερσυσσωρευτής του συγκεκριμένου μετάλλου και σε ποιο βαθμό.

Όσον αφορά στα αγρωστώδη σύμφωνα πάντα με τον Ernst, λόγω του ότι δεν υπάρχουν υπερσυσσωρευτές οι προοπτικές για χρησιμοποίηση σε φυτοαποκατάσταση είναι μικρές. Διάφορα φυτά, όπως τα *Festuca ovina*, *F. rubra*, *Agrostis capillaris*, *A. delicatula* και *A. Stolonifera*, μπορούν να αναπτύξουν μεγάλη αντοχή σε περιβάλλοντα με σημαντική συγκέντρωση βαρέων μετάλλων, όμως δεν μπορούμε να αναμένουμε ότι η περιοχή θα είναι και πάλι αξιοποιήσιμη σε εύλογο χρονικό διάστημα (δηλαδή σε 10 – 20 χρόνια). Ακόμα, η μακροχρόνια παρουσία τους στην περιοχή καθιστά επιτακτική την ανάγκη για αυστηρή φρούρηση, αφού τα φυτά αυτά

θα είναι επικίνδυνα για κατανάλωση από αμνοερίφια, που με τη σειρά τους θα μεταφέρουν τη επιβάρυνση ψηλότερα στην τροφική αλυσίδα.

Όσον αφορά σε κάποια ζιζάνια που βρίσκονται σε αφθονία στην Ευρώπη, δηλαδή τα *Armeria calaminare*, *Thlaspi caerulescens*, *Festuca ovina*, *Silene vulgaris* και *Viola calaminaria*, ενώ έχουν υπερσυσσωρευτική δυνατότητα, εντούτοις η ποσότητα βιομάζας τους είναι χαμηλή, ενώ δεν είναι εύκολη και η συγκομιδή τους. Συγκεκριμένες μετρήσεις σε αυτά για συγκέντρωση Zn, Cd και Pb έδειξαν ότι το *Thlaspi caerulescens* συσσωρεύσε τον περισσότερο φώσφορο και κάδμιο, ενώ το *Armeria calaminare* τον περισσότερο μόλυβδο.

Οι Brooks *et al* (1979) ανέλυσαν σχεδόν όλα (167 από τα 168) τα αναγνωρισμένα είδη του *Alyssum limnaeus* ως προς την περιεκτικότητα σε νικέλιο, με σκοπό να εντοπίσουν υπερσυσσωρευτές. Ξεχώρισαν, έτσι, 31 είδη (όλα της οικογένειας *Odontarrhena*). Εργαστηριακά πειράματα σε φυτοδοχεία με το *A. serpyllifolium* (που δεν έχει χαρακτηριστικά υπερσυσσωρευτή) και με τον υπερσυσσωρευτή *A. pintodasilvae*, που περιλάμβαναν προσθήκη νικελίου στο μέσο επί του οποίου αναπτύσσονταν τα φυτά, έδειξαν ότι στην πραγματικότητα δεν μπορούσαν όλα τα μέλη της οικογένειας *Odontarrhena* να συμπεριφερθούν ως υπερσυσσωρευτές νικελίου. Η ιδιότητα αυτή υπήρχε σχεδόν αποκλειστικά σε μέλη της οικογένειας που προερχόταν από την Τουρκία και την ανατολική Μεσόγειο. Υπήρχε μάλιστα μια σαφής συσχέτιση ανάμεσα στην ποικιλομορφία, την διάδοση και την καθαρότητα του είδους από την μια μεριά και την πολύ υψηλή συγκέντρωση νικελίου από την άλλη. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την προώθηση της οικογένειας *Odontarrhena* για χρήση σε περιπτώσεις φυτοαποκατάστασης από νικέλιο.

Ενώ η έρευνα για συγκέντρωση μετάλλων σε φυτά και καλλιέργειες είναι εκτενής, η αντίστοιχη έρευνα για την συγκέντρωση μετάλλων σε δέντρα καθώς και η μελέτη των επιπτώσεων της υπερσυγκέντρωσης σε αυτά είναι εξαιρετικά περιορισμένη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η μελέτη των Turvey και Grant (1990) που έγινε σε κωνοφόρα δέντρα και αφορούσε στον χαλκό. Γενικά, η συμπεριφορά του χαλκού στο έδαφος είναι λίγο ως πολύ γνωστή, όχι όμως και σε καλλιεργούμενα φυτά και δέντρα. Ειδικά στα κωνοφόρα, λόγω της φύσης του φλοιού, είναι πολύ δύσκολη η μέτρηση της συγκέντρωσης και της επίδρασης του χαλκού.

Έτσι, υπάρχουν δέντρα στα οποία παρουσιάζονται παραμορφώσεις (κυρίως στους βλαστούς), παραμορφώσεις που σχετίζονται άμεσα με την συγκέντρωση του

Cu. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η εφαρμογή λιπάσματος με χαλκό μπορεί να αναστρέψει την παραμόρφωση, όχι όμως σε κάθε περίπτωση. Για να μπορέσουν όμως να εφαρμόσουν την κατάλληλη ποσότητα λιπάσματος (ή να μην κάνουν καθόλου εφαρμογή) πρέπει να γνωρίζουν την ήδη υπάρχουσα συγκέντρωση χαλκού στα δέντρα, καθώς και την συγκέντρωση στο έδαφος. Για παράδειγμα, η κρίσιμη απαιτούμενη ποσότητα για το *Pinus radiata* D. Κινείται ανάμεσα στα 1.5 και στα 5 mg/Kg.

Συνθετικές χηλικές ενώσεις όπως το EDTA (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid) είναι δυνατόν να ενισχύουν την φυτοαπορρόφηση κάποιων βαρέων μετάλλων από επιβαρυσμένο έδαφος. Οι Grisman *et al* (2001) μελέτησαν μια στήλη εδάφους για να βρουν την επίδραση του EDTA στην απορρόφηση των Pb, Zn, και Cd από το *Brassica rapa*. Εξέτασαν επίσης την κινητικότητα των βαρέων αυτών μετάλλων και την τοξικότητα του EDTA στα φυτά που έγινε η εφαρμογή. Κατέληξαν ότι η πιο αποτελεσματική ήταν μία απλή δόση 10 mmol EDTA ανά κίλο εδάφους. Στο έδαφος αυτό, και για την συγκεκριμένη δόση, ανιχνεύτηκαν συγκεντρώσεις Pb, Zn, και Cd που ήταν 104.6, 3.2 και 2.3 φορές μεγαλύτερες στην υπερκείμενη φυτική βιομάζα συγκρινόμενη με τους μάρτυρες.

Με την ίδια, όμως, εφαρμογή EDTA παρατηρήθηκε και μείωση της συγκέντρωσης των Pb, Zn, και Cd στις ρίζες των υπό εξέταση φυτών κατά 41, 71 και 69%, αντίστοιχα, και πάλι σε σχέση με τις αντίστοιχες μετρήσεις στους μάρτυρες. Ακόμα, υπήρξε αυξημένη απομάκρυνση από το έδαφος των αρχικών ποσοτήτων Pb, Zn, και Cd κατά 37.9, 10.4, και 56.3%. Το αρνητικότερο εύρημα ήταν η φυτοτοξική επίδραση επί του *Trifolium pretense*, καθώς και η αναστολή της ανάπτυξης του arbuscular mycorrhiza. Είναι λοιπόν ασαφή τα συνολικά πλεονεκτήματα από την πιθανή χρήση EDTA φυτοαπορρόφηση μετάλλων. Ενώ αυξάνεται η βιομάζα, άρα και η συνολική απορροφούμενη ποσότητα, καθώς και η συγκέντρωση στα πράσινα μέρη των φυτών, παράλληλα αυξάνεται και η εκροή των Pb, Zn, και Cd από το έδαφος, ενώ υπάρχουν και τοξικές επιπτώσεις στα φυτά. Άρα χρειάζεται κατά περίπτωση εφαρμογή της μεθόδου τόσο ως προς τα χρησιμοποιούμενα φυτά όσο και ως το μέταλλο το οποίο απαιτείται να απορροφηθεί.

Ένα αντίστοιχο πείραμα έγινε και από τους Chen *et al* (2004), οι οποίοι μελέτησαν κατά πόσο το *Vetiveria zizanioides* μπορεί να χρησιμοποιηθεί για φυτοαποκατάσταση. Και εδώ διερευνήθηκε η απορρόφηση και μεταφορά το Pb από το *Vetiveria zizanioides* από επιβαρυσμένο έδαφος στο οποίο είχε προστεθεί EDTA.

Καταρχάς, τα αποτελέσματα έδειξαν την αντοχή του *Vetiveria zizanioides* σε υψηλές συγκεντρώσεις Pb. Εφαρμόζοντας το EDTA, αυξήθηκε η συγκέντρωση του Pb στους βλαστούς του *Vetiveria zizanioides* έναντι των ριζών του. Την 14<sup>η</sup> ημέρα της εφαρμογής 5 mmol EDTA ανά κιλό εδάφους η συγκέντρωση στους βλαστούς έφτασε τα 42, 160, 243 mg kg<sup>-1</sup> ΞΒ σε έδαφος με 500, 2500 και 5000 mg Pb kg<sup>-1</sup>, ενώ η αντίστοιχη συγκέντρωση στις ρίζες ήταν 266, 951, και 2280 mg kg<sup>-1</sup> ΞΒ.

Στη συνέχεια έγιναν δύο πειράματα: Ένα με μικρή (9 cm διάμετρο και 20 cm μήκος) στήλη εδάφους και ένα με μεγάλη (9 cm διάμετρο και 60 cm μήκος) στήλη εδάφους. Στο πρώτο πείραμα, 3.7%, 15.6%, 14.3% and 22.2% των Pb, Cu, Zn and Cd διηθήθηκαν από την τεχνητά φορτισμένη στήλη, μετά από εφαρμογή 5 mmol EDTA ανά κιλό εδάφους και με 126 mm τεχνητής βροχόπτωσης. Στο δεύτερο πείραμα, οι στήλες γέμισαν με μη επιβαρυσμένο έδαφος (ώστε να προσομοιάζουν το υπόστρωμα του επιβαρυσμένου εδάφους) και σπάρθηκαν με *Vetiveria zizanioides*. Οι μολυσμένες με βαριά μέταλλα απορροές του πρώτου πειράματος οδηγήθηκαν στην σπαρμένη επιφάνεια, εφαρμόστηκε ξανά τεχνητή βροχή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σπαρθέν με *Vetiveria zizanioides* έδαφος μπορούσε να επαναπορροφήσει το 98%, 54%, 41%, και 88% του αρχικού Pb, Cu, Zn και Cd., αντίστοιχα, μειώνοντας έτσι δραστικά τον κίνδυνο επιβάρυνσης των υπογείων υδάτων από βαριά μέταλλα που μεταφέρονται με το νερό.

Οι Bluskov *et al* (2005) ασχολήθηκαν με τους μηχανισμούς δέσμευσης και απομόνωσης του Cr από το *Brassica juncea*, φυτό που χρησιμοποιείται ήδη στην φυτοαποκατάσταση εδαφών επιβαρυσμένων κυρίως με Cr αλλά και με άλλα μέταλλα. Τα φυτά του πειράματος μεγάλωσαν σε συνθήκες θερμοκηπίου, σε έδαφος στο οποίο είχε γίνει εφαρμογή Cr (III ή IV). Τα φυτά συγκέντρωναν το Cr κυρίως στις ρίζες, εμποδίζοντας έτσι εν μέρει τη μετατόπιση του μετάλλου στους βλαστούς. Το *Brassica juncea*, που γενικά ήταν ανθεκτικό σε συγκεντρώσεις μέχρι 100 mg Cr ανά κιλό εδάφους, αφαιρούσε κατά μέσο όρο 48 και 58 mg Cr ανά φυτό από εδάφη εμπλουτισμένα με Cr (III) και Cr (IV), αντίστοιχα. Η απορρόφηση δε αυτή δεν επηρεαζόταν από την υγρασία του εδάφους. Μετρήσεις που έγιναν στο έδαφος με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας (X-ray absorption near-end spectroscopy) κατέδειξαν την ύπαρξη μόνο Cr (III) δεσμευμένου σε μυρμηκικά και οξεικά άλατα. Στους ιστούς των φυτών, με παρόμοιες μετρήσεις εντοπίστηκε Cr (III), κυρίως ως οξεικά άλατα στις ρίζες και ως οξαλικά άλατα στα φύλλα. Με μικροσκόπιο ακτίνων χ εντοπίστηκαν τα σημεία στα οποία συγκεντρώνεται και, πιθανόν, απομονώνεται το Cr στις ρίζες και



στα φύλλα. Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις πιστοποίησαν τη δυνατότητα του *Brassica juncea* να επιβιώνει σε περιβάλλον άφθονο σε Cr και να είναι κατάλληλο όταν απαιτείται φυτοαποκατάσταση της περιοχής.

Οι Wu *et al* (2004) σχεδίασαν ένα πείραμα που είχε σκοπό να διερευνήσει τις επιπτώσεις που θα είχε η προσθήκη N, P και K (συνδυασμένα άλλα και χωριστά το καθένα) στην φυτοαποκατάσταση εδάφους επιβαρυσμένου από Cu με χρήση *Brassica juncea*. Το φυτό αυτό, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, έχει αξιόλογες προοπτικές χρήσης σε φυτοαποκατάσταση, άλλα χρειάζεται παράλληλη χρήση θρεπτικών συστατικών. Έτσι, η προσθήκη N και P αύξησε σημαντικά την φυτομάζα του *Brassica juncea*. Συγκεκριμένα, δύο δόσεις N είχαν ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη αύξηση, ενώ έπονταν συνδυασμός μειωμένης δόσης P και κανονικής δόσης N. Στον αντίποδα, μια υψηλή δόση P χωρίς καθόλου προσθήκη N δεν έδωσε καμία αύξηση, όπως καμία αύξηση δεν είχαν και από την προσθήκη K. Το N και ο P αυξάνουν την ποσότητα της χλωροφύλλης στα φύλλα, ένδειξη ότι η αυξημένη μάζα του φυτού οφείλεται σε αυξημένη φωτοσυνθετική δραστηριότητα.

Όσον αφορά στην συγκέντρωση του Cu στο φυτό, η εφαρμογή αζώτου δεν προκάλεσε την αύξησή της, ενώ η εφαρμογή φωσφόρου προκάλεσε μια μικρή μείωση (αν και αυτό μάλλον οφείλεται στην μεγάλη αύξηση της φυτικής μάζας, οπότε η σχετική παρουσία του χαλκού στο φυτό μειώθηκε). Η μεγαλύτερη ποσότητα Cu απορροφήθηκε με την εφαρμογή 100 και 200 mg/kg N και P, αντίστοιχα, χωρίς καθόλου προσθήκη K σε καμία από τις δύο περιπτώσεις. Άρα, συνολικά, η μεγαλύτερη ποσότητα Cu αφαιρέθηκε από το έδαφος όταν σε αυτό προστέθηκε μια μικρή δόση N και μια μεγαλύτερη δόση P, μια και σε αυτή την περίπτωση η μεγάλη αύξηση της φυτικής βιομάζας αναπλήρωσε μεγάλο μέρος από την μείωση της συγκέντρωσης Cu.

Οι Zhang *et al* (2004) μελέτησαν το *Pteris vittata*, το πρώτο φυτό που αναφέρθηκε ότι είναι υπερσυσσωρευτής αρσενικού (As), για να διερευνήσουν τη δυνατότητα χρήσης του σε περιοχές μολυσμένες με As και όπου είναι επιθυμητή η φυτοαποκατάσταση. Για να κατανοήσουν και να επαυξήσουν την υπερσυσσωρευτική ικανότητα του φυτού, έπρεπε πρώτα να κατανοήσουν τους μηχανισμούς ανοχής και αποτοξικοποίησης του φυτού απέναντι στο As. Βρήκαν, λοιπόν, στα φύλλα του φυτού ένα νέο είδος As, διαφορετικό από τις μορφές υπό τις οποίες απαντάται συνήθως. Η χρωματογραφική συμπεριφορά του άγνωστου αυτού μορίου, όπως και η σταθερότητά του, μαρτυρούν ότι πρόκειται για ένα σύμπλοκο του As. Το σύμπλοκο

αυτό είναι ευαίσθητο στην θερμοκρασία και τα ιόντα μετάλλων, αλλά σχετικά ανεξάρτητο από το pH (σε ουδέτερη μορφή απαντάται ευρισκόμενο σε διάλυμα με pH 5.9). Οι πληροφορίες αυτές, οι πρώτες που αναφέρονται στην ύπαρξη συμπλόκου As που να μην είναι σύμπλοκο As-PC, μπορούν να αξιοποιηθούν για την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών αντοχής και υπερσυσσώρευσης As στο *Pteris vittata*.

Οι Bigaliev *et al*, προσπαθώντας να βρουν ένα είδος κατάλληλο για φυτοαποκατάσταση εδαφών σε περιοχές όπου γίνεται εξόρυξη πετρελαίου, εξέτασαν 5 διαφορετικά μέλη της οικογένειας του *Amaranthus sp.*, τα *A. hybridus*, *A. paniculatus*, *A. hypochondriacus*, *A. tricolor*, *A. retroflexus*, και 2 υβρίδια μεταξύ των *A. hybridus* και *A. hypochondriacus*, τα K-343 και K-422.

Αρχικά διερευνήθηκε η δυνατότητα βλάστησης των σπόρων και ανάπτυξης των σπορόφυτων των 7 φυτών σε περιβάλλον με διαφορετικές συγκεντρώσεις από Zn, Cu, Cd, Hg και Ni. Τα *A. paniculatus*, *A. tricolor*, *A. hypochondriacus* και το υβρίδιο K-343 μπόρεσαν να αναπαραχθούν ακόμα και σε περιβάλλον με υψηλή συγκέντρωση από τα προαναφερθέντα μέταλλα. Επιπρόσθετα, τα *A. paniculatus* και *A. tricolor* αναπτύσσονταν καλύτερα από το *A. hypochondriacus* και το υβρίδιο K-343. Ως προς την τοξικότητα και το πόσο αυτή επηρέασε την αναπαραγωγή και την ανάπτυξη των φυτών του αμάρανθου, τα βαρέα μέταλλα της μελέτης κατατάχθηκαν στην σειρά:



Στη συνέχεια μετρήθηκε η συγκέντρωση του Zn στις ρίζες και στα υπέργεια τμήματα του βλήτου. Βρέθηκε ότι η απορρόφηση Zn γινόταν στο μεγαλύτερο ποσοστό της στα πρώτα στάδια ανάπτυξης του φυτού, ενώ όταν το φυτό άνθιζε η αύξηση της συγκέντρωσης του Zn ήταν αμηλητέα. Την περίοδο αυτή μετρήθηκε και η ευαισθησία του φυτού στο Zn και βρέθηκε ότι είναι περίπου  $300 \text{ mg kg}^{-1}$ . Στο διάστημα αυτό, όμως, η βιομάζα του *A. tricolor* αυξήθηκε σημαντικά (κατά 182%). Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αύξηση της συσσωρευτικής ικανότητας των μελών της οικογένειας *Amaranthaceae* (και κυρίως του *A. tricolor*) κατά μία τάξη μεγέθους

Οι Chen και Cutright (2001) μελέτησαν την επίδραση των EDTA και HEDTA (N-(2-υδροξυαιθυλικό)-EDTA) στην απορρόφηση Cd, Cr και Ni από το *Helianthus annuus*. Στο έδαφος προστέθηκαν διαφορετικές ποσότητες από τις δύο ενώσεις για να

μετρηθεί η αντίστοιχη αύξηση στην κινητικότητα των μετάλλων. Μετρήθηκε έτσι τόσο η απορρόφηση, όσο και η κινητικότητα εντός του *Helianthus annuus*. Έτσι, με προσθήκη 500 mg kg<sup>-1</sup> EDTA οι συγκεντρώσεις των Cd και Ni στον βλαστό ανέβηκαν από 34 και 15 σε 115 και 117 mg kg<sup>-1</sup>, αντίστοιχα. Η συνολική ικανότητα απορρόφησης ανά φυτό, υπό την επίδραση του EDTA, ήταν 59 μg. Για ισόποση προσθήκη HEDTA, η αντίστοιχη ικανότητα απορρόφησης ανά φυτό ήταν 42 μg.

Ενώ, όμως, και το EDTA και το HEDTA αύξησαν την συγκέντρωση των μετάλλων στα φυτά, παράλληλα, λόγω της τοξικότητάς τους, μείωσαν σημαντικά (πάνω από 50%) τη παραγόμενη από τα φυτά βιομάζα, με αποτέλεσμα ότι η συνολική ποσότητα μετάλλου που απορροφήθηκε τελικά ήταν μικρότερη από πριν. Αν δεν λάβουμε υπόψη αυτή τη μείωση της βιομάζας, η προσθήκη EDTA και HEDTA οδήγησε κατά κύριο λόγο στην αύξηση της συγκέντρωσης του Cr και δευτερευόντως των Cd και Ni. Ακόμα, η ιδανική για την υπό εξέταση περίπτωση δοσολογία των 500 mg kg<sup>-1</sup> EDTA είναι αντικοινωνική σε σχέση με άλλες μεθόδους. Το συμπέρασμα είναι ότι η προσθήκη EDTA και HEDTA πρέπει να χρησιμοποιείται κατά περίπτωση και λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα μέταλλα από τα οποία θέλουν να καθαρίσουν το έδαφος όσο και τα φυτά που θα χρησιμοποιήσουν.

Οι Lesage και Meers (2005) εξέτασαν και αυτοί την επίδραση του EDTA και του κιτρικού οξέος στην ικανότητα του *Helianthus annuus* να απορροφά βαρέα μέταλλα, καθώς και στην μετέπειτα μετακίνηση αυτών στα υπέργεια τμήματα του φυτού. Τα φυτά αναπτύχθηκαν σε ασβεστώδες έδαφος ήπια επιβαρυμένο με Cu, Pb, Zn και Cd, ενώ προστέθηκε, σε αυξανόμενη αναλογία, EDTA (0.1, 1, 3, 5, 7 και 10 mmol kg<sup>-1</sup> εδάφους) ή κιτρικό οξύ (0.01, 0.05, 0.25, 0.442 και 0.5 mol kg<sup>-1</sup> εδάφους). Οι αυξανόμενες ποσότητες EDTA και κιτρικού οξέος ανέστειλαν σημαντικά την ανάπτυξη του *Helianthus annuus*. Επακόλουθα, η μειωμένη ανάπτυξη οδήγησε σε μείωση τη συνολική ποσότητα μετάλλων που απομακρύνθηκε από το έδαφος.

Για το Cd και το Pb, προσδιορίστηκε η δόση EDTA που μεγιστοποιεί την απορροφούμενη ποσότητα, που είναι 1 και 5 mmol EDTA kg<sup>-1</sup> εδάφους, αντίστοιχα για τα δύο μέταλλα. Όσον αφορά στο κιτρικό οξύ, εφαρμογές που δεν ξεπερνούσαν το όριο συγκράτησης (buffer limit) του εδάφους, δεν είχαν ιδιαίτερα θετική επίδραση στην συγκέντρωση των Cu, Zn και Cd στους βλαστούς. Ακόμα, η τοξική επίδραση στο φυτό που ανέστειλε σημαντικά την ανάπτυξή του μείωσε τελικά τη συνολικά απορροφούμενη ποσότητα των 3 μετάλλων. Ακόμα, οι απαιτούμενες ποσότητες

κιτρικού οξέος ήταν αντιοικονομικές, γεγονός που σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα το καθιστά μη ελκυστική λύση για την συγκεκριμένη περίπτωση.

Οι Tandy *et al* (2006) ερευνήσαν την επίδραση του βιοδιασπόμενου χηλικού παράγοντα SS-EDDS στην απορρόφηση μετάλλων (Cu, Zn, Pb) από ηλίανθα εντός θρεπτικού διαλύματος. Το πείραμα αυτό, όπως και πολλά προηγούμενα, διερεύνησε την πρόσληψη των μετάλλων από τις ρίζες και τη μεταφορά και εναπόθεσή τους εντός του φυτού. Το άλλο σημαντικό θέμα το οποίο διερευνήθηκε είναι η διάλυση των μετάλλων στο θρεπτικό διάλυμα.. Βρέθηκε, λοιπόν, ότι η παρουσία του χηλικού παράγοντα αύξησε την συγκέντρωση του μετάλλου στο έδαφος, άρα έκανε πιο εύκολη την πρόσληψή του από το φυτό. Επίσης, παρουσία του EDDS η συγκέντρωση των Cu και Zn στους βλαστούς μειώθηκε, ενώ αντίθετα η συγκέντρωση του Pb αυξήθηκε. Άρα και πάλι το συμπέρασμα ήταν ότι η παρουσία του EDDS δεν υποβοηθά την αύξηση της πρόσληψης μετάλλων σε κάθε περίπτωση, άλλα ισχύει για συγκεκριμένα μέταλλα (στο συγκεκριμένο πείραμα για Pb) και για συγκεκριμένα φυτά.

Σε ένα παρεμφερές πείραμα, οι Chunling *et al* (2005) εξέτασαν την περίπτωση της, υποβοηθούμενης από την προσθήκη EDTA, EDDS ή κιτρικού οξέος, απομάκρυνσης βαρέων μετάλλων με χρήση φυτών με μεγάλη ποσότητα βιομάζας. Μετρήθηκε η επίδραση αυτών στην απορρόφηση Cu, Pb, Zn και Cd από τα φυτά *Zea mays* L. cv. Nongda 108 και *Phaseolus vulgaris* L. Κατέληξαν ότι το EDDS ήταν πιο αποτελεσματικό από το EDTA στην αύξηση της συγκέντρωσης του Cu στο καλαμπόκι και το φασόλι.

Συγκεκριμένα, η εφαρμογή 5 mmol EDDS ανά κιλό εδάφους αύξησε δραματικά την συγκέντρωση Cu στους βλαστούς, με μέγιστο τα 2060 και τα 5130 mg kg<sup>-1</sup> ΕΒ στο καλαμπόκι και το φασόλι, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές ήταν κατά 45 και κατά 135 φορές μεγαλύτερες από αυτές στους μάρτυρες ,όπου δεν είχε γίνει εφαρμογή χηλικών ενώσεων. Ομοίως, υψηλότερες ήταν και οι τιμές για την συγκέντρωση του Zn στους βλαστούς, ενώ και εδώ φαίνεται να είναι προτιμότερη η χρήση EDDS αντί για EDTA. Όσον αφορά, όμως, το Pb και το Cd, το EDDS ήταν λιγότερο αποτελεσματικό από το EDTA.

Η μέγιστη φυτοαπορρόφηση Cu βρέθηκε ότι έλαβε χώρα όταν προστέθηκε EDDS. Επίσης, η χρήση EDTA και EDDS αύξησε τη συγκέντρωση των Cu, Pb, Zn και Cd στους βλαστούς έναντι των ριζών των φυτών, και στα δύο είδη. Συνολικά, όσον αφορά στην απορρόφηση μετάλλων με τη βοήθεια χηλικών ενώσεων, για την

απορρόφηση των Cu και Zn είναι προτιμότερη η προσθήκη EDDS, ενώ για την απορρόφηση των Pb και Cd είναι προτιμότερη η προσθήκη EDTA.

Οι Ciura *et al* (2005) διερεύνησαν με τη σειρά τους τη δυνατότητα εννιά διαφορετικών ειδών (*Beta vulgaris*, *Cichorium intybus*, *Cucurbita pepo*, *Phaseolus vulgaris*, *Hordeum vulgare*, *Brassica oleracea var. capitata*, *Zea mays*, *Medicago sativa*, και *Pastinaca sativa*) να απομακρύνουν μέταλλα από επιβαρυσμένο έδαφος. Η έρευνα έγινε στον αγρό και σαν σκοπό είχε να εξετάσει την αποτελεσματικότητα των παραπάνω φυτών στα: κάδμιο, χρώμιο, χαλκό, μαγγάνιο, σίδηρο, νικέλιο, μόλυβδο και ψευδάργυρο. Τα συμπεράσματα της μελέτης ήταν τα εξής:

1. Η αποτελεσματικότητα χρήσης των υπό διερεύνηση φυτών για φυτοαποκατάσταση εξαρτάται τόσο από τη μέγιστη δυνατή συγκέντρωση του μετάλλου στους ιστούς του φυτού, όσο και από τη φυτική βιομάζα που μπορεί να αναπτύξει το φυτό.

2. Ανάμεσα στα υπό διερεύνηση φυτά, μόνο το *Hordeum vulgare* παρήγαγε λιγότερη βιομάζα ( $16.6 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) από αυτή που προτείνεται γενικά στη βιβλιογραφία ( $20 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ )

3. Η χρήση των φυτών στην φυτοαποκατάσταση εδαφών εξαρτάται, όπως έχει αναφερθεί, τόσο από το είδος όσο και από το μέταλλο που έχει μολύνει το έδαφος, λόγω των διαφορετικών μηχανισμών απορρόφησης των διαφόρων στοιχείων από το έδαφος. Έτσι, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας, για απορρόφηση σιδήρου πιο αποτελεσματικό είναι το *Medicago sativa*, για απορρόφηση χρωμίου το *Zea mays* και για απορρόφηση καδμίου, χαλκού, μαγγανίου, νικελίου, μόλυβδου και ψευδάργυρου πιο αποτελεσματικό είναι το *Cucurbita pepo*.

4. Όταν χρησιμοποιούνται φυτά στα οποία υπάρχει άμεση συσχέτιση ανάμεσα στην ποσότητα της παραγόμενης βιομάζας και την απορροφούμενη ποσότητα μετάλλου, τότε συνιστάται η χρήση αγροτεχνικών μεθόδων για την αύξηση της φυτικής βιομάζας.

Οι Xiaomei *et al* (2005) μελέτησαν την συγκαλλιέργεια του *Sedum alfredii*, γνωστού υπερσυσσωρευτή ψευδαργύρου, και του *Zea mays*. Ο λόγος που επέλεξαν να διεξάγουν αυτή την έρευνα ήταν οι μεγάλες ποσότητες βιοστερεών, επεξεργασμένων ή μη, που χρησιμοποιούνται για την αύξηση της αγροτικής παραγωγής. Δυστυχώς, τα αστικά λύματα περιέχουν μεγάλες ποσότητες βαρέων μετάλλων, όπως ο ψευδάργυρος και ο χαλκός. Γι'αυτό και είναι απαραίτητη η

αφαίρεση των μετάλλων αυτών από το έδαφος, ή η απορρόφησή τους από φυτά που δεν προορίζονται για βρώση ή άλλη χρήση.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, μετά από μια δοκιμαστική καλλιέργεια τριών μηνών, έδειξαν ότι όταν καλλιεργούνται *Zea mays* μαζί με έναν γνωστό υπερσυσσωρευτή όπως το *Sedum alfredii*, η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων στους καρπούς ήταν μειωμένη. Επίσης, τα βαρέα μέταλλα δεν επηρέασαν την ανάπτυξη κανενός από τα δύο φυτά. Ακόμα, τα βιοστερεά διατήρησαν σταθερό το pH τους, τη συγκέντρωση N-P-K, τη δυνατότητα βλάστησης και την περιεκτικότητα σε νερό, ανεξάρτητα από το είδος του φυτού που χρησιμοποιήθηκε. Άρα δεν μειώθηκε η δυνατότητα χρησιμοποίησης των βιοστερεών ως λίπασμα σε φυτικές καλλιέργειες. Καταδείχθηκε, λοιπόν, η δυνατότητα συγκαλλιέργειας του φυτού του οποίου την παραγωγή θέλουν να ενισχύσουν μαζί με ένα άλλο φυτό που θα αναλάβει να συγκεντρώσει μεγάλο μέρος των βαρέων μετάλλων που βρίσκονται στο έδαφος και τα απόβλητα βιοστερεά. Το φυτό, όπως το *Zea mays*, μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια ως ζωοτροφή.

Ο Φωτιάδης (2006) διεξήγαγε εργαστηριακά πειράματα στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, στο πλαίσιο της διδακτορικής του διατριβής, για την ανεύρεση φυτικών ειδών για την αποκατάσταση εδαφών επιβαρυνμένων με Cd. Τα αποτελέσματα για το Cd έδειξαν ότι ως πιο ανθεκτικά καλλιεργούμενα είδη μπορούν να θεωρηθούν τα ζαχαρότευτλα (όχι σημαντική μείωση των παραμέτρων της αύξησης ακόμη και στη μέγιστη εφαρμοζόμενη συγκέντρωση 240 mg/kg), ο βίκος (όχι σημαντικές διαφορές του χλωρού και ξηρού του βάρους ακόμη και στα 200 mg/kg) και η μηδική (στο υπέργειο τμήμα δεν μετρήθηκαν διαφορές ούτε στη μέγιστη συγκέντρωση 120 mg/kg).

Ο ηλίανθος, η βρώμη, το καλαμπόκι, το σέλινο, και το βαμβάκι ήταν είδη μετρίως ανθεκτικά στο Cd και μάλλον δεν ενδείκνυται η χρήση τους σε επίπεδα Cd στο έδαφος >80 mg/kg, ενώ το μπρόκολο, η ρόκα και το πικροράδικο αποδείχθηκαν ευαίσθητα και δύσκολα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη φυτοαποκατάσταση εδαφών επιβαρυνμένων με Cd. Σε ορισμένα είδη (πικροράδικο, βρώμη, βίκος, μπρόκολο, καλαμπόκι) επηρεάστηκε περισσότερο το υπέργειο τμήμα, σε άλλα το υπόγειο (ηλίανθος, ρόκα, σέλινο, μηδική, βαμβάκι) και στα ζαχαρότευτλα η μείωση ήταν περίπου ίδια για το υπέργειο και το υπόγειο τμήμα.

Από τα ζιζάνια το πιο ανθεκτικό ήταν το λάπαθο που μέχρι τα 120 mg/kg Cd στο έδαφος οι παράμετροι της αύξησης δεν παρουσίασαν σημαντική μείωση και οι

τιμές τους ήταν σταθερά >80% του μάρτυρα. Για την ήρα τα αποτελέσματα δείχνουν ότι είναι ένα ζιζάνιο μετρίως ανθεκτικό στο κάδμιο και ότι πάνω από τα 80 mg/kg Cd στο έδαφος είναι δύσκολο να αντέξει, κάτι το οποίο ισχύει και για το αγριοκρίθαρo.

Ο δείκτης μεταφοράς TFI, που είναι ο λόγος της συγκέντρωσης που συσσωρεύτηκε στο υπέργειο τμήμα προς τη συγκέντρωση Cd στο έδαφος, για το βρόμο ήταν 0,5-1,9, για τα ζαχαρότευτλα 0,6-1,0, για το πικροράδικο 0,8-0,9, για τη ρόκα 0,5-0,9 και για το καλαμπόκι 0,38-0,71. Αυτά τα 5 είδη (το καλαμπόκι λιγότερο από τα υπόλοιπα) φαίνεται να έχουν τη δυναμική για χρήση στη φυτοαποκατάσταση.

### 3.2 Φυτοαποκατάσταση και χαλκός

Υπάρχουν αρκετά δημοσιευμένα επιστημονικά αποτελέσματα για την φυτοαποκατάσταση εδαφών επιβαρυσμένων από χαλκό. Όπως αναφέρουν οι Peer *et al*, ο χαλκός είναι βασικό στοιχείο και απαντάται και ως συνένζυμο για τις οξυδάσες και τις τυροσινάσες. Το πρόβλημα είναι ότι τα ζώα και τα φυτά συχνά συσσωρεύουν τοξικές ποσότητες χαλκού. Η επιβάρυνση με Cu του εδάφους και των υπογείων υδάτων τις περισσότερες φορές οφείλεται σε μεταλλευτική δραστηριότητα. Τέτοιου είδους επιβάρυνση απαντάται πολύ συχνά στον Ελλαδικό αλλά και συνολικά στον Ευρωπαϊκό χώρο λόγω μεταλλείων που λειτουργούσαν από την αρχαιότητα. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, η επίδραση στην Κύπρο είναι σημαντική, τόσο στο φυσικό περιβάλλον όσο και στους ζώντες οργανισμούς (Pyatt 2001). Στην Ελλάδα, υδάτινα οικοσυστήματα και συγκεκριμένα λίμνες όπως η Παμβώτιδα, παρουσιάζουν μεγάλες συγκεντρώσεις χαλκού, ενώ έχουν αναφερθεί και περιπτώσεις μαζικής τροφικής δηλητηρίασης λόγω της μεταφοράς του χαλκού στην διατροφική αλυσίδα.

Οι Chen *et al* (2004) μελέτησαν κατά πόσο το *Vetiveria zizanioides* μπορεί να χρησιμοποιηθεί για φυτοαποκατάσταση σε επιβαρυσμένο με Cu έδαφος στο οποίο είχε προστεθεί EDTA. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σπαρθέν με *Vetiveria zizanioides* έδαφος μπορούσε να επαναπορροφήσει το 54% του αρχικού Cu, μειώνοντας έτσι δραστικά τον κίνδυνο επιβάρυνσης των υπογείων υδάτων από Cu που μεταφέρεται με το νερό.

Οι Wu *et al* (2004) σχεδίασαν ένα πείραμα που είχε σκοπό να διερευνήσει τις επιπτώσεις που θα είχε η προσθήκη N, P και K στην φυτοαποκατάσταση εδάφους επιβαρυσμένου από Cu με χρήση *Brassica juncea*. Η εφαρμογή αζώτου δεν προκάλεσε

την αύξησή της συγκέντρωσης του Cu στο φυτό, ενώ η εφαρμογή φωσφόρου προκάλεσε μια μικρή μείωση. Η μεγαλύτερη ποσότητα Cu απορροφήθηκε με την εφαρμογή 100 και 200 mg/kg N και P, αντίστοιχα, χωρίς καθόλου προσθήκη K σε καμία από τις δύο περιπτώσεις. Άρα, συνολικά, η μεγαλύτερη ποσότητα Cu αφαιρέθηκε από το έδαφος όταν σε αυτό προστέθηκε μια μικρή δόση N και μια μεγαλύτερη δόση P.

Οι Lesage και Meers (2005) εξέτασαν την επίδραση του EDTA και του κιτρικού οξέος στην ικανότητα του *Helianthus annuus* να απορροφά Cu, καθώς και στην μετέπειτα μετακίνηση αυτού στα υπέργεια τμήματα του φυτού. Τα φυτά αναπτύχθηκαν σε ασβεστώδες έδαφος ελαφρά επιβαρυνόμενο με Cu, ενώ προστέθηκε, σε αυξανόμενη αναλογία, EDTA (0.1, 1, 3, 5, 7 και 10 mmol kg<sup>-1</sup> εδάφους) ή κιτρικό οξύ (0.01, 0.05, 0.25, 0.442 και 0.5 mol kg<sup>-1</sup> εδάφους). Όσον αφορά στο κιτρικό οξύ, εφαρμογές που δεν ξεπερνούσαν το όριο συγκράτησης (buffer limit) του εδάφους, δεν είχαν ιδιαίτερα θετική επίδραση στην συγκέντρωση του Cu στους βλαστούς.

Οι Ciura *et al* (2005) διερεύνησαν τη δυνατότητα εννιά διαφορετικών φυτών (*Beta vulgaris*, *Cichorium intybus*, *Cucurbita pepo*, *Phaseolus vulgaris*, *Hordeum vulgare*, *Brassica oleracea var. capitata*, *Zea mays*, *Medicago sativa*, και *Pastinaca sativa*) να απομακρύνουν Cu από επιβαρυνόμενο έδαφος, ενώ κατέληξαν ότι πιο αποτελεσματικό είναι το *Cucurbita pepo*.

Οι Xiaomei *et al* (2005) μελέτησαν την συγκαλλιέργεια του *Sedum alfredi* και του *Zea mays*. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, μετά από μια δοκιμαστική καλλιέργεια τριών μηνών, έδειξαν ότι η συγκέντρωση του Cu στους καρπούς ήταν μειωμένη. Ακόμα, ο χαλκός δεν επηρέασε την ανάπτυξη κανενός από τα δύο φυτά. Καταδείχθηκε, λοιπόν, η δυνατότητα συγκαλλιέργειας ενός είδους του οποίου επιδιώκουμε την ενίσχυση της παραγωγής μαζί με ένα άλλο φυτό που θα συγκεντρώσει μεγάλο μέρος του χαλκού που βρίσκεται στο έδαφος.

Οι Yang *et al* (2002) ασχολήθηκαν με την απορρόφηση του χαλκού από επιβαρυνόμενο έδαφος. Διερευνήθηκε, συγκεκριμένα, η επίδραση του EDTA, του κιτρικού οξέος και του κομπόστ στην δυνατότητα αποκατάστασης επιβαρυνμένου εδάφους από ένα ανθεκτικό στο χαλκό είδος (*E. splendens*). Η διερεύνηση έγινε σε δύο διαφορετικά εδάφη, ένα επιβαρυνόμενο από εξορύξεις χαλκού (MS) και ένα σαθρό έδαφος επιβαρυνόμενο από διεργασίες εξευγενισμού με χαλκό (PS). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εφαρμογή EDTA 2.5–5.0 mmol kg<sup>-1</sup> αύξησε την απορρόφηση Cu κατά τέσσερις και οκτώ φορές, αντίστοιχα από το MS και το PS. Η ποσότητα του Cu που



εξήχθει από τους βλαστούς του *E. splendens* έφτασε τα 800–1000  $\mu\text{g}$  Cu ανά φυτό από το MS και τα 400–700  $\mu\text{g}$  Cu ανά φυτό από το PS.

Αντίθετα, η εφαρμογή 5.0  $\text{mmol kg}^{-1}$  κιτρικού οξέος είχε μηδαμινά αποτελέσματα στην απορρόφηση Cu και από τους δύο τύπους εδάφους, ενώ μείωσε ελαφρά την συνολική δυνατότητα απορρόφησης του *E. splendens*. Η συνολική ποσότητα παραγομένης φυτικής βιομάζας ενισχύθηκε από την εφαρμογή 0.25  $\text{mmol L}^{-1}$  κιτρικού οξέος σε θρεπτικό διάλυμα, άλλα μειώθηκε όταν η εφαρμογή ήταν 5.0  $\text{mmol L}^{-1}$  κιτρικού οξέος.

Όσον αφορά το κομπόστ, η προσθήκη του μείωσε την ποσότητα του απορροφημένου Cu στο MS, άλλα την αύξησε στο PS. Για μεγάλες εφαρμογές (5% κομπόστ), οι βλαστοί του *E. splendens* απορρόφησαν 3.6 φορές περισσότερο χαλκό από το PS σε σχέση με το MS. Συνολικά, ανάμεσα σε όλες τις εφαρμογές, η πιο αποδοτική για την απορρόφηση Cu ήταν η 2.5– 5.0  $\text{mmol kg}^{-1}$  EDTA, ακολουθούμενη από 5%(w:w) κομπόστ, ενώ <5.0  $\text{mmol kg}^{-1}$  κιτρικού οξέος είχαν μηδαμινά αποτελέσματα στην απορρόφηση χαλκού από το *E. splendens* στο PS. Στο έδαφος για το MS, μόνο 2.5–5.0  $\text{mmol kg}^{-1}$  EDTA μπορούν να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, ενώ εφαρμογή 5% κομπόστ ή <5.0  $\text{mmol kg}^{-1}$  κιτρικού οξέος δεν έχουν κάποια εμφανή επίδραση στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

Οι Song *et al* (2004) μελέτησε επίσης την απορρόφηση Cu από το *E. splendens*, καθώς και από το *Silene vulgaris*. Και τα δύο αποδείχθηκε ότι είναι πολύ ανθεκτικά σε τοξικές συγκεντρώσεις χαλκού, ιδίως το δεύτερο. Γι' αυτό υποστηρίζουν ότι το *E. splendens* δεν είναι υπερσυσσωρευτής, όπως αναφέρουν οι Yang *et al* (2002, άλλα συμπεριφέρεται ως φυτό ανεκτικό σε υψηλές συγκεντρώσεις χαλκού (όπως το *Silene vulgaris*). Και τα δύο είδη, ενώ δεν ενδύκνεται για φυτοαποκατάσταση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για φυτοσταθεροποίηση επιβαρυσμένων εδαφών.

Οι συγκεντρώσεις Cu στο φυτό συσχετίζονται στενότερα με τη συγκέντρωση χαλκού, 1 M  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  στο εδαφοδιάλυμα - εξαγόμενο Cu, ή το ελεύθερο  $\text{Cu}^{2+}$  στο έδαφος. Η ευκολία και το χαμηλό κόστος της εξαγωγής 1 M  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  καθιστούν τη μέθοδο αυτή ιδιαίτερα πρόσφορη για την εκτίμηση της διαθεσιμότητας του Cu στο επιβαρυσμένο έδαφος, πάντα σε σχέση με τα δύο συγκεκριμένα (ανθεκτικά στο χαλκό) φυτά της μελέτης. Τα συμπεράσματα δεν είναι δυνατόν να γενικευτούν χωρίς ευρύτερη έρευνα και σε άλλα είδη, μη ανθεκτικά. Χρησιμοποιώντας πολλαπλή

παλινδρόμηση, διερευνήθηκε η συσχέτιση ανάμεσα στις ιδιότητες του εδάφους και τη συγκέντρωση Cu στις ρίζες ορισμένων φυτών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, όταν η δραστηριότητα του ελεύθερου  $\text{Cu}^{2+}$  διατηρούνταν σταθερή, αυξάνοντας το pH του εδαφικού διαλύματος αυξάνονταν ανάλογα και η συγκέντρωση Cu στις ρίζες των φυτών.

Οι Liu *et al* (2001) μελέτησαν την επίδραση διαφορετικών συγκεντρώσεων του σουλφιδίου του χαλκού στην ανάπτυξη του ριζικού συστήματος και των βλαστών του *Zea mays*, καθώς και την απορρόφηση και την συσσώρευση του  $\text{Cu}^{2+}$  από το ριζικό σύστημα και τους βλαστούς του φυτού. Οι συγκεντρώσεις του σουλφιδίου του χαλκού ( $\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$ ) που χρησιμοποιήθηκαν ήταν της τάξης μεγέθους των  $10^{-5}$  με  $10^{-3}$  mol/L. Όσο αυξάνονταν η συγκέντρωση του  $\text{Cu}^{2+}$  στο διάλυμα, τόσο μειωνόταν η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος. Οι βλαστοί που εκτίθονταν σε συγκέντρωση  $10^{-3}$  mol/L  $\text{Cu}^{2+}$  εμφάνιζαν σημαντική μείωση στην ανάπτυξη των ριζών τους, το μήκος των οποίων μετρήθηκε ότι ήταν μόνο το 68% του αντίστοιχου μήκους του μάρτυρα. Οι ίδιοι οι βλαστοί ήταν εν πολλοίς οι ίδιοι με τους μάρτυρες, υπό εφαρμογή  $10^{-5}$  με  $10^{-4}$  mol/L  $\text{Cu}^{2+}$ . Αντίθετα, τα φύλλα ήταν εμφανώς μικρότερα όπου εφαρμόστηκαν  $10^{-3}$  mol/L  $\text{Cu}^{2+}$ .

Συνολικά, το βάρος τόσο των ριζών όσο και των βλαστών μειωνόταν σταδιακά όσο αυξανόταν η συγκέντρωση  $\text{Cu}^{2+}$ . Το συμπέρασμα αυτό συμφωνεί με το προαναφερθέν αντίστοιχο συμπέρασμα για την επίδραση του σουλφιδίου του χαλκού. Το *Zea mays* έχει αξιοσημείωτη ικανότητα απομάκρυνσης Cu από διαλύματα και συσσώρευσής του. Η συγκέντρωση Cu στις ρίζες του *Zea mays* αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης του  $\text{Cu}^{2+}$  στο διάλυμα. Η ποσότητα χαλκού στις ρίζες του φυτού, με εφαρμογή  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$  και  $10^{-3}$  mol/L  $\text{Cu}^{2+}$ , ήταν 10, 8 και 1.5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη συγκέντρωση στις ρίζες του μάρτυρα. Η ποσότητα, όμως, που μεταφερόταν και αποθηκεύονταν στα φύλλα και στους καρπούς του φυτού ήταν αναλογικά πολύ μικρή.

Τέλος, οι Arteaga *et al* (1998) εντόπισαν ένα φυτό της ερήμου, το *Larrea tridentate*, που έχει την ικανότητα να απορροφά και να συγκρατεί μέταλλα, και διερεύνησαν το αν το φυτό αυτό είναι υπερσυσσωρευτής χαλκού και αν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για φυτοαποκατάσταση περιοχών επιβαρυνμένων με χαλκό. Για την κατανόηση του μηχανισμού ανάληψης χαλκού από το έδαφος έγινε μέτρηση με φασματοσκοπική μέθοδο.

Μια υδροπονική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε για να μετρηθεί η ποσότητα μετάλλου που προσλαμβάνει το φυτό. Η πρόσληψη του χαλκού έγινε εμφανής μετά από έκθεση των φυτών σε διάλυμα  $635 \text{ mg/Kg Cu}^{2+}$  για μια περίοδο 48 ωρών. Τα φυτά απορρόφησαν μεγάλες ποσότητες χαλκού στους ιστούς των ριζών, των φύλλων και των ανθών. Η ανάλυση των ιστών του φυτού για να προσδιοριστεί η ύπαρξη χαλκού έγινε με φασματοφωτομετρία ατομικής απορρόφησης. Το αποτέλεσμα επιβεβαιώθηκε και μέσω μικροφθορισμού ακτίνων-χ. Τέλος, τα φυτά αναλύθηκαν με τη φασματοσκοπική μέθοδο. Τα αποτελέσματα αυτών των μεθόδων έδειξαν ότι ο μηχανισμός υπερσυσσώρευσης χαλκού υπό υδροπονική καλλιέργεια είναι διαφορετικός από τον μηχανισμό απορρόφησης και βιοσυσσώρευσης χαλκού από το έδαφος.

### 3.3 Ο ρόλος του pH στην φυτοαποκατάσταση

Το pH αναφέρεται στην συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου ( $\text{H}^+$ ) σε ένα υπόστρωμα όπως το έδαφος. Το pH μετριέται σε λογαριθμική κλίμακα, έτσι ώστε κάθε αλλαγή στο pH να αντιστοιχεί σε μείωση της συγκέντρωσης  $\text{H}^+$  κατά δέκα φορές. pH ίσο με τη μονάδα (1) θεωρείται όξινο επειδή έχει πολύ μεγάλη συγκέντρωση  $\text{H}^+$ , και pH ίσο με 13 θεωρείται αλκαλικό επειδή δεν έχει σχεδόν καθόλου ελεύθερα  $\text{H}^+$ . Σύμφωνα με τον Cox (2000), το pH επηρεάζει σημαντικά το CEC του εδάφους επειδή όταν είναι χαμηλό περιορίζει τις διαθέσιμες θέσεις ανταλλαγής. Τα ελεύθερα  $\text{H}^+$  σχηματίζουν ισχυρότερους δεσμούς με τα κολλοειδή του εδάφους από ότι άλλα κατιόντα, άρα, παρουσία πλεονάζοντος αριθμού  $\text{H}^+$ , οποιοδήποτε μέταλλο έχει προσροφηθεί με ένα κολλοειδές του εδάφους θα εκδιώκεται.

Σε χαμηλό pH (<6), τα  $\text{H}^+$  βρίσκονται σε αφθονία και έτσι αντικαθιστούν όλα τα άλλα κατιόντα, καθιστώντας τα με αυτό τον τρόπο βιοδιαθέσιμα. Σε υψηλό pH (>7), τα κατιόντα είναι λιγότερο βιοδιαθέσιμα επειδή έχουν λιγότερο ανταγωνισμό από τα ελεύθερα  $\text{H}^+$  για τις διαθέσιμες θέσεις ανταλλαγής. Πολλά κατιόντα σχηματίζουν δεσμούς με ελεύθερα υδροξύλια ( $\text{OH}^-$ ) και σχηματίζουν αδιάλυτα ένυδρα μεταλλικά οξείδια τα οποία δεν είναι διαθέσιμα προς απορρόφηση, όπως το  $\text{CdCO}_3$ . Αειθαλή είδη φυτών σε αλκαλικό έδαφος γίνονται κίτρινα λόγω της έλλειψης

διαθέσιμου σιδήρου (Fe), ενώ σε άλλα φυτά παρατηρήθηκε τοξικότητα από υψηλές συγκεντρώσεις αργιλίου (Al) σε εδάφη με χαμηλό  $H^+$ .

Οι Clemente *et al* (2005) εφάρμοσαν ένα πρόγραμμα φυτοαποκατάστασης 4 ετών στην Aznalcollar της Ισπανίας, σε μια περιοχή με τοξική διαρροή υπολλειμάτων πυριτίου, μολυσμένη από βαρέα μέταλλα (Zn, Cu, Pb και Cd) και As. Η διαρροή αυτή προκάλεσε την οξειδωση και την κινητοποίηση των βαρέων μετάλλων στο έδαφος σε μικρό χρονικό διάστημα. Εφαρμόστηκε οργανικό λίπασμα (κοπριά αγελάδας και κομπόστ) και ασβέστη και καλλιεργήθηκαν δύο διαδοχικές σοδειές *Brassica juncea*, ενώ ακολούθησε περίοδος αγρανάπαυσης χωρίς περαιτέρω επεξεργασία. Υπολογίσθηκαν δε οι αλλαγές στο pH του εδάφους, η ποσότητα των απορροφούμενων μετάλλων, η συγκέντρωση του αρσενικού και η μικροβιακή βιομάζα.

Η αρχική οξειδωση των μεταλλικών σουλφιδίων από τα υπολείμματα του πυριτίου απελευθέρωσε διαλυτά μέταλλα και περιόρισε το pH σε υπερβολικά όξινες τιμές (μέση τιμή 4.1, εύρος 2.0 – 7.0). Η προσθήκη του οξέως (έως 64 t ha<sup>-1</sup>) αύξησε το pH σε τιμές που επέτρεπαν την καλλιέργεια του εδάφους, ενώ περιόρισε και την κινητικότητα των μετάλλων, με αποτέλεσμα να μειωθούν σημαντικά οι DTPA-εξαγόμενες μεταλλικές συγκεντρώσεις. Η επόμενη φάση, της αγρανάπαυσης, μείωσε περαιτέρω τις συγκεντρώσεις των μετάλλων. Η προσθήκη οργανικών λιπασμάτων αύξησε τη μικροβιακή βιομάζα (οι τιμές για τον μάρτυρα, το κομπόστ και τις οργανικές ουσίες ήταν 11.6, 15.2 και 14.9 g kg<sup>-1</sup> TOC και 123, 170 και 275 μg g<sup>-1</sup> βιομάζας, αντίστοιχα). Η φυτοαποκατάσταση ήταν επιτυχής, ενώ η σημασία του ελέγχου του pH του εδάφους για την συντέλεση αυτής τα επιτυχίας ήταν καταλυτική. Μάλιστα, η προσθήκη των οργανικών ενώσεων και του ασβέστη ήταν σημαντικότερη από την επίδραση της καλλιέργειας του *Brassica juncea* αυτής καθαυτής. Υπονοείται έτσι ότι το αποτέλεσμα αυτό θα μπορούσε να έχει επιτευχθεί με οποιοδήποτε άλλο φυτό.

Οι Johansson *et al* (2004) μελέτησαν την δυνατότητα φυτοαποκατάστασης (μέσω απορρόφησης των μετάλλων) ή σταθεροποίησης του εδάφους στο ορυχείο χαλκού της Σκουριώτισσας στην Κύπρο. Με το ορυχείο αυτό είχαν ασχοληθεί και οι Pyatt *et al* (2001). Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τα *Pistacia terebinthus*, *Cistus creticus*, *Pinus brutia* και *Bosea cypria*, για τα οποία το ζητούμενο ήταν να διαπιστωθεί αν μπορούν να επιβιώσουν σε περιβάλλον με υψηλή συγκέντρωση χαλκού και αν μπορούν να απορροφήσουν σημαντική ποσότητα αυτού του χαλκού, η

συγκέντρωση του οποίου στα υπολείμματα του ορυχείου έφτανε τα 787 mg Cu ανά kg ΞΒ. Άλλος ένας στόχος της έρευνας ήταν να διαπιστωθεί αν η Βινάσσα, υγρό υπόλειμμα της παραγωγής κρασιού το οποίο περιέχει οργανικά οξέα και έχει χαμηλό pH, ή ένα λίπασμα από κοτόπουλα μπορούσαν να βελτιώσουν την ανάπτυξη των φυτών ή/και την απορροφητικότητα του χαλκού. Η βινάσσα προήρθε από την ζυθοποιεία ΚΕΟ και περιείχε αμινοξέα, τανικά οξέα, ταρταρικά οξέα, ίχνη σακχάρων και άλλα φυσικά συστατικά του κρασιού, ενώ το λίπασμα προήρθε από ντόπιους ορνιθοτρόφους. Στον πίνακα φαίνεται η συγκέντρωση του χαλκού και το pH στα διάφορα δείγματα εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν:

**Πίν. 2 Η συγκέντρωση του χαλκού και το pH στα διάφορα δείγματα εδάφους**

	pH	pH (0–10 cm)	Cu <sub>tot</sub> (mg kg ΞΒ <sup>-1</sup> )
Υπολείμματα ορυχείου	6.5	–	787
Βινάσσα	3.8	–	3.04
Λίπασμα από κοτόπουλα	8.8	–	83
Υπολείμματα ορυχείου + έδαφος	–	7.5 (0.1)	519
Υπολείμματα ορυχείου + έδαφος + βινάσσα	–	7.5 (0.1)	520
Υπολείμματα ορυχείου + έδαφος + λίπασμα	–	7.2 (0.1)	490

Τα τέσσερα φυτικά είδη φυτεύτηκαν στην περιοχή τα ορυχείου χωρίς καμία προσθήκη, με εφαρμογή βινάσσας ή με εφαρμογή λιπάσματος. Μετά από 3 μήνες, μετρήθηκε το μέγεθος των φυτών και τα φυτά αναλύθηκαν για να προσδιορισθεί η συγκέντρωση χαλκού. Μετρήθηκε επίσης το pH και η συγκέντρωση Cu στο υπόλειμμα του ορυχείου. Για να διαπιστωθεί αν τα φυτά συγκρατούσαν το χαλκό στις ρίζες ή στο βλαστό, έγινε μελέτη σε θερμοκήπιο όπου τα φυτά καλλιεργήθηκαν για τρεις εβδομάδες σε έδαφος εμπλουτισμένο με χαλκό.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι και τα τέσσερα είδη επέζησαν και αναπτύχθηκαν στο περιβάλλον του ορυχείου, άρα μπορούν να επιβιώσουν σε τοξικό περιβάλλον χαλκού. Τα φύλλα του *Cistus creticus* είχαν τη μεγαλύτερη συγκέντρωση χαλκού από όλα τα είδη, ενώ γενικά η συγκέντρωση του Cu διέφερε αρκετά από είδος σε είδος. Επίσης, η κατανομή του χαλκού μέσα στο φυτό διέφερε σημαντικά από

είδος σε είδος. Έτσι, στο *Pistacia terebinthus* και στο *Cistus creticus* η μεγαλύτερη ποσότητα χαλκού βρέθηκε στις ρίζες, ενώ στο *Bosea cypria* η μεγαλύτερη ποσότητα βρισκόταν στα φύλλα. Η προσθήκη βινάσσας και λιπάσματος κοτόπουλων δεν βελτίωσε την ανάπτυξη των φυτών ή την απορροφητικότητα του χαλκού, άλλαξε όμως την κατανομή της συγκέντρωσης του Cu στο *Bosea cypria*.

Συνολικά, δεν είναι απόλυτα σαφές πιο από όλα τα φυτά υπερτερεί έναντι άλλων για χρήση σε φυτοαποκατάσταση. Το *Bosea cypria*, αν και φαίνεται κατάλληλο, εντούτοις αναπτύσσεται πολύ αργά. Το *Pistacia terebinthus*, αν και έχει ταχύτερη ανάπτυξη, δεν συγκεντρώνει μεγάλη ποσότητα χαλκού. Το φυτό αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για φυτοσταθεροποίηση του εδάφους, μια και συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ποσό χαλκού στις ρίζες του. Τα ίδια χαρακτηριστικά είχε και το *Cistus creticus*, οπότε και αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για φυτοσταθεροποίηση.

Οι Gardea-Torresdey *et al* (1995) διεξήγαγαν πειράματα με επτά διαφορετικά είδη του *Medicago sativa* (alfalfa), με σκοπό να διερευνήσουν τη δεσμευτική του ικανότητα ως προς τον χαλκό. Και τα επτά είδη έδειξαν θετικά στοιχεία ως προς τη δυνατότητα απορρόφησης, ενώ σε όλα τα είδη η απορροφούμενη ποσότητα ήταν άμεσα συσχετιζόμενη με το pH. Η δέσμευση έλαβε χώρα σε 5 μόλις λεπτά για όλους τους πληθυσμούς του alfalfa, άλλα οι ποσότητες διέφεραν από είδος σε είδος. Η εξάρτηση της δέσμευσης των ιόντων χαλκού από τη βιομάζα του alfalfa από το pH ωθεί στο συμπέρασμα ότι το σύστημα είναι δυνατόν να ανακυκλωθεί, να επαναληφθεί περιοδικά.

Από όλες τις ποικιλίες, τις καλύτερες δεσμευτικές ικανότητες είχε η ποικιλία Malone. Η μέγιστη συνδεσιμότητα των ιόντων χαλκού από τη βιομάζα Malone παρατηρήθηκε μεταξύ pH 5.0 και pH 6.0. Σε pH μεγαλύτερο από 6.0, τα ιόντα του χαλκού αρχίζουν να καθιζάνουν από το διάλυμα.

Οι Pastor *et al* (2003) μελέτησαν το *Lubinus albus L*, ένα φυτό που προορίζεται για χρήση σε περιπτώσεις φυτοαποκατάστασης εδαφών με μέτρια επιβάρυνση από μέταλλα, ενώ στη συγκεκριμένη μελέτη επικεντρώθηκαν στη χρήση του στο Zn σε δύο διαφορετικά αλκαλικά εδάφη: ένα κανονικό και ένα απασβεστισμένο όξινο έδαφος. Για το λόγο αυτό μελετήθηκαν οι επιπτώσεις διαφορετικών συγκεντρώσεων Zn στην απορρόφηση θρεπτικών συστατικών, την ανάπτυξη και την αζωτοποιητική δραστηριότητα του *Lubinus albus L*. Το πείραμα διήρκησε 12 εβδομάδες σε συνθήκες θερμοκηπίου, ενώ σε κάθε είδος εδάφους

τοποθετήθηκαν 4 όμοια δοχεία (οι διαφορετικές συγκεντρώσεις Zn ήταν 100, 150, 300, 500 και 700mg/Kg Zn).

Η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε σημαντικές επιπτώσεις των διαφορετικών συγκεντρώσεων Zn. Η ανάπτυξη του φυτού γινόταν γρηγορότερα στο όξινο έδαφος, άλλα παρεμποδιζόταν σημαντικά για περισσότερο από 300 mg/Kg Zn, οπότε το pH γινόταν 4.7 . Προκλήθηκαν επίσης θρεπτικές ανωμαλίες, σε όλες τις συγκεντρώσεις Zn. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση Zn βρέθηκε στις ρίζες του φυτού, και για τα δύο είδη εδαφών. Στο όξινο έδαφος, το φυτό απορρόφησε σημαντικές ποσότητες Zn, τόσο στις ρίζες όσο και στο υπέργειο τμήμα του, για εφαρμοζόμενη δόση Zn 300 mg/Kg. Τα αποτελέσματα αυτά καταγράφονται και στους επόμενους πίνακες (3,4):

**Πίν.3 Απορρόφηση Zn από τα διάφορα τμήματα του φυτού σε διάφορες τιμές pH**

Αλκαλικό Έδαφος	Συγκέντρωση Zn (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)		
		pH	Υπέργ.	Ρίζα
Αρχικό έδαφος		7.3	33	-
Μάρτυρας		7.6	29	-
100		7.7	98	6.5
150		7.7	133	9.1
300		7.8	265	18.5
500		7.8	425	34.1
700		7.9	495	49.8

**Πίν.4 Απορρόφηση Zn από τα διάφορα τμήματα του φυτού σε διάφορες τιμές pH**

Όξινο Έδαφος	Συγκέντρωση Zn (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)		
		pH	Υπέργ.	Ρίζα
Αρχικό έδαφος		5.1	35	0.1
Μάρτυρας		5.0	37	0.3
100		4.8	115	5.1
150		4.8	130	5.9
300		4.7	275	10.9
500		4.7	425	15.7

Τα αποτελέσματα αυτά καθιστούν το *Lubinus albus L* εν δυνάμει φυτοαποκαταστάτη, ενώ θα μπορούσε να είναι χρήσιμο και στην αναγέννηση ήπια επιβαρυμένων εδαφών.

Οι Everhart *et al* (2006) μελέτησαν σε συνθήκες θερμοκηπίου τη βιοδιαθεσιμότητα των *Typic epiaquoll* και *Terric haplohemist*, τα οποία εδάφη είχαν επεξεργαστεί με ασβεστόλιθο. Το pH των εδαφών αυτών κυμαινόταν από 5.1 έως 7.5, το ποσοστό οργανικής ύλης από 65 έως 72% και η συνολική ποσότητα Ni από 63 έως 22,000 mg/kg. Σε αυτά τα εδάφη καλλιεργήθηκαν *Avena sativa* και *Alyssum murale*, με το πρώτο είδος να μην είναι υπερσυσσωρευτής ενώ το δεύτερο είναι. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο θερμοκήπιο, της χημικής εκχύλισης και των βιοαισθητήριων συνέτειναν στο ότι αυξάνοντας το pH του εδάφους με ασβέστωση, αυξανόταν και η βιοδιαθεσιμότητα του Ni. Η απορροφητική ικανότητα του *Alyssum murale* αυξανόταν με την αύξηση του pH του εδάφους, ενώ η απορροφητική ικανότητα του *Avena sativa* μειωνόταν. Η υψηλότερη βιοδιαθεσιμότητα του Ni παρατηρούνταν όταν το pH του εδάφους έπαιρνε δύο συγκεκριμένες τιμές, 5.1 και 6.0. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 5:



**Πίν. 5 Συγκέντρωση του Ni στο φυτό *Alyssum* σε διάφορες συγκεντρώσεις Ni στο έδαφος σε διάφορα εδαφικά pH**

Έδαφος	Ph Εδάφους	Ni (Mg Kg <sup>-1</sup> )	Ni (Mg Kg <sup>-1</sup> )
<i>Έδαφος</i>			
Εδαφος1	7.1	63.7	353
Εδαφος2	6	2115	8327
Εδαφος3	6.7	2746	6818
Εδαφος4	7.1	4700	11,595
Εδαφος5	7.5	3468	8280
<i>Οργανικό Έδαφος</i>			
Μικρή Ποσότητα Ni, Χωρίς Ασβέστη	6.1	2006	1446
Μικρή Ποσότητα Ni, Με Ασβέστη	6.8	1756	5066
Μεγάλη Ποσότητα Ni, Χωρίς Ασβέστη	5.8	4902	1103
Μεγάλη Ποσότητα Ni, Με Ασβέστη	6.5	3516	2442
Μεγάλη Ποσότητα Ni, Με Ασβέστη	6.9	3259	6079
Υπερβολική Ποσότητα Ni, Χωρίς Ασβέστη	5.1	22,445	-

Τα συμπτώματα της τοξικότητας του Ni γινόταν λιγότερο δραστικά με την αύξηση του pH και της οργανικής ύλης. Συγκεκριμένα, η αύξηση του pH επιτυγχάνει τον περιορισμό της τοξικότητας το Ni μέσω μετατροπής του διαλυτού Ni σε άλλες μορφές ενσωματωμένες στο έδαφος.

Σε πειράματα που έγιναν στην Ιταλία, οι Robinson *et al* (1997) διερεύνησαν τη δυνατότητα χρήσης του υπερσυσσωρευτή *Alyssum bertolonii* για απορρόφηση Ni από εδάφη. Τα πειράματα έγιναν στην περιοχή Μούρλο της Τοσκάνης και για μια περίοδο 2 ετών, όπου το έδαφος εμπλουτιζόταν διαδοχικά με διάφορες ουσίες. Ο καλύτερος συνδυασμός (N+K+P) απέδωσε τριπλάσια αύξηση της βιομάζας με 9.0 t/ha. Περιεχόμενο σε Ni της τάξης του 0.8% κ.β. θα έδινε απόδοση Ni 72 kg/ha. Ακόμα, δεν υπήρχε συσχέτιση ανάμεσα στην ηλικία του φυτού και στο περιεχόμενό του σε Ni. Η δυνατότητα μακροχρόνιας διατήρησης της ικανότητας σποράς του εδάφους προσομοιώθηκε μέσω διαδοχικών εκχυλίσεων με διάλυμα KH σε pH 2, 4 και 6. Η προσομοίωση αυτή έδωσε ένα οριακό περιεχόμενο σε Ni της τάξης των 768 μg/g.

Στη συνέχεια, οι Robinson *et al* (1998) προσπάθησαν να μοντελοποιήσουν τις διαδοχικές σοδειές υπερσυσσωρευτών Ni και την επίδρασή τους στη διαθεσιμότητα του Ni σε διάφορα εδάφη. Όλα τα εδάφη, με μία εξαίρεση, περιείχαν περίπου 2000 μg/g Ni και είχαν παρεμφερείς ιδιότητες και συμπεριφορά. Στη μελέτη δεν ελήφθησαν υπόψη παράγοντες όπως το κλίμα, ο καιρός και το pH. Οι παράγοντες αυτοί είναι πολύ σημαντικοί, οπότε και τα αποτελέσματα της μελέτης λαμβάνονται υπόψη μόνο κατά προσέγγιση.

Βρέθηκε ότι μια ποσότητα Ni ανάμεσα στο 13% και το 80% του συνολικού ήταν δυνητικά διαθέσιμο για απορρόφηση από τα φυτά. Το υπόλοιπο δεν ήταν δυνατό να απορροφηθεί ακόμα και ύστερα από μεγάλο θεωρητικά αριθμό καλλιεργειών υπερσυσσωρευτικών ειδών. Το γεγονός αυτό σε κάθε περίπτωση περιορίζει τη δυνατότητα για φυτοαποκατάσταση. Το θεωρητικό αυτό υπόλοιπο μπορεί να υπολογισθεί μαθηματικά. Λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι η συγκέντρωση του Ni στον υπερσυσσωρευτή εξαρτάται από το ποσοστό του Ni στο έδαφος, μπορεί να υπολογισθεί πόσες καλλιέργειες είναι οικονομικά αποδεκτό να γίνουν σε κάθε έδαφος.

Βρέθηκε, λοιπόν, ότι στην Νέα Ζηλανδία, όπου και έγινε η έρευνα, ανάλογα με την περιοχή μπορούσαν να γίνουν από τρεις ως δεκαοκτώ καλλιέργειες πριν χρειαστεί επέμβαση ή τροποποίηση στη σύσταση του εδάφους. Με παρόμοιο τρόπο μπορεί να υπολογισθεί η βιοδιαθεσιμότητα και άλλων βαρέων μετάλλων σε εδάφη στα οποία πρόκειται να γίνει φυτοαποκατάσταση ή φυτοσταθεροποίηση.

Οι Chen *et al* (2003) ανέλυσαν το ρόλο του κιτρικού οξέος στην φυτοαποκατάσταση μέσω υδροπονικών πειραμάτων και πειραμάτων απορρόφησης.

Οι έρευνά τους έδειξε ότι το κιτρικό οξύ μείωσε την προσρόφηση του μόλυβδου και του καδμίου, περισσότερο δε του καδμίου. Η μείωση αυτή οφείλεται κυρίως στην μείωση του pH. Η παρουσία του κιτρικού οξέος μπορεί να μειώσει την τοξικότητα του Pb και του Cd και να διεγείρει την πρόσληψή τους από το φυτό και τη μεταφορά τους από τις ρίζες στον βλαστό. Αυτό με τη σειρά του οφείλεται στη μετατροπή σύνθετων τοξικών μορφών σε απλούστερες.

Στο συγκεκριμένο πείραμα, όταν το κιτρικό οξύ που προστέθηκε ήταν της τάξης των 0, 1 και 3 mmol l<sup>-1</sup>, η ποσότητα του απορροφούμενου μόλυβδου ήταν 2059.6, 2021 και 1970 μmol kg<sup>-1</sup>, ενώ αυτή του καδμίου ήταν 785.6, 587.2 και 440.8 μmol kg<sup>-1</sup>, αντίστοιχα. Άρα με την αύξηση της συγκέντρωσης του κιτρικού οξέος η ποσότητα του μόλυβδου και του καδμίου που απορροφήθηκε από το φυτό μειώθηκε. Ο ρυθμός μείωσης για τον μόλυβδο ήταν 1.87%, 4.35%, ενώ ο ρυθμός μείωσης για το κάδμιο ήταν 25.25%, 43.89%, αντίστοιχα. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στην μεταβολή του pH.

Οι Wei *et al* (2006) στη μελέτη τους συνέκριναν τους παράγοντες που επηρεάζουν την απορρόφηση του As από το *Pteris vittata* σε δύο τοποθεσίες, μία που περιείχε As μαζί με Au και μία που περιείχε Hg/Pb. Το έδαφος σε αυτές τις δύο τοποθεσίες περιείχε υψηλές συγκεντρώσεις As (26.8–2955 mg kg<sup>-1</sup>). Παρόλο που η συγκέντρωση του As, το pH, η ικανότητα ανταλλαγής ιόντων του εδάφους και η φυτική βιομάζα διέφεραν σημαντικά ανάμεσα στις δύο τοποθεσίες, δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στη συγκέντρωση του As στις ρίζες και στον βλαστό του φυτού, ούτε στην αναλογία ανάμεσά τους. Τα αναλυτικά αποτελέσματα έδειξαν μικρές αλλαγές στα pH, CEC, OOA (Ολική Οργανική Ουσία) και στην υφή του εδάφους στις δύο τοποθεσίες. Το έδαφος στις δύο τοποθεσίες διέφερε σημαντικά στο pH, όπως και οι συγκεντρώσεις As και P. Τα στοιχεία αυτά συνοψίζονται στον πίνακα 6.

Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το *Pteris vittata* έχει ικανότητες υπερσυσσώρευσης. Σε μία από τις δύο τοποθεσίες, η συγκέντρωση του As εξαρτιόταν θετικά από την αντίστοιχη συγκέντρωση του P και του K, άλλα αρνητικά από τη συγκέντρωση του Ca, άρα τα τρία αυτά στοιχεία επηρέασε την απορρόφηση του As από το *Pteris vittata*.

**Πίν. 6 Παράγοντες που επηρεάζουν την απορρόφηση As από το φυτό *Pteris vittata***

Τοποθεσίες	pH	CEC (mmol 100 g <sup>-1</sup> )	ΟΟΑ (g kg <sup>-1</sup> )	Υφή (%)			As (mg kg <sup>-1</sup> )	P (mg kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )
				Άμμος	Ϊλη	Άργιλος			
Έδαφος 1	7.1 ± 0.4	28.3 ± 3.8	6.2 ± 1.2	20.1 ± 7.7	2.8 ± 2.2	42.7 ± 6.9	1342 ± 653	973 ± 246	65 928 ± 7337
Έδαφος 2	5.9 ± 0.4	19.7 ± 7.7	8.3 ± 2.3	41.4 ± 5.1	22.9 ± 2.4	36.7 ± 3.4	509 ± 406	1547 ± 365	56 750 ± 11 475

Οι Yanai *et al* (2006) μελέτησαν την επίδραση των χαρακτηριστικών του εδάφους στην φυτοαποκατάσταση με χρήση *Thlaspi caerulescens*. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επίδραση του pH του εδάφους και της συγκέντρωσης το Cd στο έδαφος στην απορροφητική ικανότητα σε ένα είδος εδάφους, καθώς και το εύρος και τις διαφορές στην απορρόφηση Cd σε μια σειρά επιβαρυμένων εδαφών. Σε εδάφη με συνολική συγκέντρωση Cd 0.6-3.7 mg kg<sup>-1</sup> το *Thlaspi caerulescens* παράγαγε περισσότερη βιομάζα όταν το pH ήταν από 5.1 ως 7.6, παρά από όταν το pH ήταν 4.4. Η υψηλότερη συγκέντρωση Cd (236 mg kg<sup>-1</sup>) στο φυτό, καθώς και η υψηλότερη απορροφημένη ποσότητα Cd (228 mg kg<sup>-1</sup>) παρατηρήθηκαν για pH 5.1. Σε εδάφη με συνολική συγκέντρωση Cd 2.6-314.8 mg kg<sup>-1</sup> οι συγκεντρώσεις στο βλαστό ήταν 10.9-1196 mg kg<sup>-1</sup>. Ανάλυση πολλαπλής παλινδρόμησης φανέρωσε ότι υψηλή συγκέντρωση Cd στο *Thlaspi caerulescens* συνδέεται με υψηλή συγκέντρωση Cd στο έδαφος, χαμηλό pH και πιο τραχεία υφή εδάφους.

Οι Kukier *et al* (2004) διερεύνησαν τις προοπτικές οικονομικής εκμετάλλευσης φυτοαποκατάστασης νικελίου με χρήση υπερσυσσωρευτών, καθώς και την απορρόφηση μετάλλου μέσω υπερσυσσωρευτών, από εδάφη στα οποία η συγκέντρωση νικελίου δεν είναι αρκετή για να επιτρέπει την βιώσιμη εξόρυξη του με παραδοσιακές τεχνικές. Δύο υπερσυσσωρευτές Ni και Co, τα *Alyssum murale* και *Alyssum corsicum*, φυτευτήκαν σε δύο διαφορετικά εδάφη, σε Terric Harpohemist και σε Typic Eriaquoll, και τα δύο βιομηχανικά μολυσμένα, καθώς και σε Typic Xerochrepts.

Τα εδάφη ήταν όξινα και προστέθηκε ασβέστης, ώστε να καλύπτονται όλες οι περιοχές του pH, από το ισχυρά όξινα ως το ήπια αλκαλικό. Το *Alyssum* που αναπτύχθηκε στα δύο πρώτα βιομηχανικά μολυσμένα εδάφη εμφάνιζε αυξανόμενη

συγκέντρωση Ni όσο το pH του εδάφους αυξανόταν. Αντίθετα, η ανάστροφη τάση εμφανιζόταν στο έδαφος Typic Xerochrepts.

Το μεγαλύτερο ποσοστό Ni απορροφήθηκε από το Terric Harlohemist (6.3%), ακολουθούμενο από το Typic Eriaquoll (4.7%), ενώ στο Typic Xerochrepts το ποσοστό απορρόφησης ήταν 0.84%. Η μέγιστη φυτοαπορρόφηση Ni για τα τρία προαναφερθέντα εδάφη έγινε για pH 7.3, 7.7 και 6.4, αντίστοιχα. Όσον αφορά στο Co, η συγκέντρωσή του στα φυτά αυξανόταν με την αύξηση του pH στο Terric Harlohemist, άλλα μειωνόταν στο Typic Eriaquoll. Το μεγαλύτερο ποσοστό Co απορροφήθηκε από το Typic Eriaquoll (1.71%), ακολουθούμενο από το Terric Harlohemist (0.83%), ενώ στο Typic Xerochrepts το ποσοστό απορρόφησης ήταν 0.05%.

Οι διαφορές αυτές που παρατηρήθηκαν στην απορρόφηση του Ni και του Co από το *Alyssum* στα διαφορετικά εδάφη και για διαφορετικές τιμές pH συνδέονται σύμφωνα με τους ερευνητές με τις διαφορετικές συγκεντρώσεις οργανικής ύλης και σιδήρου στα εδάφη.

Οι Querol *et al* (2006) εξέτασαν τη χρήση ζεολιτικών υλικών που προέρχονται από αιθάλη για την ακινητοποίηση μολυντών σε μολυσμένα εδάφη. Η έρευνα έγινε στην περιοχή Guadiamar της Ισπανίας, περιοχή που πλήγηκε από όξινη βροχή πυριτίου το 1998. αν και έγινε επιχείρηση αποκατάστασης της περιοχής, παρέμειναν υψηλές συγκεντρώσεις Zn, Pb, As, Cu, Sb, Co, Tl και Cd. Εφαρμόστηκαν διάφορες τεχνικές φυτοαποκατάστασης, ενώ στην περιοχή εφαρμόστηκαν και 1100kg ζεολιτικού υλικού σε διαφορετικές δοσολογίες (10–25 kg ανά εκτάριο) σε βάθος 25 εκατοστών στο έδαφος. Σε μια άλλη περιοχή δεν χρησιμοποιήθηκαν ζεολιτικά υλικά.

Στη συνέχεια έγινε δειγματοληψία από τις διαφορετικές περιοχές μετά από 1 και 2 χρόνια. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το ζεολιτικό υλικό μείωσε τη απομάκρυνση των Zn, Ni, Cu, Co και Cd. Η προσρόφηση των μετάλλων σε κολλοειδή του εδάφους ήταν η βασικότερη αιτία για αυτή την σταθεροποίηση. Η προσρόφηση αυτή έγινε πιθανών λόγω της αύξησης του pH από 3.3 σε 7.6, λόγω της αλκαλικότητας του εφαρμοζόμενου ζεολιτικού υλικού.

## 4. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 4.1. Γενικά

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε κατά το έτος 2005 σε φυτοδοχεία στο θερμοκήπιο και στον αγρό στο Αγρόκτημα του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην περιοχή του Βελεστίου. Οι αναλύσεις για  $\text{Cu}^{2+}$  έγιναν στο Εργαστήριο Εδαφολογίας του ίδιου Πανεπιστημίου.

Ειδικότερα, στον αγρό μελετήθηκε η επίδραση τεσσάρων επιπέδων χαλκού (0, 20, 40 και 60  $\text{mgCu kg}^{-1}$  ξηρού εδάφους) σε δύο καλλιεργούμενα είδη (καλαμπόκι και ηλιάνθος) και τέσσερα ζιζάνια (βλήτο, βρόμος, ήρα και σινάπι). Στο θερμοκήπιο, σε φυτοδοχεία, μελετήθηκε η επίδραση εννιά επιπέδων χαλκού (0, 5, 10, 20, 40, 80, 120, 160 και 200  $\text{mgCu kg}^{-1}$  ξηρού εδάφους) στα ίδια είδη φυτών σε δύο pH εδάφους.

Οι σπόροι που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή του πειράματος ήταν του εμπορίου για τα καλλιεργούμενα είδη, ενώ για τα ζιζάνια, είχαν συλλεχθεί την προηγούμενη χρονιά στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο. Ο χαλκός που εφαρμόστηκε είχε την μορφή ένυδρου θεικού χαλκού ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) καθαρότητας 99,5% που κυκλοφορεί στο εμπόριο.

### 4.2. Πειράματα θερμοκηπίου

#### 4.2.1. Πειραματικό σχέδιο

Το πειραματικό σχέδιο που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή του πειράματος ήταν οι τυχαιοποιημένες πλήρεις ομάδες (Randomized Complete Blocks – RCB), με τρεις επαναλήψεις για κάθε επέμβαση.

#### 4.2.2. Εγκατάσταση

Τα φυτικά είδη που χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα ήταν τα καλλιεργούμενα, καλαμπόκι (*Zea mays*), ηλιάνθος (*Helianthus annuus*), βλήτο (*Amaranthus retroflexus*), βρόμος (*Bromus spp.*), ήρα (*Lolium multiflorum*) και άγριο σινάπι (*Sinapis arvensis*). Οι συγκεντρώσεις χαλκού που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 0, 5, 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200  $\text{mgCu kg}^{-1}$  ξηρού εδάφους.

#### 4.2.2.α. Προετοιμασία εδάφους

Το χώμα που χρησιμοποιήθηκε συλλέχθηκε από δύο περιοχές με διαφορετικό pH. Οι περιοχές αυτές ήταν, το Αγρόκτημα του Πανεπιστήμιου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο και η περιοχή Αγία Παρασκευή στο νομό Καρδίτσας. Τα χαρακτηριστικά των εδαφών αυτών φαίνονται στον πίνακα 7.

**Πίν. 7 Μερικά χαρακτηριστικά των εδαφών που χρησιμοποιήθηκαν**

	<i>Βελεστίνο</i>	<i>Καρδίτσα</i>
<i>pH</i>	8,3	4,6
<i>Οργανική ουσία</i>	2,20%	1,20%
<i>Αγωγιμότητα</i>	0,105 mS/cm	0,118 mS/cm
<i>Μηχανική σύσταση</i>	Αργιλοπηλώδες	Αμμοαργιλοπηλώδες

#### 4.2.2.β. Ενσωμάτωση του χαλκού στο έδαφος

Η ποσότητα χαλκού προστέθηκε σε μορφή διαλύματος, σε ποσότητα (20 mL) τέτοια ώστε να υπάρξουν οι απαιτούμενες συγκεντρώσεις στο έδαφος οι οποίες ήταν 0, 5, 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους. Πρώτα προστέθηκε η συγκεκριμένη κάθε φορά ποσότητα διαλύματος στο έδαφος (450 g) και στην συνέχεια γίνονταν δυνατή ανακίνηση μέσα στην πλαστική σακούλα για περίπου 5 min ώστε να ενσωματωθεί ο χαλκός ομοιόμορφα και στη συνέχεια το περιεχόμενο κάθε σακούλας (450 g εδάφους + Cu<sup>2+</sup>) τοποθετούνταν σε φυτοδοχείο με κατάλληλο κωδικό για την παρακολούθησή του.

#### 4.2.2.γ. Σπορά, άρδευση – αύξηση φυτού

Σε κάθε φυτοδοχείο σπάρθηκαν έξι (6) σπόροι για τα καλλιεργούμενα είδη και δεκαπέντε (15) για τα ζιζάνια. Όλοι οι σπόροι που χρησιμοποιήθηκαν δεν υπέστησαν καμία επεξεργασία, εκτός από τους σπόρους του άγριου σιναπιού στους οποίους ακολουθήθηκε η παρακάτω επεξεργασία ώστε να σπάσει ο λήθαργός τους.

Οι σπόροι του άγριου σιναπιού τοποθετούνταν σε νερό με θερμοκρασία 50 °C για 30 min. Στην συνέχεια μεταφέρονταν σε τριβλία στα οποία είχαν τοποθετηθεί

10mL KNO<sub>3</sub> όπου και αφήνονταν για 10min. Οι σπόροι μετά το πέρας των 10min, ξεπλένονται καλά και στην συνέχεια σπέρνονται.

Τα φυτοδοχεία τοποθετήθηκαν στο θερμοκήπιο στο οποίο η θερμοκρασία κυμαίνονταν από 25 έως 30 °C.

Η άρδευση των φυτοδοχείων γίνονταν όποτε κρίνονταν αναγκαίο, ώστε το χώμα μέσα σε αυτά, πάντα να έχει την απαραίτητη υγρασία.

#### **4.2.2.δ. Μετρήσεις**

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν 30 ημέρες περίπου μετά την σπορά και αφορούσαν:

**i.** Χλωρό βάρος υπέργειου και υπόγειου τμήματος του φυτού: οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνταν ύστερα από προσεκτική απομάκρυνση του φυτού από το χώμα των φυτοδοχείων, ώστε να μην υπάρχουν απώλειες από το υπόγειο τμήμα του φυτού. Αυτό επιτυγχάνονταν με συνεχή ροή ύδατος στο φυτοδοχείο έως την πλήρη απομάκρυνση του εδάφους μέσα από αυτό, ώστε να παραμείνει μόνο το ριζικό σύστημα

Έπειτα, διαχωρίζονταν το υπέργειο από το υπόγειο τμήμα του φυτού και ζυγίζονταν σε ηλεκτρονικό ζυγό ακριβείας g, το καθένα χωριστά.

**ii.** Ξηρό βάρος υπέργειου και υπόγειου τμήματος του φυτού: μετά την μέτρηση του νωπού βάρους των τμημάτων των φυτών αυτά τοποθετούνταν σε ξηραντήριο για 48 ώρες στους 80 °C ώστε να απομακρυνθεί όλοι η υγρασία των δειγμάτων. Μετά το πέρας των 48 ωρών τα δείγματα ζυγίζονταν σε ηλεκτρονικό ζυγό ακριβείας σε g.

**iii.** Ύψος: το μέτρημα του ύψους των φυτών πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια εκατοστόμετρου. Ως ύψος φυτού θεωρήθηκε η απόσταση από το σημείο εξόδου του φυτού από το έδαφος έως το ακραίο μερίστωμα για πλατύφυλλα, ενώ για τα αγρωστώδη έως την κορυφή του τελευταίου φύλλου.

**iv.** Αριθμός φύλλων: πραγματοποιούνταν με καταμέτρηση των φύλλων.

**v.** Φυλλική επιφάνεια: οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν σε συγκεκριμένο φύλλο σε κάθε είδος φυτού ώστε να υπάρχει σωστό κριτήριο σύγκρισης. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το “Portable Area Meter LI-3000A” της εταιρίας LI-COR.



**vi.** Χλωροφύλλη: οι μετρήσεις που λήφθηκαν (σε μονάδες SPAD) προέρχονταν από το ίδιο φύλλο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της φυλλικής επιφάνειας. Σε κάθε φύλλο λαμβάνονταν πέντε (5) μετρήσεις και υπολογιζόταν ο μέσος όρος. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το “Chlorophyll Meter SPAD-502” της εταιρίας MINOLTA.

**vii.** Συγκέντρωση Cu στο υπέργειο και υπόγειο τμήμα του φυτού : η μέτρηση της ποσότητας του Cu που προσρόφηθηκε από το φυτό στα διάφορα τμήματά του υπολογίστηκε με την ίδια τεχνική. Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε από τον Blaylock (2000) και η οποία τροποποιήθηκε για της ανάγκες του πειράματος και παρουσιάζεται παρακάτω.

Τα δείγματα πρώτα τοποθετήθηκαν για 48 ώρες στους 80°C σε φούρνο για να χάσουν όλη τους την υγρασία, ζυγίζονταν και στην συνέχεια λαμβάνονταν 1g από το κάθε ένα. Κάθε ένα από αυτά τοποθετούνταν σε κεραμική κάψα όπου και προστέθηκαν σε αυτή 1mL πυκνό HNO<sub>3</sub>. Έπειτα, η κάψα τοποθετήθηκε σε ηλεκτρική θερμαινόμενη πλάκα σε χαμηλή θερμοκρασία έως ότου μέσα σε κάθε κάψα να δημιουργηθεί ένα ομοιογενές ίζημα. Στην συνέχεια η κάψα απομακρύνονταν από την πλάκα και προστίθονταν μέσα σε αυτή 3mL πυκνό HCl σε τρεις (3) δόσεις του 1mL. Το διάλυμα που σχηματίζονταν διηθούνταν και τοποθετούνταν σε φιάλη των 50mL η οποία συμπληρώνονταν έως την χαραγή με αποσταγμένο νερό. Η προσθήκη των αντιδραστηρίων προσαρμόζονταν ανάλογα το βάρος του δείγματος. Στην συνέχεια το διάλυμα από κάθε δείγμα τοποθετούνταν στην συσκευή Ατομικής Απορρόφησης, η οποία μετρούσε την ποσότητα του χαλκού σε ppm και τα οποία μεταφράστηκαν σε mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού βάρους..

**viii.** Στατιστική ανάλυση: για την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε στο στατιστικό πρόγραμμα MSTAT-C και για την σημαντικότητα των διαφορών χρησιμοποιήθηκε η Ελάχιστη Σημαντική Διαφορά – LSD για επίπεδο σημαντικότητας 5%.

### **4.3. Πειράματα αγρού**

#### **4.3.1. Γενικά**

Στο χωράφι τα φυτικά είδη που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα του εργαστηρίου. Οι ποσότητες χαλκού που εφαρμόστηκαν ήταν 0, 20, 40, 60 mgCu kg<sup>-1</sup> ξηρού εδάφους.

#### **4.3.2. Πειραματικό σχέδιο**

Το πειραματικό σχέδιο που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα στο χωράφι ήταν οι τυχαιοποιημένες πλήρεις ομάδες (Randomized Complete Blocks – RCB), με τρεις επαναλήψεις για κάθε επέμβαση.

#### **4.3.3. Εγκατάσταση του πειράματος στον αγρό**

Η εγκατάσταση έγινε στις 20 Μαΐου. Κάθε πειραματικό τεμάχιο είχε διαστάσεις 1,1 x 1 m. Υπήρχαν τέσσερις (4) γραμμές σποράς. Σε κάθε γραμμή σποράς υπήρχαν επτά (7) θέσεις σποράς. Οι αποστάσεις των γραμμών μεταξύ τους ήταν 30cm για τα καλλιεργούμενα είδη, ενώ για τα ζιζάνια ήταν 25cm. Οι αποστάσεις των θέσεων σποράς επί της γραμμής ήταν ίδια κοινή (15cm) τόσο για τα καλλιεργούμενα είδη, όσο και για τα ζιζάνια.

#### **4.3.4. Ενσωμάτωση Cu στο έδαφος**

Η ενσωμάτωση του χαλκού πραγματοποιήθηκε μία ημέρα μετά από την χάραξη του αγρού. Ο χαλκός που ενσωματώθηκε στο έδαφος ήταν υπό την μορφή του ένυδρου θεικού χαλκού (CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O). Η απαιτούμενη ποσότητα χαλκού για κάθε πειραματικό τεμάχιο διαλύονταν σε 500 mL περίπου νερό και με το διάλυμα που προέκυπτε διαβρέχονταν η επιφάνεια του πειραματικού τεμαχίου. Αφού ολοκληρώθηκε η διαβροχή όλων των πειραματικών τεμαχίων στην συνέχεια με φρέζα γίνονταν η ενσωμάτωση και η ομοιόμορφη κατανομή του χαλκού στο έδαφος σε βάθος 10 cm περίπου.

#### **4.3.5. Σπορά, άρδευση – αύξηση φυτών**

Οι θέσεις σποράς οριοθετήθηκαν με την χρήση μικρών ξύλινων ράβδων ώστε να είναι ακριβείς οι θέσεις σποράς και να γίνεται πιο εύκολα η παρατήρηση των φυτών. Σε κάθε θέση σποράς τοποθετούνταν τρεις (3) σπόροι για τα καλλιεργούμενα είδη, ενώ για τα ζιζάνια τοποθετούνταν έξι (6). Οι σπόροι που σπάρθηκαν ήταν ίδιοι με αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν στα φυτοδοχεία και ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία για το σπάσιμο του λήθαργου των σπόρων του άγριου σιναπιού.

Τα τεμάχια αρδεύονταν ανά δύο μέρες ώστε να έχουν πάντα την απαιτούμενη υγρασία για την σωστή αύξηση των φυτών.

#### **4.3.6. Μετρήσεις**

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν 30 ημέρες περίπου μετά την σπορά

- i.** Νωπό βάρος υπέργειου και υπόγειου τμήματος του φυτού: η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν ίδια με αυτή που ακολουθήθηκε στο πείραμα στο θερμοκήπιο.
- ii.** Ξηρό βάρος υπέργειου και υπόγειου τμήματος του φυτού: η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν ίδια με αυτή που ακολουθήθηκε στο πείραμα στο θερμοκήπιο.
- iii.** Στατιστική ανάλυση: Χρησιμοποιήθηκε το ίδιο στατιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα στο θερμοκήπιο.

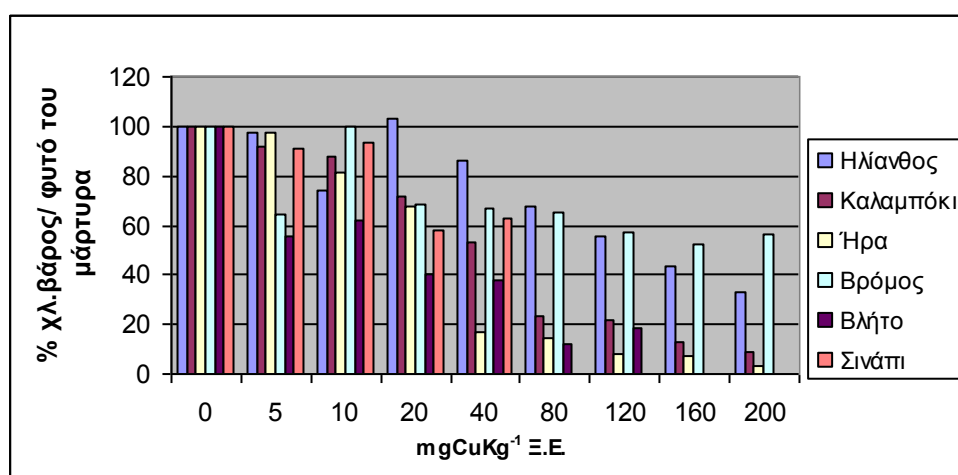
## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1. Πείραμα εργαστηρίου

#### 5.1.α. Χλωρό βάρος υπέργειου τμήματος του φυτού

##### i. Όξινο έδαφος (pH = 4,6)

Στο όξινο έδαφος, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1, παρατηρήθηκε μείωση του χλωρού βάρους του υπέργειου τμήματος των φυτών με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην επίδραση του pH του εδάφους στην διαθεσιμότητα και πρόσληψη του Cu από το φυτό.



**Σχ.1 Χλωρό βάρος υπέργειου τμήματος των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε όξινο έδαφος (pH=4,6)**

Όλα τα άλλα είδη φυτών που χρησιμοποιήθηκαν, εκτός του βλήτου και του σιναπιού, κατάφεραν να αναπτυχθούν έως και την συγκέντρωση των 200 mgCuKg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ. με μεγάλη μείωση του χλωρού βάρους του υπέργειου τμήματος σε σχέση με τον μάρτυρα (0 mgCuKg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.), (Σχ.1). Στην περίπτωση του βλήτου παρατηρήθηκε μεγάλη μείωση του χλωρού βάρους, ενώ στις συγκεντρώσεις 160 και 200 mgCuKg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ. δεν μπόρεσε να αναπτυχθεί. Το σχήμα με τις απόλυτες τιμές του χλωρού βάρους του υπέργειου τμήματος παρατίθεται στο παράρτημα (Σχ.1).

Η μεγαλύτερη μεταβολή στο χλωρό βάρος του υπέργειου τμήματος του φυτού παρατηρήθηκε στο σινάπι, το οποίο στις συγκεντρώσεις 5,10,20 και 40 mgCuKg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ. παρουσίασε μία μεγάλη αύξηση σε σχέση με τον μάρτυρα, ενώ στις συγκεντρώσεις από 80 έως 200 mgCuKg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ. δεν μπόρεσε να αναπτυχθεί. Η αύξηση αυτή αποδίδεται, όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία, στην ικανότητα του

σιναπιού να συσσωρεύει και να αποτοξικοποιεί βαρέα μέταλλα έως κάποιες συγκεντρώσεις.

Από το σχήμα 1 φαίνεται ότι η μικρότερη μεταβολή στο χλωρό βάρος του υπέργειου τμήματος του φυτού παρατηρήθηκε στον βρόμο ενώ η μεγαλύτερη στο σινάπι. Έτσι, κρίνοντας από το σχήμα 1 και από την μεγαλύτερη προς την μικρότερη μεταβολή του χλωρού βάρους τα είδη ως προς την αντοχή τους στον Cu, παρουσιάζονται ως εξής: σινάπι > βλήτο > ήρα > καλαμπόκι > ηλιάνθος > βρόμος.

Ένας βασικός παράγοντας για την ανεύρεση φυτικών ειδών για την εισαγωγή τους σε ένα πρόγραμμα φυτοαποκατάστασης είναι το ποσοστό μείωσης του βάρους τους ανάλογα με την συγκέντρωση του ρύπου. Στην περίπτωση του χαλκού παρατηρήθηκε μείωση του χλωρού βάρους του υπέργειου τμήματος των φυτών μέχρι 20%, στον ηλιάνθο στις συγκεντρώσεις 5 έως 40 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ., στο καλαμπόκι από 5 έως 10 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ., στην ήρα από 5 έως 10 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ., στον βρόμο σε όλες τις συγκεντρώσεις εκτός από την 10 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ., στο βλήτο παρατηρήθηκε μείωση πάνω από 20% σε όλες τις συγκεντρώσεις χαλκού, ενώ στο σινάπι παρατηρήθηκε αύξηση του βάρους σε σχέση με τον μάρτυρα αλλά η αύξηση του σταμάτησε σε συγκέντρωση χαλκού μεγαλύτερη από 40 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.

**Πίν. 8 Χλωρό βάρος υπέργειου τμήματος και το επί τις % του μάρτυρα σε παρένθεση, καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu σε όξινο έδαφος (pH = 4,6)**

Συγκέντρωση __mgCu kg <sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.__	Καλλιεργούμενα είδη			Ζιζάνια		
	__ηλιάνθος__	__καλαμπόκι__	__ήρα__	__βρόμος__	__βλήτο__	__σινάπι__
	mg					
0	1661 (100)	1636 (100)	84 (100)	171 (100)	103 (100)	99 (100)
5	1616 (97)	1503 (92)	82 (98)	110 (64)	57 (56)	91 (91)
10	1237 (75)	1437 (88)	68 (81)	171 (100)	64 (62)	93 (93)
20	1716 (103)	1179 (72)	57 (68)	117 (68)	41 (40)	58 (58)
40	1437 (87)	870 (53)	14 (17)	114 (67)	39 (38)	63 (63)
80	1119 (67)	382 (23)	12 (14)	112 (65)	12 (12)	0
120	924 (56)	351 (22)	7 (8)	98 (57)	19 (18)	0
160	722 (44)	213 (13)	6 (7)	90 (53)	0	0
200	549 (33)	149 (9)	3 (4)	96 (56)	0	0
F- test	*	***	***	***	***	***
LSD <sub>0,05</sub>	690	187	12	33	18	13
CV%	33	13	19	16	28	17

\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%

Στον πίνακα 8 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι του χλωρού βάρους του υπέργειου τμήματος των φυτών, καθώς και η σημαντικότητα των διαφορών των

μέσων όρων σε κάθε συγκέντρωση χαλκού με το κριτήριο της Ελάχιστης Σημαντικής Διαφοράς (LSD).

Στον ηλιάνθο δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και των επεμβάσεων έως και την συγκέντρωση των  $40 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$ , ενώ στατιστικώς σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε στις επεμβάσεις 80 έως  $200 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$

Στο καλαμπόκι, δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και της επέμβασης  $5 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$  ενώ παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά στις επεμβάσεις 0, 10, 20, 40 και  $80 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$  Μεταξύ των επεμβάσεων 80 έως  $160 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$  δεν παρατηρήθηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές ενώ μεταξύ των επεμβάσεων 120 και  $200 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$  υπήρχε.

Στην ήρα, δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και της επέμβασης  $5 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$  Στατιστικώς σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε στις επεμβάσεις 5 με 10 -  $20 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$  καθώς και 40 έως  $200 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$  Μεταξύ των επεμβάσεων 40 -  $200 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$  η επίδραση του χαλκού δεν φαίνεται να δημιουργεί στατιστικώς σημαντικές διαφορές.

Στον βρόμο, υπήρχε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και των υπολοίπων επεμβάσεων. Η αύξηση όμως της συγκέντρωσης του χαλκού δεν φάνηκε να δημιουργεί στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων 20 έως  $200 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$

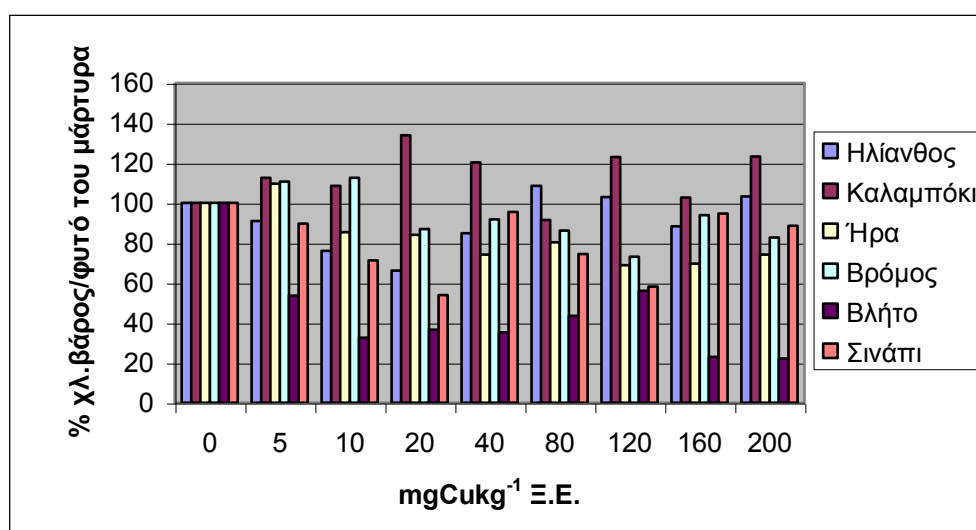
Στο βλήτο, υπήρχε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και των υπολοίπων επεμβάσεων. Δεν υπάρχουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων 5 έως  $40 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$  και 80 έως  $120 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$

Στο σινάπι, δεν υπήρχαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ του μάρτυρα και των επεμβάσεων  $5 - 10 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$  αλλά έχει στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων 20 -  $40 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$

## **ii. Αλκαλικό έδαφος (pH = 8,3)**

Στο αλκαλικό έδαφος, όπως φαίνεται στο σχήμα 2 παρατηρήθηκε μία αυξομείωση του χλωρού βάρους του υπέργειου τμήματος των φυτών με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος ανάλογα με το είδος του φυτού. Το γεγονός αυτό σχετίζεται άμεσα με την τιμή του pH (ο χαλκός είναι διαθέσιμος στο

φυτό όταν το έδαφος έχει  $4 < \text{pH} < 7$ ) και από την μηχανική σύσταση. Το σχήμα με τις απόλυτες τιμές του χλωρού βάρους του υπέργειου τμήματος παρατίθεται στο παράρτημα (Σχ.2).



**Σχ. 2 Χλωρό βάρος υπέργειου τμήματος των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε αλκαλικό έδαφος ( $\text{pH}=8,3$ )**

Μείωση μεγαλύτερη από 20% στο χλωρό βάρος του υπέργειου τμήματος του φυτού σε σχέση με τον μάρτυρα δεν παρατηρήθηκε σε όλα τα είδη και αυτή η μείωση δεν ήταν αναλογική με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος. Έτσι μείωση του χλωρού βάρους του υπέργειου τμήματος μεγαλύτερη από 20% παρατηρήθηκε στον ηλιάνθο στις επεμβάσεις 10 και 20  $\text{mgCu kg}^{-1} \Xi.Ε.Δ.$  στο καλαμπόκι δεν παρατηρήθηκε μείωση σε σχέση με τον μάρτυρα, αντίθετα αύξηση, στην ήρα στις επεμβάσεις από 40 έως 200  $\text{mgCu kg}^{-1} \Xi.Ε.Δ.$ , στον βρόμο μόνο στην επέμβαση 120  $\text{mgCu kg}^{-1} \Xi.Ε.Δ.$ , στο βλήτο παρατηρήθηκε μείωση μεγαλύτερη από 20% σε όλες τις επεμβάσεις και τέλος στο σινάπι στις επεμβάσεις 10, 20, 80 και 120  $\text{mgCu kg}^{-1} \Xi.Ε.Δ.$

Την μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή στο χλωρό βάρος του υπέργειου τμήματος του φυτού την είχε το βλήτο, ενώ το καλαμπόκι επηρεάστηκε με αύξηση σε σχέση με τον μάρτυρα όταν αυξάνονταν η συγκέντρωση του χαλκού στο έδαφος. Όλα τα είδη των φυτών κατάφεραν να αναπτυχθούν ικανοποιητικά σε όλες τις συγκεντρώσεις του χαλκού και αυτό εξηγείται από το γεγονός της μη διαθεσιμότητας του Cu λόγω του υψηλού pH (8,3).. Κρίνοντας από το σχήμα 2 και από την μεγαλύτερη προς την μικρότερη μεταβολή τα είδη κατατάσσονται ως εξής: βλήτο > ήρα > βρόμος > σινάπι > ηλιάνθος > καλαμπόκι (θετική μεταβολή).

Όπως φαίνεται στον πίνακα 9, οι μέσοι όροι του χλωρού βάρους του υπέργειου τμήματος των φυτών, στον ηλίανθο και στον βρόμο δεν διέφεραν στατιστικώς σημαντικά στις διάφορες συγκεντρώσεις Cu..

**Πίν. 9 Χλωρό βάρος υπέργειου τμήματος και το επί τις % του μάρτυρα σε παρένθεση, καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu σε αλκαλικό έδαφος (pH = 8,3)**

Συγκέντρωση __mgCu <sub>kg</sub> <sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ.__	Καλλιεργούμενα είδη			Ζιζάνια		
	__ηλίανθος__	__καλαμπόκι__	__ήρα__	__βρόμος__	__βλήτο__	__σινάπι__
	mg					
0	1822 (100)	1323 (100)	121 (100)	212 (100)	618 (100)	135 (100)
5	1657 (91)	1490 (113)	133 (110)	235 (112)	332 (54)	121 (90)
10	1387 (76)	1437 (109)	104 (86)	239 (114)	202 (33)	96 (71)
20	1205 (66)	1770 (134)	102 (84)	184 (88)	225 (36)	73 (54)
40	1546 (85)	1590 (120)	90 (74)	195 (93)	218 (35)	129 (95)
80	1979 (109)	1210 (91)	97 (80)	183 (87)	269 (44)	101 (74)
120	1876 (103)	1627 (123)	83 (69)	155 (74)	346 (56)	79 (58)
160	1606 (88)	1360 (103)	84 (70)	199 (95)	142 (23)	128 (95)
200	1879 (103)	1630 (123)	90 (74)	176 (84)	137 (22)	120 (88)
F- test	ns	*	**	ns	**	**
LSD <sub>0,05</sub>	-	284	22	-	199	32
CV%	24	11	12	30	42	17

\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%

Στο καλαμπόκι φαίνεται ότι ο χαλκός επηρέασε σημαντικά το χλωρό βάρος του υπέργειου τμήματος των φυτών αλλά οι διαφορές αυτές δεν ήταν σε αναλογία με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος.

Στην ήρα, δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και της επέμβασης 5 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ. ενώ στις επεμβάσεις από 10 έως 200 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ. η αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού δεν φάνηκε να δημιουργεί στατιστικώς σημαντικές διαφορές.

Στο βλήτο, ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις υπόλοιπες επεμβάσεις, οι οποίες όμως δεν διέφεραν μεταξύ τους.

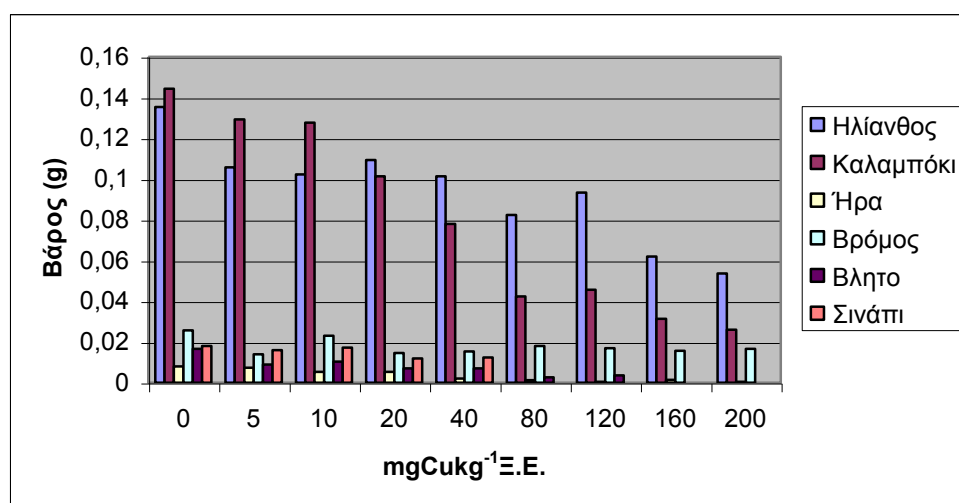
Στο σινάπι φαίνεται ότι ο χαλκός επηρέασε σημαντικά το χλωρό βάρος του υπέργειου τμήματος των φυτών με στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων αλλά όπως και στο καλαμπόκι δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά σε αναλογία με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος.



## 5.1.β. Ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος του φυτού

### ι. Όξινο έδαφος (pH = 4,6)

Στο όξινο έδαφος, όπως φαίνεται στο σχήμα 3, σε όλα τα είδη φυτών το ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος του φυτού μειώθηκε όσο αυξάνονταν η συγκέντρωση του χαλκού στο έδαφος. Από τα 6 είδη, το βλήτο και το σινάπι δεν μπόρεσαν να αναπτυχθούν σε συγκέντρωση χαλκού στο έδαφος 160 – 200 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ. και 80 – 200 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ., αντίστοιχα.



**Σχ. 3 Ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε όξινο έδαφος (pH=4,6)**

Στον πίνακα 10 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι του ξηρού βάρους του υπέργειου τμήματος του φυτού σε σχέση με την συγκέντρωση του χαλκού στο έδαφος. Στον ηλιάνθο ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις υπόλοιπες επεμβάσεις. Μεταξύ των επεμβάσεων 5 – 120 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ. δεν παρατηρήθηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές καθώς επίσης και μεταξύ των επεμβάσεων 160 – 200 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.

Στο καλαμπόκι, δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και των επεμβάσεων 5 και 10 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ. ενώ διέφερε με όλες τις άλλες επεμβάσεις, όπως επίσης και οι επεμβάσεις 80 – 200 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.

Στην ήρα, ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά με όλες τις επεμβάσεις εκτός της επέμβασης 5 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ. Η αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού δεν επηρέασε στατιστικώς σημαντικά τις διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων 40 έως 200 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.

**Πίν. 10 Ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu σε όξινο έδαφος (pH = 4,6)**

Συγκέντρωση mgCu/kg-1 Ξ.ΕΔ.	Καλλιεργούμενα είδη			Ζιζάνια		
	ηλίανθος	καλαμπόκι	ήρα	βρόμος	βλήτο	σινάπι
	mg					
0	135	144	8	26	17	18
5	106	129	7	14	9	16
10	102	128	5	23	10	17
20	109	101	5	15	7	12
40	101	78	2	15	7	12
80	82	42	1	18	3	0
120	93	46	0,5	17	4	0
160	62	31	1,4	16	0	0
200	547	26	0,5	17	0	0
F- test	***	***	***	**	***	***
LSD <sub>0,05</sub>	26	20	1	6	4	3
CV%	16	14	23	18	34	19

\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%

Στον βρόμο, ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις υπόλοιπες επεμβάσεις, οι οποίες δεν επηρεάστηκαν σε τέτοιο βαθμό από την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού ώστε να διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους.

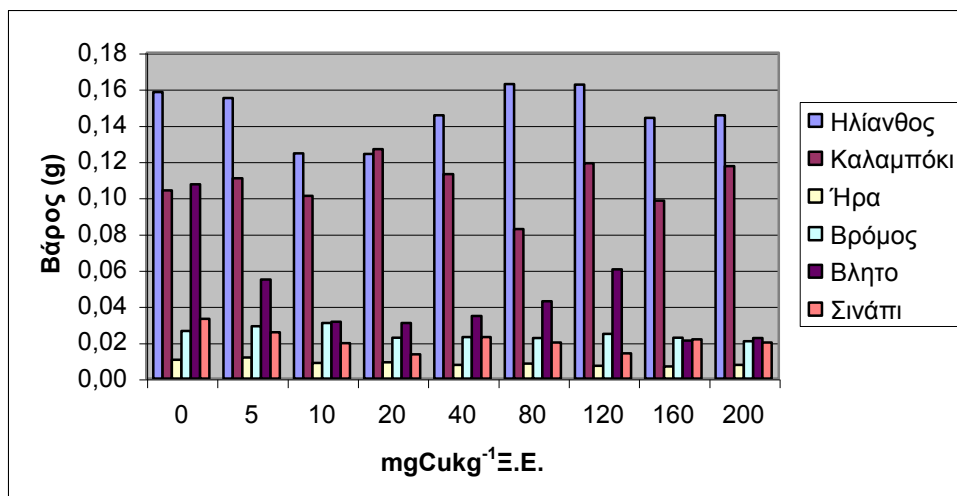
Στο βλήτο, ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις υπόλοιπες επεμβάσεις, ενώ δεν διέφεραν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους οι επεμβάσεις 5 – 40 mgCu/kg<sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ. και 80 – 120 mgCu/kg<sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ.

Στο σινάπι, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις επεμβάσεις 5 και 10 mgCu/kg<sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ. αλλά διέφερε από όλες τις υπόλοιπες. Επίσης δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους οι επεμβάσεις 20–40 mgCu/kg<sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ.

## ii. Αλκαλικό έδαφος (pH = 8,3)

Στο αλκαλικό έδαφος, σε αντίθεση με το όξινα, δεν υπάρχει σταθερή επίδραση από την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος όπως φαίνεται και από το σχήμα 4. Έτσι, υπάρχουν επεμβάσεις όπου οι μέσοι όροι τους είναι μεγαλύτεροι από τον μέσο όρο του μάρτυρα και άλλοι μικρότεροι, χωρίς να επηρεάζονται από την συγκέντρωση του χαλκού. Αυτό δείχνει ότι η πρόσληψη του

χαλκού από το φυτό επηρεάστηκε σε μεγάλο βαθμό από την τιμή του pH το οποίο μείωσε την διαθεσιμότητα του Cu και στις υψηλές συγκεντρώσεις.



**Σχ. 4 Ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε αλκαλικό έδαφος (pH=8,3)**

Τα μόνα είδη που έδειξαν μία ελαφρά μείωση του ξηρού βάρους του υπέργειου τμήματός τους με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού ήταν η ήρα και ο βρόμος στις υψηλές συγκεντρώσεις Cu.

Στα είδη καλαμπόκι, ήρα, βρόμος, όχι όμως ηλιάνθο, βλήτο και σινάπι, οι μέσοι όροι των επεμβάσεων ήταν μεγαλύτεροι του μέσου όρου του μάρτυρα στις μικρές συγκεντρώσεις χαλκού ως αποτέλεσμα της κάλυψης των αναγκών των φυτών από χαλκό, ενώ στις μεγάλες συγκεντρώσεις άρχισαν να εμφανίζονται οι συνέπειες της τοξικής δράσης του χαλκού. Στον ηλιάνθο το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε στις συγκεντρώσεις 80 και 120 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ., ενώ στο βλήτο και το σινάπι το ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος του φυτού μειώθηκε με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού.

Όπως φαίνεται στον πίνακα 11, στον ηλιάνθο και στον βρόμο δεν βρέθηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές.

Στο καλαμπόκι, το ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος του μάρτυρα δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά με το μεγαλύτερο μέρος των επεμβάσεων.

Στην ήρα, δεν παρατηρήθηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ του μάρτυρα και των επεμβάσεων έως τα 20 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ. όπως επίσης και μεταξύ των επεμβάσεων 10 έως 200 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.

Στο βλήτο, ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις υπόλοιπες επεμβάσεις, ενώ οι τελευταίες δεν διέφεραν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους.

**Πίν. 11 Ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu σε αλκαλικό έδαφος (pH = 8,3)**

Συγκέντρωση mgCu/kg-1 Ξ.Ε.Δ.	Καλλιεργούμενα είδη			Ζιζάνια		
	ηλίανθος	καλαμπόκι	ήρα	βρόμος	βλήτο	σινάπι
	mg					
0	158	104	10	26	107	33
5	155	110,67	11,7	29	55	26
10	124	101	8,7	31	31,3	20
20	124	126	9	23	31	13
40	145	113	7,7	23	35	23
80	163	82,67	8,	22	43	20
120	162	119	7	25	60	14
160	144	98	6,7	23	21	22
200	145	117	7,7	21	22	20
F- test	ns	*	**	ns	*	***
LSD <sub>0,05</sub>	-	24	2	-	49	7
CV%	12	13	16	21	63	19

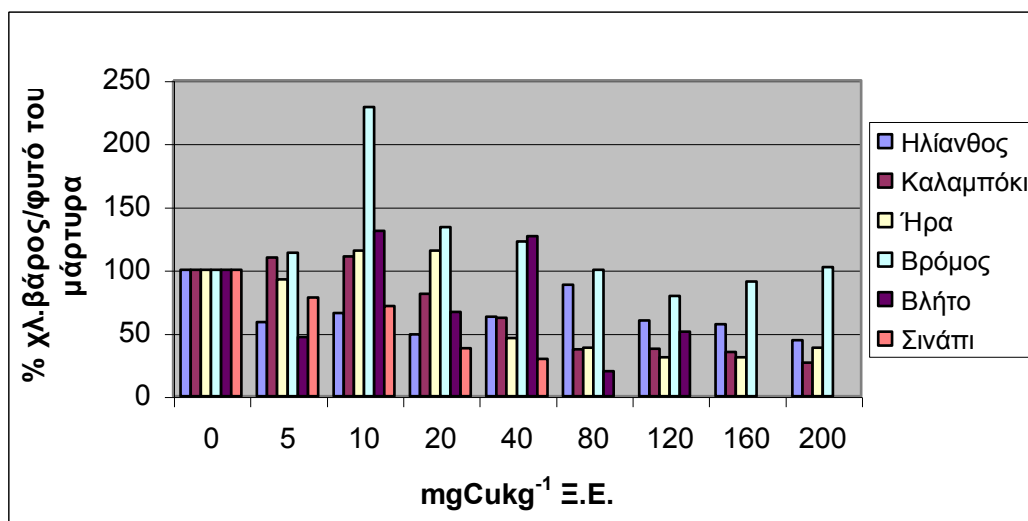
\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%

Στο σινάπι, ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις υπόλοιπες επεμβάσεις, ενώ οι τελευταίες δεν διέφεραν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους.

### 5.1.γ. Χλωρό βάρος ρίζας

#### ι. Όξινο έδαφος (pH = 4,6)

Στο όξινο έδαφος, όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 5 παρατηρήθηκε μείωση του χλωρού βάρους της ρίζας των φυτών με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος. Το γεγονός αυτό εξηγείται από την επίδραση του pH του εδάφους στην πρόσληψη του Cu από το φυτό.



**Σχ. 5 Χλωρό βάρος ριζικού συστήματος των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε όξινο έδαφος (pH=4,6)**

Όσο αναφορά την μείωση του χλωρού βάρους του ριζικού συστήματος μέχρι 20% στην περίπτωση του χαλκού παρατηρήθηκε, στον ηλίανθο σε όλες τις επεμβάσεις, στο καλαμπόκι από 40 έως 200 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ., στην ήρα από 40 έως 200 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ. , στο βλήτο παρατηρήθηκε μείωση πάνω από 20% σε όλες τις επεμβάσεις χαλκού, στον βρόμο μόνο στην επέμβαση 120 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ. και τέλος στο σινάπι παρατηρήθηκε μείωση του χλωρού βάρους σε όλες τις επεμβάσεις.

Η μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή στο χλωρό βάρος της ρίζας του φυτού παρατηρήθηκε στο σινάπι, το οποίο στις συγκεντρώσεις 80, 120, 160 και 200 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ. δεν μπόρεσε να αναπτυχθεί και κατά συνέπεια να αναπτύξει ριζικό σύστημα. Επιπλέον, το άλλο είδος που δεν μπόρεσε να αναπτυχθεί σε όλες τις συγκεντρώσεις χαλκού είναι το βλήτο το οποίο και αναπτύχθηκε μέχρι την επέμβαση 120 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ. Το σχήμα με τις απόλυτες τιμές του χλωρού βάρους της ρίζας των φυτών παρατίθεται στο παράρτημα (Σχ.3).

Από το σχήμα 5 φαίνεται ότι την μικρότερη αρνητική μεταβολή στο χλωρό βάρος της ρίζας του φυτού παρατηρήθηκε στον βρόμο ενώ η μεγαλύτερη αρνητική στο σινάπι. Έτσι, από το σχήμα 5 και από την μεγαλύτερη προς την μικρότερη μεταβολή του χλωρού βάρους τα είδη παρουσιάζονται ως εξής: σινάπι > καλαμπόκι > ηλίανθος > ήρα > βλήτο > βρόμος.

Στον πίνακα 12 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι του χλωρού βάρους του ριζικού συστήματος των φυτών.

**Πίν. 12 Χλωρό βάρος ριζικού συστήματος και το επί τις % του μάρτυρα σε παρένθεση, καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu σε όξινο έδαφος (pH = 4,6)**

Συγκέντρωση mgCu kg <sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.	Καλλιεργούμενα είδη			Ζιζάνια		
	ηλίανθος	καλαμπόκι	ήρα	βρόμος	βλήτο	σινάπι
	mg					
0	455 (100)	1322 (100)	12,7 (100)	58,3 (100)	15,0 (100)	43,3 (100)
5	267 (59)	1450 (110)	12,0 (92)	66,0 (114)	7,00 (47)	33,7 (78)
10	300 (66)	1459 (111)	15,0 (115)	133 (229)	19,7 (131)	30,7 (71)
20	222 (49)	1068 (81)	15,3 (115)	77,7 (134)	10,0 (67)	16,3 (38)
40	286 (63)	817,0 (62)	5,70 (46)	71,0 (122)	19,0 (127)	12,7 (29)
80	402 (88)	489,0 (37)	5,00 (39)	58,0 (100)	3,00 (20)	0
120	272 (60)	497,0 (38)	4,30 (31)	46,0 (79)	7,70 (51)	0
160	259 (57)	463,0 (35)	4,00 (31)	52,7 (91)	0	0
200	202 (44)	349,0 (26)	5,00 (39)	59,3 (102)	0	0
F- test	*	***	*	**	***	***
LSD <sub>0,05</sub>	95	308	7	33	7	8
CV%	20	20	49	28	42	32

\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%

Στον ηλίανθο δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και της επεμβάσης  $80 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$ , ενώ στατιστικώς σημαντική διαφορά δεν παρατηρήθηκε και στις επεμβάσεις 5, 10, 20, 40, 120, και  $160 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$

Στο καλαμπόκι δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και των επεμβάσεων  $5 - 20 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$ , ενώ στατιστικώς σημαντικά διέφερε με όλους τις υπόλοιπες. Επίσης στις επεμβάσεις 80 έως  $200 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$  δεν υπήρχαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές.

Στην ήρα, δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και των επεμβάσεων  $5 - 20 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$ , ενώ στατιστικώς σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε στις επεμβάσεις 40 έως  $200 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$  όπου στις τελευταίες δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ τους.

Στον βρόμο δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και των υπολοίπων επεμβάσεων εκτός από αυτή των  $10 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$

Στο βλήτο, δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και των επεμβάσεων  $10 - 40 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$ , ενώ στατιστικώς σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε με όλες τις υπόλοιπες.

Στο σινάπι, ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά από όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις. Σημαντικώς στατιστικά δεν διέφεραν οι επεμβάσεις  $5 - 10 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$  και  $20 - 40 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.Ε.Δ.}$

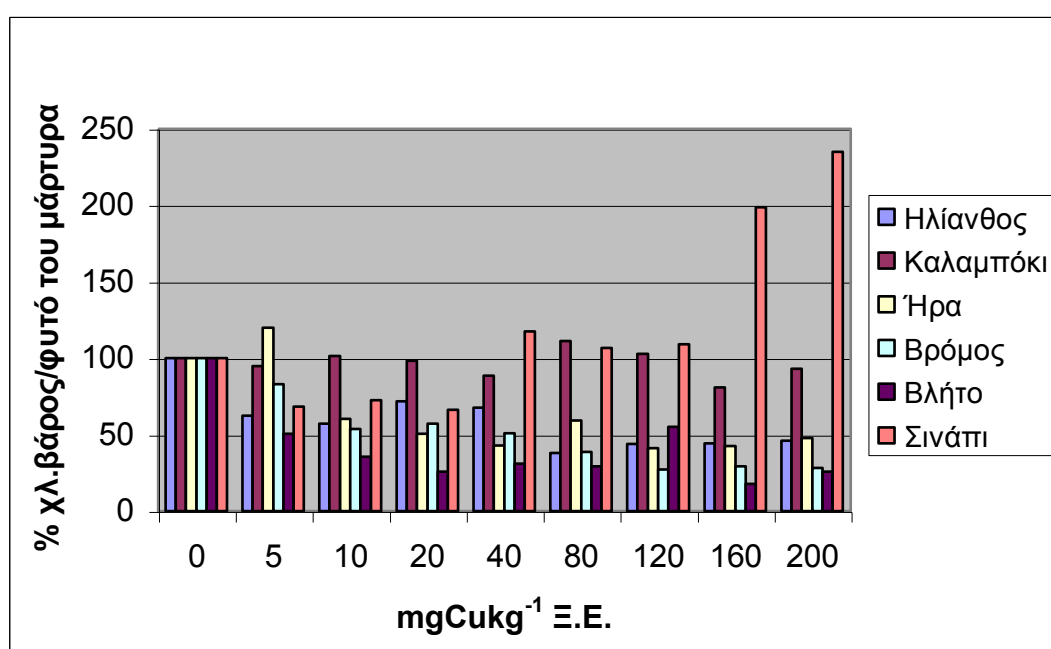
## **ii. Αλκαλικό έδαφος (pH = 8,3)**

Στο αλκαλικό έδαφος, όπως φαίνεται στο σχήμα 6 παρατηρήθηκε μία αυξομείωση του χλωρού βάρους του ριζικού συστήματος των φυτών με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος. Το γεγονός αυτό, όπως και με το χλωρό βάρος του υπέργειου τμήματος του φυτού, αποδίδεται άμεσα από την τιμή του pH (ο χαλκός είναι διαθέσιμος στο φυτό όταν το έδαφος έχει  $4 < \text{pH} < 7$ ) και από την μηχανική σύσταση. Το σχήμα με τις απόλυτες τιμές του χλωρού βάρους της ρίζας των φυτών παρατίθεται στο παράρτημα (Σχ.4).

Μείωση μεγαλύτερη από 20% στο χλωρό βάρος της ρίζας των φυτών σε σχέση με τον μάρτυρα, δεν παρουσιάστηκε σε όλα τα είδη. Έτσι μείωση του χλωρού βάρους της ρίζας μεγαλύτερη από 20% παρατηρήθηκε στον ηλίανθο σε όλες της

επεμβάσεις χαλκού, στο καλαμπόκι παρατηρήθηκε μόνο στην επέμβαση 160 mgCu $kg^{-1}$ Ξ.ΕΔ., στην ήρα στις επεμβάσεις από 10 έως 200 mgCu $kg^{-1}$ Ξ.ΕΔ., στον βρόμο σε όλες τις επεμβάσεις, στο βλήτο επίσης σε όλες τις επεμβάσεις και τέλος στο σινάπι στις επεμβάσεις 5, 10, 20 mgCu $kg^{-1}$ Ξ.ΕΔ.

Η μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή, σε σχέση με τον μάρτυρα, στο χλωρό βάρος της ρίζας παρατηρήθηκε στο βλήτο, ενώ το σινάπι αντέδρασε με αύξηση σε σχέση με τον μάρτυρα όσο αυξάνονταν η συγκέντρωση του χαλκού στο έδαφος. Όλα τα είδη κατάφεραν να αναπτυχθούν σε όλες τις επεμβάσεις χαλκού και κρίνοντας από το σχήμα 6 και από την μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή τα είδη κατατάσσονται ως εξής: βλήτο > ηλίανθος > βρόμος > ήρα > καλαμπόκι > σινάπι.



**Σχ. 6 Χλωρό βάρος ριζικού συστήματος των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε αλκαλικό έδαφος (pH=8,3)**

Όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 13, οι μέσοι όροι του χλωρού βάρους του ριζικού συστήματος των φυτών, για τον ηλίανθο και το καλαμπόκι δεν έδωσαν στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα.

Στην ήρα, δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και της επέμβασης 5 mgCu $kg^{-1}$ Ξ.ΕΔ., αντίθετα ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις επεμβάσεις 10 – 200 mgCu $kg^{-1}$ Ξ.ΕΔ. Οι επεμβάσεις 10 – 200 mgCu $kg^{-1}$ Ξ.ΕΔ. δεν διέφεραν στατιστικώς σημαντικά.

Στον βρόμο δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και της επέμβασης 5 mgCu $kg^{-1}$ Ξ.ΕΔ., ενώ στατιστικώς σημαντική διαφορά

παρατηρήθηκε μεταξύ του μάρτυρα και των υπολοίπων επεμβάσεων. Στατιστικώς μη σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε στις επεμβάσεις 10–40 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ. αλλά και 80–200 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ.

**Πίν. 13 Χλωρό βάρος ριζικού συστήματος και το επί τις % του μάρτυρα σε παρένθεση, καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu σε αλκαλικό έδαφος (pH = 8,3)**

Συγκέντρωση mgCu <sub>kg</sub> <sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.	Καλλιεργούμενα είδη			Ζιζάνια		
	ηλίανθος	καλαμπόκι	ήρα	βρόμος	βλήτο	σινάπι
	mg					
0	477 (100)	1463 (100)	70,7 (100)	174 (100)	37,7 (100)	15,7 (100)
5	299 (62)	1390 (95)	84,7 (119)	145 (85)	19,0 (50)	10,7 (68)
10	273 (57)	1487 (102)	42,7 (60)	93,7 (55)	13,3 (35)	11,3 (72)
20	343 (71)	1437 (98)	35,7 (50)	99,3 (58)	9,70 (26)	10,3 (66)
40	323 (67)	1297 (89)	30,3 (43)	88,7 (52)	11,7 (31)	18,3 (117)
80	181 (38)	1627 (111)	42,0 (59)	67,3 (40)	11,0 (29)	16,7 (106)
120	210 (44)	1507 (103)	29,0 (41)	47,3 (28)	20,7 (55)	17,0 (108)
160	211 (44)	1183 (81)	30,0 (42)	51,0 (30)	6,70 (18)	31,0 (198)
200	220 (46)	1363 (93)	33,7 (47)	49,0 (29)	9,70 (26)	36,7 (234)
F- test	ns	ns	**	***	**	**
LSD <sub>0,05</sub>	-	-	27	29	14	11
CV%	36	18	35	19	53	35

\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%

Στο βλήτο, ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά από όλους τις επεμβάσεις, ενώ οι τελευταίες δεν διέφεραν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους.

Στο σινάπι, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά με τις επεμβάσεις 5 – 120 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ., ενώ διέφερε με τις επεμβάσεις 160 – 200 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ.. Οι επεμβάσεις 5 – 120 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ. αλλά και 160 – 200 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ. δεν διέφεραν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους.

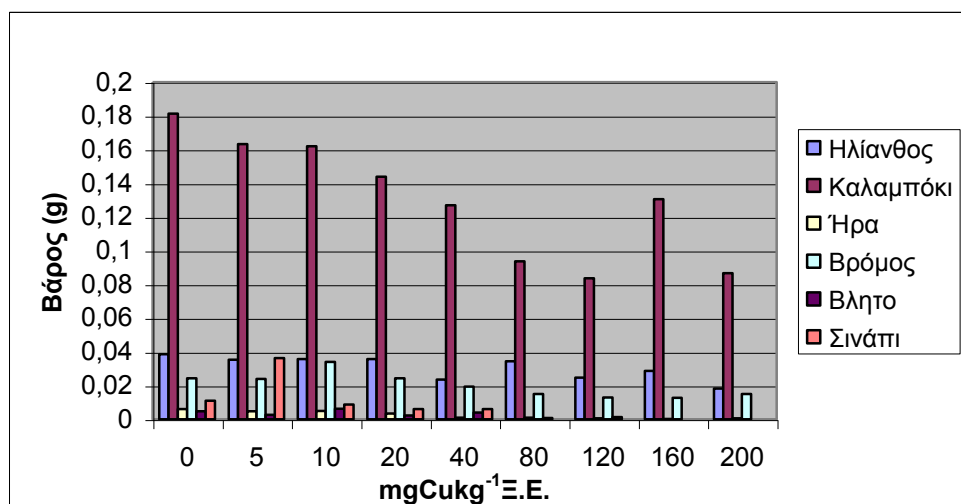
### 5.1.δ. Ξηρό βάρος ρίζας

#### ι. Όξινο έδαφος (pH = 4,6)

Στο όξινο έδαφος, όπως φαίνεται και από το σχήμα 7, σε όλα τα είδη φυτών το ξηρό βάρος της ρίζας των φυτών μειώνεται όσο αυξάνεται η συγκέντρωση του χαλκού στο έδαφος. Επίσης στο σχήμα 7 φαίνεται ότι το βλήτο και το σινάπι δεν μπόρεσαν να αναπτυχθούν σε συγκέντρωση χαλκού στο έδαφος 160 – 200 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ. και 80 – 200 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ. αντίστοιχα.

Όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 14, οι μέσοι όροι του ξηρού βάρους του ριζικού συστήματος των φυτών, για τον ηλίανθο, το καλαμπόκι και το σινάπι δεν έδωσαν στατιστικώς σημαντικά αποτελέσματα.





Σχ. 7 Ξηρό βάρος ριζικού συστήματος των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε όξινο έδαφος (pH=4,6)

Στην ήρα, δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και των επεμβάσεων 5 – 10 mgCu/kg<sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ., ενώ ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά με τις επεμβάσεις 20 – 200 mgCu/kg<sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ. Επίσης στατιστικώς σημαντικά διέφεραν και οι επεμβάσεις 5 – 20 mgCu/kg<sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ. αλλά και 40 - 200 mgCu/kg<sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ.

Στον βρόμο, δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και των επεμβάσεων 5, 20 και 40 mgCu/kg<sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ. Μη στατιστικώς σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε στις επεμβάσεις 80 - 200 mgCu/kg<sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ.

Πίν.14 Ξηρό βάρος ριζικού συστήματος καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu σε όξινο έδαφος (pH = 4,6)

Συγκέντρωση mgCu/kg <sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.	Καλλιεργούμενα είδη						Ζιζάνια
	ήλιανθος	καλαμπόκι	ήρα	βρόμος	βλητό	σινάπι	
	mg						
0	38,67	181,3	6,0	24,3	4,7	11	
5	35,33	163,3	4,7	24,0	2,7	36	
10	35,67	162,0	5,0	34,0	6,3	9	
20	35,67	144,0	3,3	24,3	2,3	6	
40	23,67	127,0	1,0	19,3	4,0	6	
80	34,33	93,67	1,0	15,0	0,7	0	
120	24,67	83,67	0,5	13,0	1,3	0	
160	28,67	130,6	0,2	12,7	0	0	
200	18,33	86,67	0,5	15,0	0	0	
F- test	ns	ns	***	***	***	ns	
LSD <sub>0,05</sub>	-	-	2	6	2	-	
CV%	25	31	40	16	42	221	

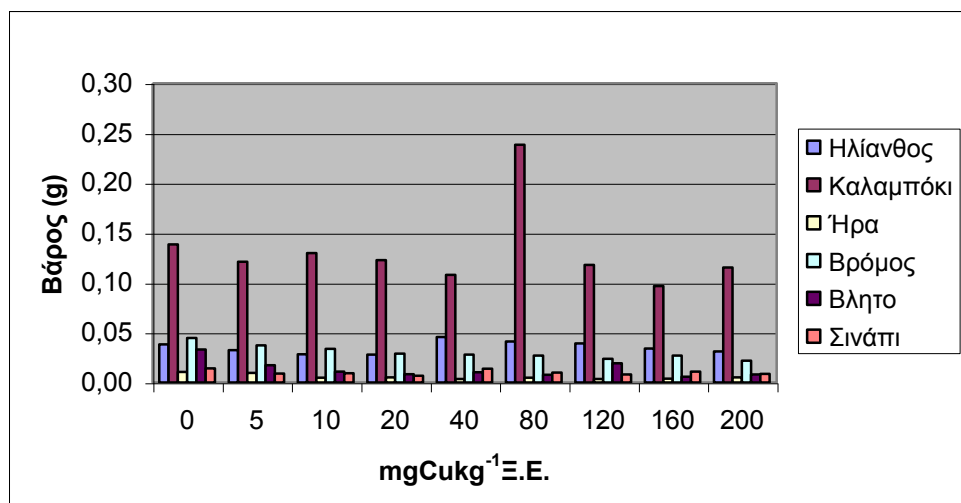
\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%

Στο βλήτο δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και των επεμβάσεων 10 και 40 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ. Επίσης, μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές παρατηρήθηκαν και στις επεμβάσεις 80 έως 120 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ.

## ii. Αλκαλικό έδαφος (pH = 8,3)

Στο αλκαλικό έδαφος όπως φαίνεται και από το σχήμα 8, υπάρχει σταθερή επίδραση από την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος. Έτσι, σε όλες τις επεμβάσεις το ξηρό βάρος του ριζικού συστήματος μειώνεται όσο αυξάνεται η συγκέντρωση του χαλκού στο έδαφος. Στο καλαμπόκι, η τιμή του ξηρού βάρους του ριζικού συστήματος στην επέμβαση 80 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ. οφείλεται με πολύ μεγάλη πιθανότητα σε πειραματικό σφάλμα γιατί δεν ακολουθεί την προβλεπόμενη πορεία της μείωσης του ξηρού βάρους.

Όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 15, οι μέσοι όροι του ξηρού βάρους του ριζικού συστήματος των φυτών, για τον ηλιάνθο, το καλαμπόκι και το σινάπι δεν έδωσαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές.



**Σχ. 8 Ξηρό βάρος ριζικού συστήματος των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε αλκαλικό έδαφος (pH=8.3)**

Στην ήρα, δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και της επέμβασης 5 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ., ενώ ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά με τις επεμβάσεις 10 – 200 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ. Οι τελευταίες δεν διέφεραν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους.

Στον βρόμο, δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και της επέμβασης 5 mgCu/kg<sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ. ενώ ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις επεμβάσεις 20 - 200 mgCu/kg<sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ. Οι επεμβάσεις 20 - 200 mgCu/kg<sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ. δεν διέφεραν στατιστικώς σημαντικά.

**Πίν.15 Ξηρό βάρος ριζικού συστήματος καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu σε αλκαλικό έδαφος (pH = 8,3)**

Συγκέντρωση mgCu/kg <sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ.	Καλλιεργούμενα είδη			Ζιζάνια		
	ηλίανθος	καλαμπόκι	ήρα	βρόμος	βλήτο	σινάπι
	mg					
0	38,3	138	10,7	44,7	33,0	14
5	32,7	121	9,7	37,3	17,3	9,0
10	28,3	130	4,7	33,7	11,0	9,3
20	28,0	123	5,0	29,0	8,3	6,7
40	45,7	108	3,7	28,0	10,3	13,7
80	41,0	238	4,7	27,0	7,8	10,0
120	39,3	118	3,7	23,7	19,3	8,0
160	34,0	97,0	4,0	27,0	5,7	11,0
200	31,0	115	5,0	22,0	8,0	8,7
F- test	ns	ns	*	***	*	ns
LSD <sub>0,05</sub>	-	-	5	9	13	-
CV%	27	59	46	16	58	32

\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%

Στο βλήτο δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ του μάρτυρα και των υπολοίπων επεμβάσεων. Όλες οι επεμβάσεις εκτός από αυτή του μάρτυρα δεν διέφεραν στατιστικώς σημαντικά.

### 5.1.ε. Ύψος φυτού

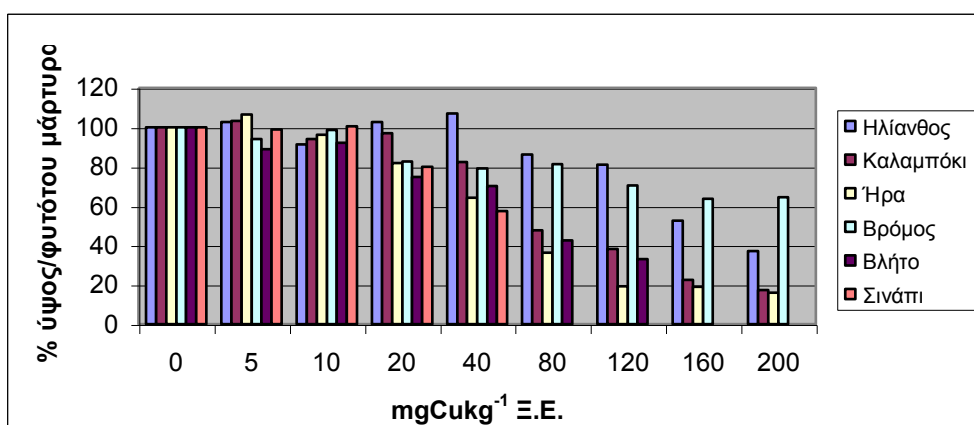
#### ι. Όξινο έδαφος (pH = 4,6)

Στο όξινο έδαφος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 9, παρατηρήθηκε μείωση του ύψους των φυτών με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος.

Από το σχήμα 9 φαίνεται ότι την μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή την είχε το σινάπι, ενώ την μικρότερη ο βρόμος. Με βάση την μεταβολή από την μεγαλύτερη προς την μικρότερη τα είδη κατατάσσονται ως εξής: σινάπι > βλήτο > ήρα > ηλίανθος > καλαμπόκι > βρόμος.

Στον ηλίανθο παρατηρήθηκε μείωση του ύψους των φυτών σε σχέση με τον μάρτυρα σε όλες τις επεμβάσεις, εκτός από τις επεμβάσεις 5,20 και 40 mgCu/kg<sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ. όπου το ύψος αυξήθηκε σε σχέση με τον μάρτυρα. Στο καλαμπόκι

παρατηρήθηκε μείωση σε σχέση με τον μάρτυρα εκτός από την επέμβαση  $5 \text{ mgCu kg}^{-1}$  Ξ.Ε.Δ. όπου υπήρξε μία μικρή αύξηση. Το ίδιο συνέβη και στην ήρα με μία ελαφριά αύξηση του ύψους των φυτών σε σχέση με τον μάρτυρα στην επέμβαση  $5 \text{ mgCu kg}^{-1}$  Ξ.Ε.Δ. Στον βρόμο, στο βλήτο και στο σινάπι, υπήρξε μία σταδιακή μείωση σε σχέση με τον μάρτυρα όσο αυξάνονταν η συγκέντρωση του χαλκού στο έδαφος. Το βλήτο και το σινάπι δεν μπόρεσαν να αναπτυχθούν στις επεμβάσεις  $160\text{--}200 \text{ mgCu kg}^{-1}$  Ξ.Ε.Δ. και  $80\text{--}200 \text{ mgCu kg}^{-1}$  Ξ.Ε.Δ. αντίστοιχα. Το σχήμα με τις απόλυτες τιμές του ύψους των φυτών παρατίθεται στο παράρτημα (Σχ.5).



Σχ. 9 Ύψος φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε όξινο έδαφος

Στον πίνακα 16, όπου παρουσιάζονται οι μέσοι όροι του ύψους για τις διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού φαίνεται ότι στον ηλίανθο ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά με τις επεμβάσεις  $5 - 120$  όπως και οι επεμβάσεις  $5 - 120 \text{ mgCu kg}^{-1}$  Ξ.Ε.Δ. και  $160 - 200 \text{ mgCu kg}^{-1}$  Ξ.Ε.Δ.

Στο καλαμπόκι, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά με τις επεμβάσεις  $5 - 20 \text{ mgCu kg}^{-1}$  Ξ.Ε.Δ., ενώ διέφερε με όλους τις υπόλοιπες. Μη στατιστικώς σημαντική διαφορά έχουν και οι επεμβάσεις  $160$  και  $200 \text{ mgCu kg}^{-1}$  Ξ.Ε.Δ.

Στην ήρα, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά με τις επεμβάσεις  $5$  και  $10 \text{ mgCu kg}^{-1}$  Ξ.Ε.Δ., όπως δεν διέφεραν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους και οι επεμβάσεις  $120 - 200 \text{ mgCu kg}^{-1}$  Ξ.Ε.Δ.

Στον βρόμο, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά με τις επεμβάσεις  $5$  και  $10 \text{ mgCu kg}^{-1}$  Ξ.Ε.Δ., όπως δεν διέφεραν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους και οι επεμβάσεις  $20 - 120 \text{ mgCu kg}^{-1}$  Ξ.Ε.Δ. και  $160\text{--}200 \text{ mgCu kg}^{-1}$  Ξ.Ε.Δ.

**Πίν.16 Ύψος φυτών και το επί τις % του μάρτυρα σε παρένθεση, καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu σε όξινο έδαφος (pH = 4,6)**

Συγκέντρωση mgCu <sub>kg</sub> <sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ.	Καλλιεργούμενα είδη			Ζιζάνια		
	ηλίανθος	καλαμπόκι	ήρα	βρόμος	βλήτο	σινάπι
	cm					
0	17,39 (100)	38,55 (100)	23,89 (100)	24,63 (100)	8,98 (100)	4,83 (100)
5	17,84 (103)	39,78 (103)	25,40 (106)	23,17 (94)	7,99 (89)	4,77 (99)
10	15,87 (91)	36,28 (94)	22,97 (96)	24,27 (99)	8,26 (92)	4,85 (100)
20	17,84 (103)	37,38 (97)	19,53 (82)	20,37 (83)	6,72 (75)	3,86 (80)
40	18,63 (107)	31,70 (82)	15,33 (64)	19,50 (79)	6,29 (70)	2,77 (57)
80	15,00 (86)	18,42 (48)	8,65 (36)	20,02 (81)	3,82 (43)	0
120	14,08 (81)	14,77 (38)	4,62 (19)	17,33 (70)	2,97 (33)	0
160	9,14 (53)	8,63 (22)	4,52 (19)	15,68 (64)	0	0
200	6,46 (37)	6,65 (17)	3,84 (16)	15,87 (64)	0	0
F- test	***	***	***	***	***	***
LSD <sub>0,05</sub>	3,6	3,6	2,15	3,34	0,57	0,4
CV%	14	8	9	10	7	10

\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%

Στο βλήτο, ο μάρτυρας παρουσίασε στατιστικώς σημαντικές διαφορές με όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις. Μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές παρατηρήθηκαν μεταξύ των επεμβάσεων 5 – 10 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ. και 20 – 40 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ.

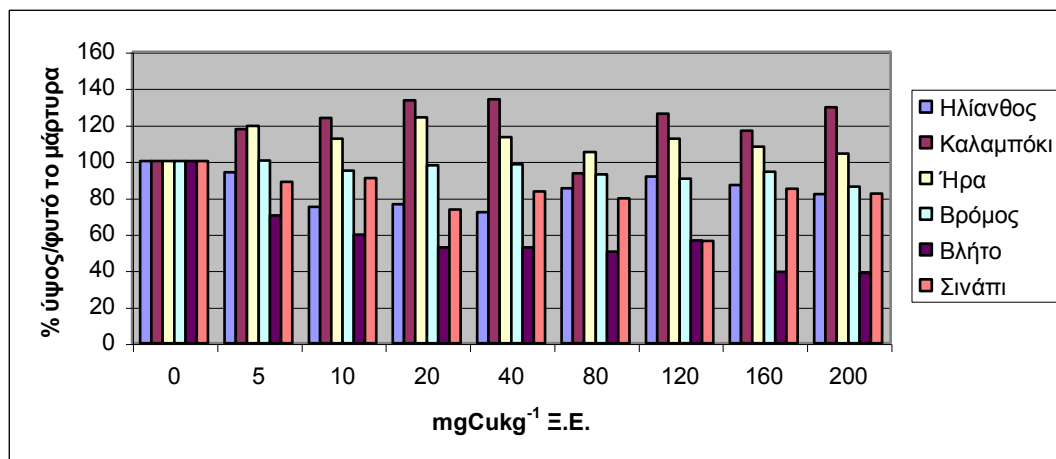
Σο σινάπι, ο μάρτυρας εν διέφερε στατιστικώς σημαντικά με τις επεμβάσεις 5 και 10 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ., ενώ διέφερε με όλες τις υπόλοιπες.

## ii. Αλκαλικό έδαφος (pH = 8,3)

Στο αλκαλικό έδαφος, το ύψος των φυτών δεν παρουσίασε μία σταθερή τάση με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στη μη διαθεσιμότητα του Cu λόγω υψηλού pH(ο χαλκός είναι διαθέσιμος στο φυτό όταν το έδαφος έχει  $4 < \text{pH} < 7$ ) και στις διαφορετικές επιδράσεις των διαφόρων ειδών στις διάφορες συγκεντρώσεις του Cu (Σχ.10). Το σχήμα με τις απόλυτες τιμές του ύψους των φυτών παρατίθεται στο παράρτημα (Σχ.6).

Την μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή σε σχέση με τον μάρτυρα την παρουσίασε το βλήτο, ενώ την μεγαλύτερη θετική την παρουσίασε το καλαμπόκι. Η σειρά αντίδρασης των ειδών από την μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή προς την μεγαλύτερη θετική ήταν η εξής: βλήτο > σινάπι > ηλίανθος > βρόμος > ήρα > καλαμπόκι.

Στο καλαμπόκι και την ήρα παρατηρήθηκε μία αύξηση σε σχέση με τον μάρτυρα στο ύψος των φυτών, ενώ στον ηλιάνθο και τον βρόμο μία αυξομείωση του ύψους σε σχέση με τον μάρτυρα. Αντίθετα, στο βλήτο και το σινάπι με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος το ύψος των φυτών μειώθηκε.



**Σχ. 10** Ύψος φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε αλκαλικό

Στον πίνακα 17 όπου παρουσιάζονται οι μέσοι όροι του ύψους των φυτών για τις διάφορες επεμβάσεις χαλκού φαίνεται ότι ο ηλιάνθος, η ήρα και ο βρόμος δεν έδωσαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές.

Στο καλαμπόκι, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από την επέμβαση 80 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Ε. ενώ διέφερε στατιστικώς σημαντικά με όλες τις υπόλοιπες. Επίσης, μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές παρατηρήθηκαν και μεταξύ των επεμβάσεων 10, 20, 40, 120 και 200 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Ε.

Στο βλήτο, ο μάρτυρας παρουσίασε στατιστικώς σημαντικές διαφορές με όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις. Αντίθετα, μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές παρουσιάστηκαν μεταξύ των επεμβάσεων 5 – 10 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Ε., 10–120 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Ε. και 80 με 160 – 200 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Ε.

Στο σινάπι, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις επεμβάσεις 5, 10, 40, 160 και 200 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Ε. όπως επίσης δεν διέφεραν στατιστικώς σημαντικά και οι επεμβάσεις 5 – 80 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Ε. και 160 – 200 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Ε.

**Πίν.17 Ύψος φυτών και το επί τις % του μάρτυρα σε παρένθεση, καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu σε αλκαλικό έδαφος (pH = 8,3)**

Συγκέντρωση __mgCukg <sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ.__	Καλλιεργούμενα είδη			Ζιζάνια		
	__ηλίανθος__	__καλαμπόκι__	__ήρα__	__βρόμος__	__βλήτο__	__σινάπι__
	cm					
0	26,24 (100)	24,67 (100)	18,76 (100)	27,27 (100)	19,53 (100)	8,38 (100)
5	24,65 (94)	29,01 (118)	22,41 (119)	27,33 (101)	13,70 (70)	7,43 (89)
10	19,67 (75)	30,53 (124)	21,09 (112)	25,83 (95)	11,65 (60)	7,61 (91)
20	20,04 (76)	32,93 (133)	23,25 (124)	26,62 (98)	10,28 (53)	6,15 (73)
40	18,86 (72)	33,07 (134)	21,26 (113)	26,79 (98)	10,27 (53)	6,99 (83)
80	22,35 (85)	23,03 (93)	19,73 (105)	25,29 (93)	9,83 (50)	6,66 (79)
120	24,01 (91)	31,07 (126)	21,09 (112)	24,67 (90)	11,02 (56)	4,70 (56)
160	22,78 (87)	28,82 (117)	20,25 (108)	25,69 (94)	7,65 (39)	7,12 (85)
200	21,48 (82)	31,95 (130)	19,55 (104)	23,47 (86)	7,57 (39)	6,89 (82)
F- test	ns	***	ns	ns	***	*
LSD <sub>0,05</sub>	-	3,6	-	-	2,5	1,7
CV%	12	7	9	5	16	14

\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%

Το σινάπι και το βλήτο ήταν τα δύο είδη φυτών τα οποία φαίνεται να αντιδρούν και να επηρεάζονται εξίσου από την αύξηση της συγκέντρωσης του Cu τόσο στο αλκαλικό έδαφος όσο και στο όξινα. Στο καλαμπόκι, η θετική αντίδραση ίσων να δείχνει έλλειψη Cu στις χαμηλές συγκεντρώσεις και κάλυψη των αναγκών του σε Cu στις υψηλότερες συγκεντρώσεις.

### 5.1.στ. Αριθμός φύλλων

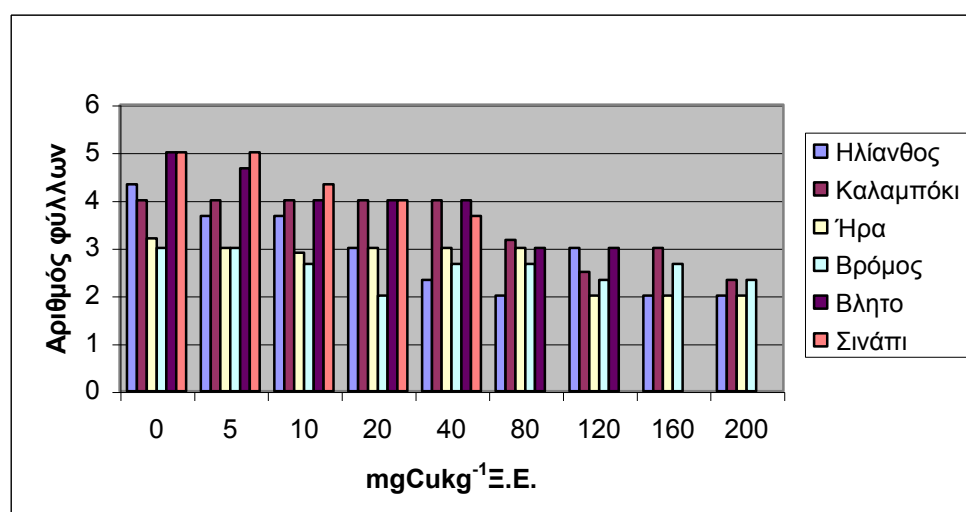
#### i. Όξινο έδαφος (pH = 4,6)

Στο όξινο έδαφος, (Σχ.11) παρατηρήθηκε μείωση του αριθμού των φύλλων των φυτών, γενικά σε όλα τα είδη φυτών, με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος. Το γεγονός αυτό εξηγείται από την επίδραση του pH του εδάφους στην διαθεσιμότητα και πρόσληψη του Cu από το φυτό και της τοξικότητας του Cu στις υψηλές συγκεντρώσεις του.

Στον βρόμος δεν παρατηρήθηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές (Πίν.18).

Στον ηλίανθο, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά με τις επεμβάσεις 5 – 20 mgCukg<sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ., ενώ διέφερε με όλες τις υπόλοιπες. Μη στατιστικώς σημαντική διαφορά έχουν και οι επεμβάσεις 20 - 200 mgCukg<sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ.

Στο καλαμπόκι, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά με τις επεμβάσεις 5 – 40 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ., ενώ διέφερε με όλες τις υπόλοιπες. Μη στατιστικώς σημαντική διαφορά είχαν και οι επεμβάσεις 80 - 120 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ.



Σχ. 11 Αριθμός φύλλων ανά φυτό σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε όξινο έδαφος (pH=4,6)

Στην ήρα, ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά με όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις. Μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές παρατηρήθηκαν και μεταξύ των επεμβάσεων 5 – 80 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ. αλλά και 120 – 200 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ.

Πίν.18 Αριθμός φύλλων φυτών καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu σε όξινο έδαφος (pH = 4,6)

Συγκέντρωση __mgCu <sub>kg</sub> <sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.__	Καλλιεργούμενα είδη			Ζιζάνια		
	__ηλίανθος__	__καλαμπόκι__	__ήρα__	__βρόμος__	__βλήτο__	__σινάπι__
	αριθμός φύλλων					
0	4,3	4,0	3,2	3,0	5,0	5,0
5	6,7	4,0	3,0	3,0	4,7	5,0
10	3,7	4,0	2,9	2,7	4,0	4,3
20	3,0	4,0	3,0	2,0	4,0	4,0
40	2,3	4,0	3,0	2,7	4,0	3,7
80	2,0	3,2	3,0	2,7	3,0	0
120	3,0	2,5	2,0	2,3	3,0	0
160	2,0	3,0	2,0	2,7	0	0
200	2,0	2,3	2,0	2,3	0	0
F- test	*	***	***	ns	***	***
LSD <sub>0,05</sub>	1,4	0,7	0,1	-	0,3	0,5
CV%	28	12	3	19	6	11

\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%



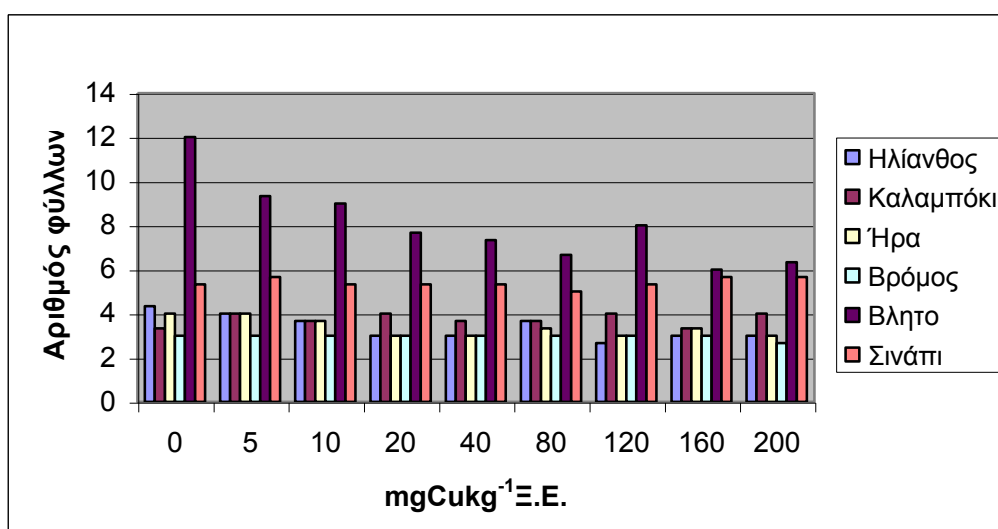
Στο βλήτο, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά με την επέμβαση 5 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ., ενώ διέφερε με όλες τις υπόλοιπες. Μη στατιστικώς σημαντική διαφορά είχαν και οι επεμβάσεις 10 - 40 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ. καθώς και οι επεμβάσεις 80 - 120 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ.

Το σινάπι έδειξε παρόμοια συμπεριφορά με το βλήτο. Ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά με την επέμβαση 5 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ., ενώ διέφερε με όλες τις υπόλοιπες. Μη στατιστικώς σημαντική διαφορά είχαν και οι επεμβάσεις 10 - 20 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ. καθώς και οι επεμβάσεις 20 - 40 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ.

Όπως στην περίπτωση του ύψους, έτσι και στον αριθμό των φύλλων, το βλήτο και το σινάπι αντέδρασαν και ο αριθμός των φύλλων μειώθηκε σημαντικά με την αύξηση της συγκέντρωσης του Cu στο έδαφος.

## ii. Αλκαλικό έδαφος (pH = 8,3)

Στο αλκαλικό έδαφος, παρατηρήθηκε μία αυξομείωση του αριθμού των φύλλων στα φυτά αλλά όχι σε όλα τα είδη (Σχ.12). Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην τιμή του pH (ο χαλκός είναι διαθέσιμος στο φυτό όταν το έδαφος έχει 4 < pH < 7) και από την μηχανική σύσταση.



Σχ. 12 Αριθμός φύλλων ανά φυτό σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε αλκαλικό έδαφος (pH=8,3)

Στο σινάπι, παρατηρήθηκε μία αύξηση του αριθμού των φύλλων στα φυτά στις επεμβάσεις 160 και 200 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ. τα οποία φύλλα ήταν πάρα πολύ μικρά σε σχέση με τα φύλλα των φυτών των υπολοίπων επεμβάσεων.

Στον πίνακα 19, όπου παρουσιάζονται οι μέσοι όροι του αριθμού των φύλλων στα φυτά, φάνηκε ότι το καλαμπόκι, ο βρόμος και το σινάπι δεν έδωσαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές..

Στο καλαμπόκι, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά με τις επεμβάσεις 5 – 10 και 80 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ., ενώ διέφερε με όλες τις υπόλοιπες. Μη στατιστικώς σημαντική διαφορά είχαν και οι επεμβάσεις 10, 20, 40, 80, 160 και 200 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ.

**Πίν.19 Αριθμός φύλλων φυτών καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu σε αλκαλικό έδαφος (pH = 8,3)**

Συγκέντρωση mgCu <sub>kg</sub> <sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ.	Καλλιεργούμενα είδη				Ζιζάνια	
	ηλίανθος	καλαμπόκι	ήρα	βρόμος	βλήτο	σινάπι
	αριθμός φύλλων					
0	4,3	3,3	4,0	3,0	12	5,3
5	4,0	4,0	4,0	3,0	9,3	5,7
10	3,7	3,7	3,7	3,0	9,0	5,3
20	3,0	4,0	3,0	3,0	7,7	5,3
40	3,0	3,7	3,0	3,0	7,3	5,3
80	3,7	3,7	3,3	3,0	6,7	5,0
120	2,7	4,0	3,0	3,0	8,0	5,3
160	3,0	3,3	3,3	3,0	6,0	5,7
200	3,0	4,0	3,0	2,7	6,3	5,7
F- test	**	ns	*	ns	***	ns
LSD <sub>0,05</sub>	0,7	-	0,6	-	1	-
CV%	12	12	10	7	13	10

\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%

Στην ήρα, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά με τις επεμβάσεις 5 - 10 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ., ενώ διέφερε με όλες τις υπόλοιπες. Μη στατιστικώς σημαντική διαφορά είχαν και οι επεμβάσεις 20 - 200 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ.

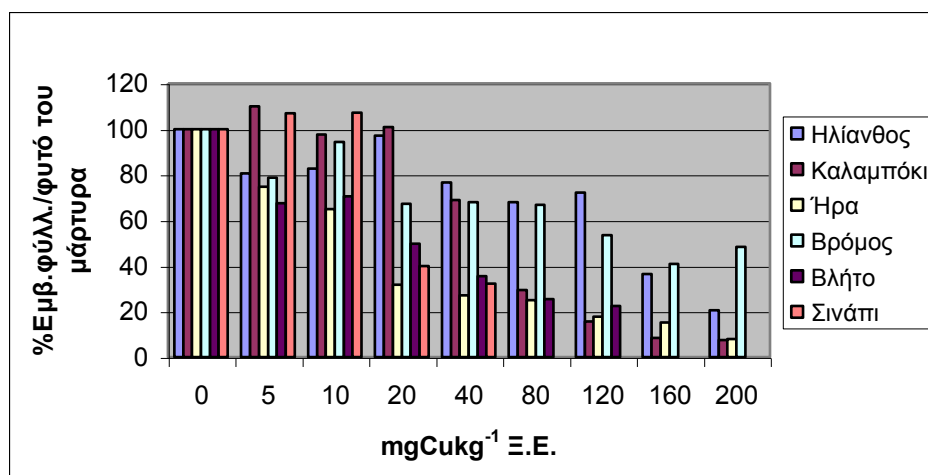
Στο βλήτο, ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά με όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις. Μη στατιστικώς σημαντική διαφορά είχαν και οι επεμβάσεις 5, 10, 20 και 120 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ. καθώς και οι επεμβάσεις 20 -200 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ.

### 5.1.ζ. Εμβαδόν 3<sup>ου</sup> φύλλου

#### ι. Όξινο έδαφος (pH = 4,6)

Στο όξινο έδαφος, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 13, το εμβαδόν των φύλλων μειώνεται όσο αυξάνεται η συγκέντρωση του χαλκού στο έδαφος. Το

γεγονός αυτό είναι απόρροια της τοξικής δράσης του χαλκού στο φυτό μιας και μειώνεται η φωτοσυνθετική δραστηριότητά του.



**Σχ. 13 Εμβαδόν του 3<sup>ου</sup> φύλλου των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε όξινο έδαφος (pH=4,6)**

Η μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή στο εμβαδόν του 3<sup>ου</sup> φύλλου παρατηρήθηκε στο βλήτο, ενώ η μικρότερη στο καλαμπόκι. Έτσι, κρίνοντας από το σχήμα 13 η σειρά αντίδρασης από την μεγαλύτερη προς την μικρότερη μεταβολή στα είδη είναι η εξής: βλήτο > ήρα > βρόμος > ηλίανθος > σινάπι > καλαμπόκι.

Στον ηλίανθο, την ήρα, τον βρόμο και το βλήτο, η αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού είχε ως συνέπεια την σταδιακή μείωση του εμβαδού του 3<sup>ου</sup> φύλλου των φυτών. Στο καλαμπόκι, η μείωση του εμβαδού του 3<sup>ου</sup> φύλλου σε σχέση με τον μάρτυρα ξεκινάει από την συγκέντρωση των 40 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ., ενώ στο σινάπι από την συγκέντρωση των 20 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ. Το σχήμα με τις απόλυτες τιμές του εμβαδού του 3<sup>ου</sup> φύλλου των φυτών παρατίθεται στο παράρτημα (Σχ.9).

Στον πίνακα 20, παρουσιάζονται οι μέσοι όροι του εμβαδού του 3<sup>ου</sup> φύλλου των φυτών σε σχέση με τις συγκεντρώσεις χαλκού που χρησιμοποιήθηκαν. Στον ηλίανθο, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις επεμβάσεις 5 – 120 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ., ενώ διέφερε με τις επεμβάσεις 160 – 200 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ.. Μη στατιστικώς σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε επιπλέον μεταξύ των επεμβάσεων 80 – 160 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ..

Στο καλαμπόκι, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις επεμβάσεις 5 – 20 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ., ενώ διέφερε με τις υπόλοιπες επεμβάσεις. Μη στατιστικώς σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε επιπλέον μεταξύ των επεμβάσεων 120 – 200 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ.

**Πίν.20 Εμβαδόν του 3ου φύλλου των φυτών και το επί τις % του μάρτυρα σε παρένθεση, καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu σε όξινο έδαφος (pH = 4,6)**

Συγκέντρωση mgCu <sub>kg</sub> <sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ.	Καλλιεργούμενα είδη			Ζιζάνια		
	ηλίανθος	καλαμπόκι	ήρα	βρόμος	βλήτο	σινάπι
	cm <sup>2</sup>					
0	7,26 (100)	24,63 (100)	2,37 (100)	4,80 (100)	1,36 (100)	1,50 (100)
5	5,85 (81)	27,06 (110)	1,77 (75)	3,78 (79)	0,92 (67)	1,60 (107)
10	6,00 (83)	24,05 (98)	1,55 (65)	4,53 (94)	0,96 (71)	1,61 (107)
20	7,05 (97)	24,86 (101)	0,75 (32)	3,23 (67)	0,68 (50)	0,60 (40)
40	5,56 (77)	16,95 (69)	0,64 (27)	3,26 (68)	0,48 (36)	0,48 (32)
80	4,94 (68)	7,25 (29)	0,59 (25)	3,21 (67)	0,35 (26)	0
120	5,23 (72)	3,85 (16)	0,42 (18)	2,57 (54)	0,30 (22)	0
160	2,65 (37)	2,08 (8)	0,36 (15)	1,96 (41)	0	0
200	1,49 (21)	1,82 (7)	0,19 (8)	2,32 (48)	0	0
F- test	**	***	***	***	***	***
LSD <sub>0,05</sub>	2,7	2,9	0,6	0,9	0,2	0,3
CV%	30	11	34	16	21	24

\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%

Στην ήρα, ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά με όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις. Μη στατιστικώς σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε μεταξύ των επεμβάσεων 5 – 10 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ. καθώς επίσης και των επεμβάσεων 20 - 200 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ.

Στον βρόμο, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από την επέμβαση 10 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ., ενώ διέφερε με όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις. Μη στατιστικώς σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε επιπλέον μεταξύ των επεμβάσεων 5 – 80 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ. καθώς επίσης και των επεμβάσεων 120 – 200 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ.

Στο βλήτο, ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά με όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις. Μη στατιστικώς σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε μεταξύ των επεμβάσεων 5 – 10 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ., 20 – 40 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ. καθώς και 40 – 120 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ.

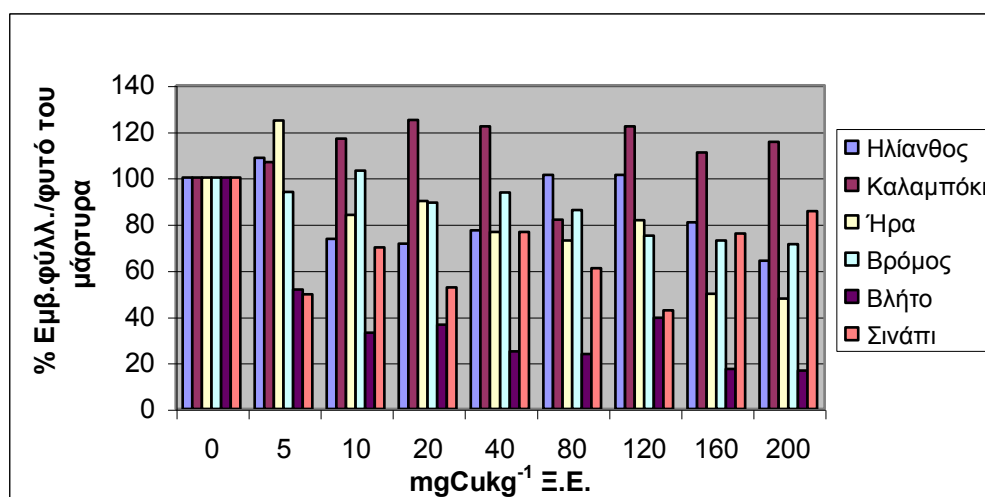
Στο σινάπι, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις επεμβάσεις 5 – 10 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ., ενώ διέφερε με όλες τις υπόλοιπες. Μη στατιστικώς σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε επιπλέον μεταξύ των επεμβάσεων 20 – 40 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ.

## ii. Αλκαλικό έδαφος (pH = 8,3)

Στο αλκαλικό έδαφος όπως φαίνεται στο σχήμα 14 παρατηρήθηκε μία αυξομείωση στο εμβαδόν του 3<sup>ου</sup> φύλλου των φυτών αλλά όχι σε όλα τα είδη. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην τιμή του pH του εδάφους (ο χαλκός είναι διαθέσιμος στο φυτό όταν το έδαφος έχει  $4 < \text{pH} < 7$ ) και από την μηχανική σύστασή του.

Η μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή παρατηρήθηκε στο βλήτο, ενώ η μεγαλύτερη θετική στο καλαμπόκι. Έτσι, από το σχήμα 14 και βάση της αντίδρασής τους τα είδη, από την μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή προς την μεγαλύτερη θετική, κατατάσσονται ως εξής : βλήτο > ήρα > βρόμος > ηλίανθος > σινάπι > καλαμπόκι.

Στον ηλίανθο και το σινάπι παρατηρήθηκε αυξομείωση του εμβαδού του 3<sup>ου</sup> φύλλου με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος, ενώ στο καλαμπόκι παρατηρήθηκε συνεχής αύξηση του εμβαδού του 3<sup>ου</sup> φύλλου. Στην ήρα, το εμβαδόν του 3<sup>ου</sup> φύλλου αυξήθηκε μέχρι την επέμβαση  $5 \text{ mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.ΕΔ.}$  και στην συνέχεια άρχισε να μειώνεται. Μείωση σε σχέση με τον μάρτυρα είχαν και ο βρόμος με το βλήτο με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού. Το σχήμα με τις απόλυτες τιμές του εμβαδού του 3<sup>ου</sup> φύλλου των φυτών παρατίθεται στο παράρτημα (Σχ.10).



Σχ. 14 Εμβαδόν του 3<sup>ου</sup> φύλλου των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε αλκαλικό έδαφος (pH=8,3)

Στον πίνακα 21, παρουσιάζονται οι μέσοι όροι του εμβαδού του 3<sup>ου</sup> φύλλου των φυτών σε σχέση με τις επεμβάσεις χαλκού που χρησιμοποιήθηκαν. Στον ηλίανθο, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις επεμβάσεις 5 και 80 – 160  $\text{mgCu kg}^{-1} \text{ Ξ.ΕΔ.}$ , ενώ διέφερε με όλες τις υπόλοιπες.

Στο καλαμπόκι, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις επεμβάσεις 5 – 10 mgCukg<sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ. και 160 – 200 mgCukg<sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ. Μη στατιστικώς σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε επιπλέον και μεταξύ των επεμβάσεων 5 –200 mgCukg<sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ.

**Πίν.21 Εμβαδόν του 3ου φύλλου των φυτών και το επί τις % του μάρτυρα σε παρένθεση, καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu σε αλκαλικό έδαφος (pH = 8,3)**

Συγκέντρωση mgCukg <sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.	Καλλιεργούμενα είδη			Ζιζάνια		
	ηλίανθος	καλαμπόκι	ήρα	βρόμος	βλήτο	σινάπι
	cm <sup>2</sup>					
0	9,96 (100)	18,76 (100)	1,78 (100)	5,70 (100)	6,37 (100)	2,71 (100)
5	10,82 (109)	20,02 (107)	2,22 (125)	5,35 (94)	3,29 (52)	1,34 (50)
10	7,32 (74)	21,94 (117)	1,49 (84)	5,88 (103)	2,10 (33)	1,89 (70)
20	7,11 (71)	23,44 (125)	1,60 (90)	5,09 (89)	2,32 (36)	1,42 (53)
40	7,70 (77)	22,92 (122)	1,36 (77)	5,35 (94)	1,59 (25)	2,07 (77)
80	10,10 (101)	15,34 (82)	1,30 (73)	4,91 (86)	1,51 (24)	1,65 (61)
120	10,07 (101)	22,93 (122)	1,45 (82)	4,27 (75)	2,51 (39)	1,16 (43)
160	8,05 (81)	20,82 (111)	0,89 (50)	4,16 (73)	1,11 (17)	2,05 (76)
200	6,38 (64)	21,66 (115)	0,85 (48)	4,07 (71)	1,06 (17)	2,31 (85)
F- test	*	**	**	**	***	*
LSD <sub>0,05</sub>	2,8	3,8	0,6	1	1,7	0,8
CV%	19	11	25	11	41	24

\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%

Στην ήρα, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις επεμβάσεις 5 – 160 mgCukg<sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ., ενώ διέφερε στατιστικώς σημαντικά μόνο με την επέμβαση 200 mgCukg<sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ.

Στον βρόμο, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις επεμβάσεις 5 – 80 mgCukg<sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ. ενώ διέφερε στατιστικώς σημαντικά με τις επεμβάσεις 120 – 200 mgCukg<sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ.

Στο βλήτο, ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά με όλες τις επεμβάσεις, ενώ μη στατιστικώς σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε μεταξύ των επεμβάσεων 10 –200 mgCukg<sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ.

Στο σινάπι, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά με τους μέσους όρους των επεμβάσεων 40, 160 και 200 mgCukg<sup>-1</sup>Ξ.Ε.Δ., ενώ διέφερε στατιστικώς σημαντικά με όλες τις υπόλοιπες.

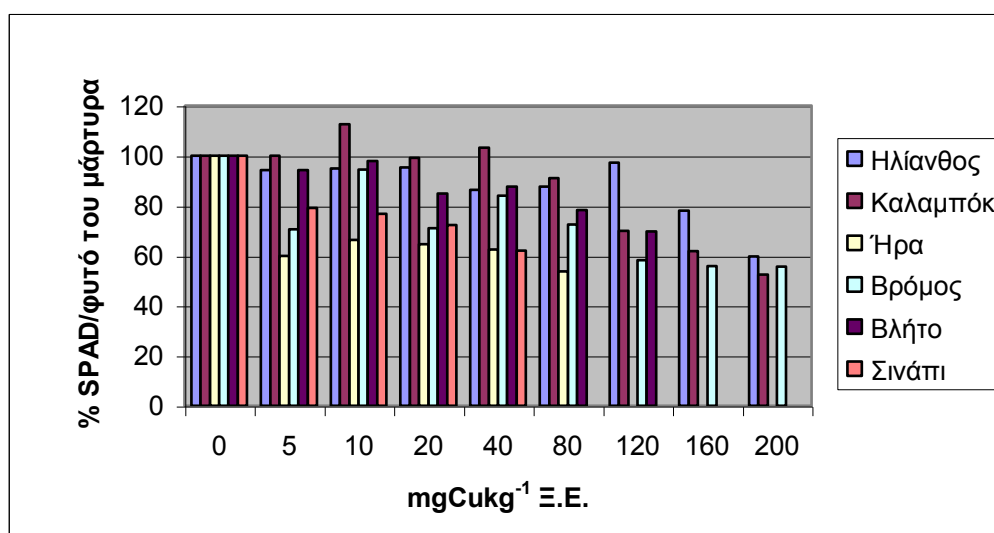
## 5.1.η. Χλωροφύλλη στο 3<sup>ο</sup> φύλλο

### ι. Όξινο έδαφος (pH = 4,6)

Στο όξινο έδαφος, όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 15, η τιμή του SPAD στο 3<sup>ο</sup> φύλλο μειώνεται όσο αυξάνεται η συγκέντρωση του χαλκού στο έδαφος. Το γεγονός αυτό είναι απόρροια της τοξικής δράσης του χαλκού στο φυτό μιας και μειώνεται η φωτοσυνθετική δραστηριότητα.

Η μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή στην τιμή του SPAD στο 3<sup>ο</sup> φύλλο παρατηρήθηκε στο σινάπι, ενώ η μικρότερη στο καλαμπόκι. Έτσι, από το σχήμα 15 και βάση την αντίδραση των ειδών, από την μεγαλύτερη προς την μικρότερη μεταβολή η σειρά είναι η εξής: σινάπι > ήρα > βλήτο > βρόμος > ηλίανθος > καλαμπόκι.

Στον ηλίανθο, την ήρα, τον βρόμο, το βλήτο και το σινάπι, η μείωση ήταν βαθμιαία και ανάλογη με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού. Στο καλαμπόκι παρατηρήθηκε μία αύξηση της τιμής του SPAD, σε σχέση με τον μάρτυρα, μέχρι την επέμβαση των 40 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ. και στη συνέχεια ακολούθησε μείωση της τιμής. Στην ήρα, το 3<sup>ο</sup> φύλλο στα φυτά στις επεμβάσεις 120 – 200 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ. είχε πολύ μικρό μέγεθος με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η μέτρηση της τιμής του SPAD. Το σχήμα με τις απόλυτες τιμές της τιμής SPAD του 3<sup>ου</sup> φύλλου των φυτών παρατίθεται στο παράρτημα (Σχ.7).



Σχ. 15 Τιμή SPAD στο 3<sup>ο</sup> φύλλο των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε όξινο έδαφος (pH=4,6)

Στον πίνακα 22, παρουσιάζονται οι μέσοι όροι της τιμής του SPAD στο 3<sup>ο</sup> φύλλο των φυτών σε σχέση με τις συγκεντρώσεις χαλκού που χρησιμοποιήθηκαν και από τον οποίο φαίνεται ότι ο ηλίανθος δεν έδωσε στατιστικώς σημαντικές διαφορές.

Στο καλαμπόκι, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις επεμβάσεις 5 – 80 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ., ενώ διέφερε στατιστικώς σημαντικά με όλες τις υπόλοιπες.

Στην ήρα, ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά από όλες τις επεμβάσεις, ενώ μη στατιστικώς σημαντικά διαφέρουν οι επεμβάσεις 5 – 80 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.

Στον βρόμο, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από την επέμβαση 10 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ., καθώς και οι επεμβάσεις 5, 20 – 120 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.

**Πίν.22 SPAD στο 3ο φύλλο των φυτών και το επί τις % του μάρτυρα σε παρένθεση, καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu σε όξινο έδαφος (pH = 4,6)**

Συγκέντρωση mgCu kg <sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.	Καλλιεργούμενα είδη		Ζιζάνια			
	ηλίανθος	καλαμπόκι	ήρα	βρόμος	βλήτο	σινάπι
	SPAD					
0	30,35 (100)	23,88 (100)	8,39 (100)	13,16 (100)	27,15 (100)	33,48 (100)
5	28,62 (94)	23,85 (100)	5,03 (60)	9,29 (71)	25,56 (94)	26,46 (79)
10	28,77 (95)	26,88 (113)	5,57 (66)	12,43 (94)	26,55 (98)	25,67 (77)
20	28,94 (95)	23,65 (99)	5,42 (65)	9,33 (71)	23,04 (85)	24,16 (72)
40	26,18 (86)	24,63 (103)	5,24 (63)	11,05 (84)	23,80 (88)	20,77 (62)
80	26,60 (88)	21,70 (91)	3,00 (54)	9,55 (73)	21,23 (78)	0
120	29,52 (97)	16,67 (70)	0	7,65 (58)	18,94 (70)	0
160	23,70 (78)	14,77 (62)	0	7,34 (56)	0	0
200	18,12 (60)	12,52 (53)	0	7,32 (56)	0	0
F- test	ns	***	***	***	***	***
LSD <sub>0,05</sub>	-	5,1	2,2	1,8	3,8	1,5
CV%	16	14	35	11	12	6

\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%

Στο βλήτο, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις επεμβάσεις 5, 10 και 40 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ., ενώ διέφερε στατιστικώς σημαντικά με όλες τις υπόλοιπες.

Στο σινάπι, ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά με όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις, ενώ δεν διέφεραν στατιστικώς σημαντικά οι επεμβάσεις 5–10 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.

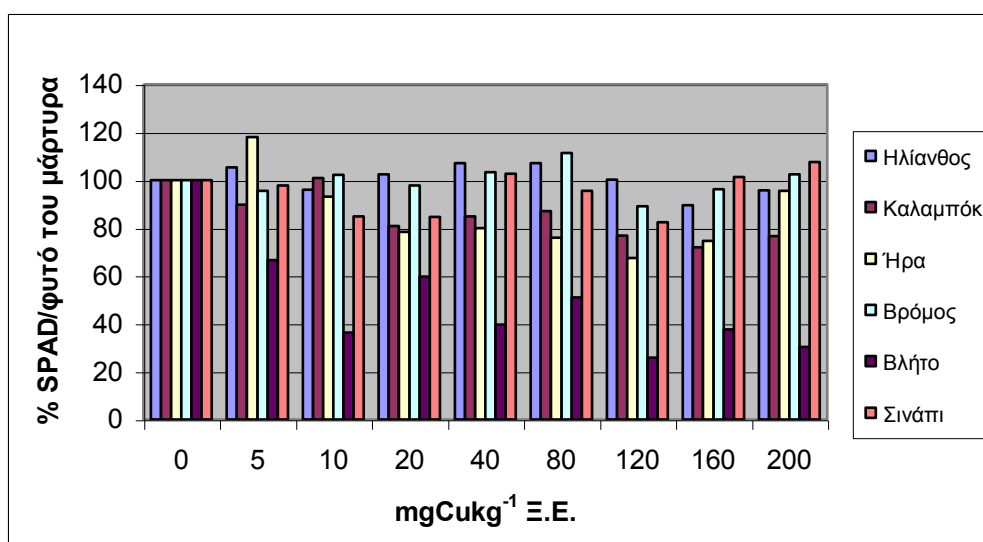


## ii. Αλκαλικό έδαφος (pH = 8,3)

Στο αλκαλικό έδαφος όπως φαίνεται στο σχήμα 16 παρατηρήθηκε μία αυξομείωση στην τιμή του SPAD στο 3<sup>ο</sup> φύλλο των φυτών. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην τιμή του pH (ο χαλκός είναι διαθέσιμος στο φυτό όταν το έδαφος έχει  $4 < \text{pH} < 7$ ) και από την μηχανική σύσταση του εδάφους.

Η μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή παρατηρήθηκε στο βλήτο, ενώ η μεγαλύτερη θετική στον βρόμο. Έτσι, από το σχήμα 16 και βάσει την αντίδραση των ειδών στην αύξηση της συγκέντρωσης του Cu στο έδαφος, από την μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή προς την μεγαλύτερη θετική, η σειρά κατάταξης είναι η εξής : βλήτο > ήρα > καλαμπόκι > σινάπι > ηλίανθος > βρόμος.

Στον ηλίανθο, τον βρόμο και το σινάπι παρατηρήθηκε αυξομείωση της τιμής του SPAD του 3<sup>ου</sup> φύλλου, σε σχέση με τον μάρτυρα, με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος, ενώ στο καλαμπόκι, την ήρα και το βλήτο παρατηρήθηκε μείωση σε σχέση με τον μάρτυρα με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού. Το σχήμα με τις απόλυτες τιμές της τιμής SPAD του 3<sup>ου</sup> φύλλου των φυτών παρατίθεται στο παράρτημα (Σχ.8).



Σχ. 16 Τιμή SPAD στο 3<sup>ο</sup> φύλλο των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε αλκαλικό έδαφος (pH=8,3)

Στον πίνακα 23, παρουσιάζονται οι μέσοι όροι της τιμής του SPAD στο 3<sup>ο</sup> φύλλο των φυτών σε σχέση με την συγκέντρωση του Cu στο έδαφος και από τον

οποίο φαίνεται ότι ο ηλίανθος, η ήρα, ο βρόμος και το σινάπι δεν έδωσαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές.

Στο καλαμπόκι, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις επεμβάσεις 5 - 10 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ. ενώ διέφερε με όλες τις υπόλοιπες. Επίσης, μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές παρατηρήθηκαν μεταξύ των επεμβάσεων 5 με 20 - 80 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ., καθώς επίσης και των επεμβάσεων 20 – 200 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ.

Στο βλήτο, ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά με όλες τις επεμβάσεις, ενώ δεν διέφεραν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους οι επεμβάσεις 5, 20 – 80 και 160 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ.

**Πίν.23 SPAD στο 3ο φύλλο των φυτών και το επί τις % του μάρτυρα σε παρένθεση, καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu σε αλκαλικό έδαφος (pH = 8,3)**

Συγκέντρωση mgCu <sub>kg</sub> <sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ.	Καλλιεργούμενα είδη			Ζιζάνια		
	ηλίανθος	καλαμπόκι	ήρα	βρόμος	βλήτο	σινάπι
	SPAD					
0	26,34 (100)	22,70 (100)	9,71 (100)	8,39 (100)	24,03 (100)	17,58 (100)
5	27,73 (105)	20,35 (90)	11,44 (118)	8,00 (95)	16,00 (67)	17,17 (98)
10	25,25 (96)	22,87 (101)	9,04 (93)	8,58 (102)	8,70 (36)	14,92 (85)
20	27,00 (103)	18,34 (81)	7,61 (78)	8,19 (98)	14,33 (60)	14,85 (84)
40	28,18 (107)	19,26 (85)	7,77 (80)	8,66 (103)	9,50 (40)	18,03 (103)
80	28,18 (107)	19,76 (87)	7,37 (76)	9,33 (111)	12,25 (51)	16,78 (95)
120	26,36 (100)	17,45 (77)	6,55 (68)	7,47 (89)	6,20 (26)	14,49 (82)
160	23,54 (89)	16,34 (72)	7,24 (75)	8,07 (96)	9,07 (38)	17,79 (101)
200	25,23 (96)	17,39 (77)	9,27 (96)	8,59 (102)	7,30 (30)	18,91 (108)
F- test	ns	**	ns	ns	**	ns
LSD <sub>0,05</sub>	-	3	-	-	7	-
CV%	9	7	20	15	34	29

\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%

### 5.1.θ. Συγκέντρωση Cu στο φυτό

#### ι. Όξινο έδαφος (pH = 4,6)

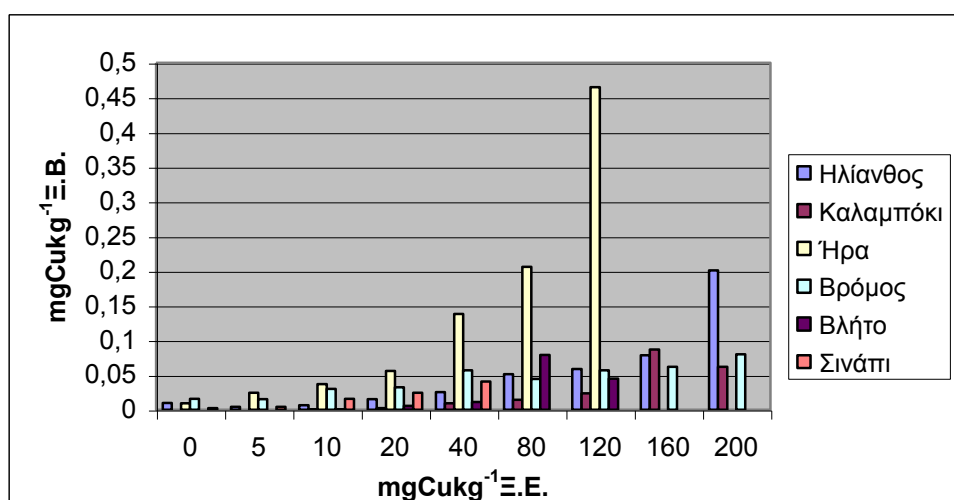
Οι μετρήσεις της ποσότητας του χαλκού που προσλήφθηκε από τα φυτά στο υπέργειο και υπόγειο τμήμα τους σε συσκευή ατομικής απορρόφησης στο εργαστήριο εδαφολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Στην ήρα, το βλήτο και το σινάπι δεν μπόρεσε να μετρηθεί η ποσότητα του χαλκού στο υπέργειο και υπόγειο τμήμα των φυτών σε κάποιες συγκεντρώσεις λόγω της μικρής μάζας των φυτών.

Η μεγαλύτερη ποσότητα χαλκού στο υπέργειο τμήμα των φυτών προσλήφθηκε από την ήρα, ενώ η μικρότερη από το βλήτο. Έτσι, από το σχήμα 17 και από την μεγαλύτερη προς την μικρότερη συγκέντρωση χαλκού στο υπέργειο τμήμα των φυτών, τα είδη κατατάσσονται ως εξής: ήρα > ηλίανθος > βρόμος > καλαμπόκι > σινάπι > βλήτο (Σχ.17).

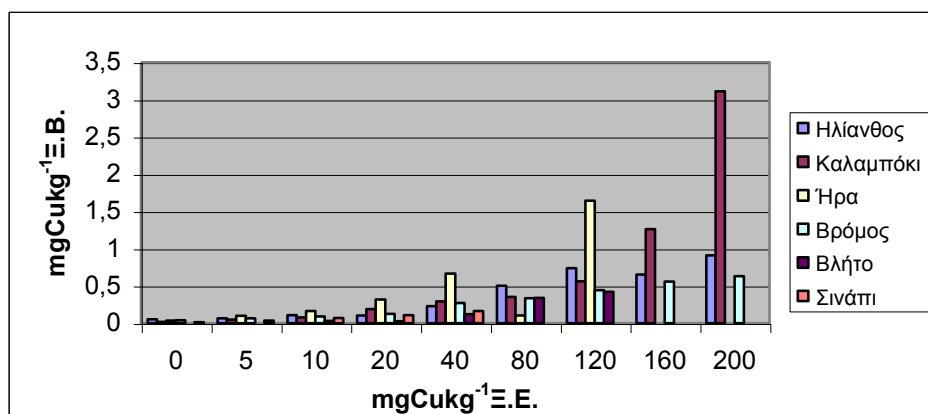
Η συγκέντρωση του Cu στα διάφορα είδη στο ριζικό σύστημα δίνεται στο σχήμα 18.

Όπως στο υπέργειο τμήμα έτσι και στο υπόγειο, η συγκέντρωση του Cu αυξάνονταν όσο αυξάνονταν και η συγκέντρωση του Cu στο έδαφος.



**Σχ. 17 Συγκέντρωση Cu στο υπέργειο τμήμα των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε όξινο έδαφος (pH=4,6)**

Η μεγαλύτερη ποσότητα χαλκού στο υπόγειο τμήμα των φυτών προσλήφθηκε από το καλαμπόκι, ενώ η μικρότερη από το σινάπι. Στο σχήμα 18 φαίνεται ότι η κατάταξη των ειδών ως προς την συγκέντρωση χαλκού στο ριζικό σύστημα των φυτών, είναι: καλαμπόκι > ήρα > ηλίανθος > βρόμος > βλήτο > σινάπι.



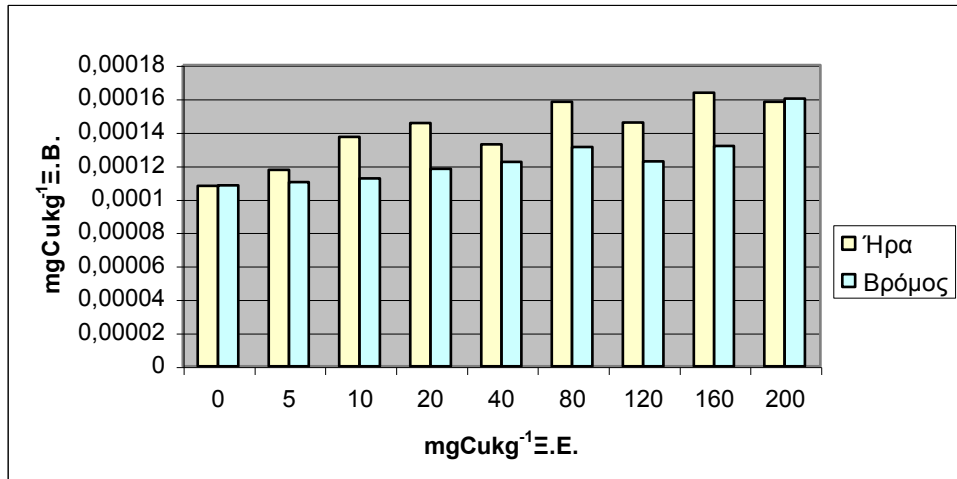
**Σχ. 18 Συγκέντρωση Cu στην ρίζα των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε όξινο έδαφος (pH=4,6)**

Στον πίνακα 24, παρουσιάζεται η αναλογία χαλκού που προσλήφθηκε από το φυτό στα τμήματά του (υπόγειο και υπέργειο).

Στον ηλιάνθο, όσο αυξάνονταν η συγκέντρωση του χαλκού στο έδαφος τόσο αυξάνονταν η ποσότητα του Cu στο υπέργειο τμήμα του και μειώνονταν στη ρίζα. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και στα είδη, καλαμπόκι, ήρα και σινάπι. Στον βρόμο και το βλήτο με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος, η ποσότητα του χαλκού που συγκεντρώνεται στο υπέργειο τμήμα των φυτών μειώνονταν, ενώ αυξάνονταν στο ριζικό σύστημα.

## ii. Αλκαλικό έδαφος (pH = 8,3)

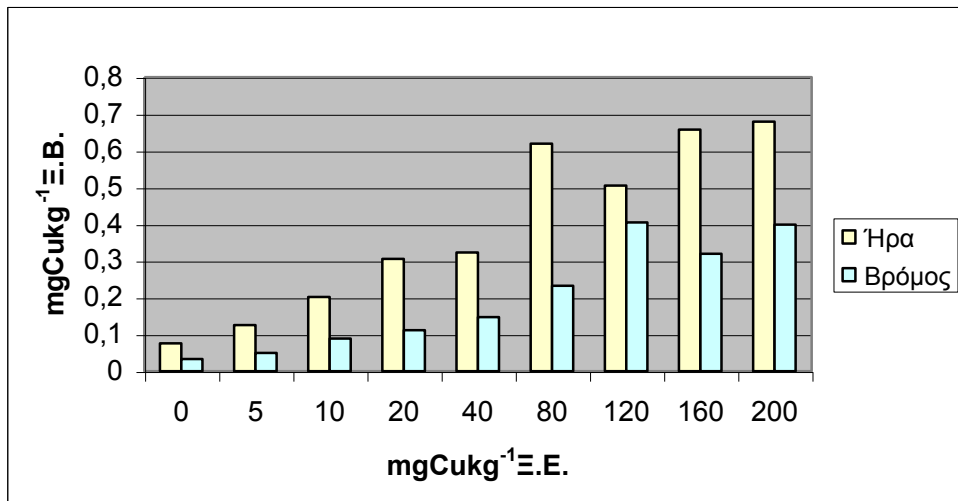
Η συγκέντρωση Cu στο υπέργειο και υπόγειο τμήμα και για τα δύο είδη, ήρα και βρόμο, αυξήθηκε με την αύξηση της συγκέντρωσης του Cu στο έδαφος (Σχ. 19 και 20). Επίσης η συγκέντρωση του Cu ήταν μεγαλύτερη στο υπόγειο τμήμα σε σχέση με το υπέργειο. Σε όλες της συγκεντρώσεις του χαλκού στο έδαφος, η ήρα προσρόφησε μεγαλύτερη ποσότητα Cu σε σύγκριση με τον βρόμο, τόσο στο υπέργειο (Σχ.19), όσο και στο υπόγειο τμήμα της (Σχ.20). από τα σχήματα 17 και 18 (όξινο έδαφος) και από τα σχήματα 19 και 20 (αλκαλικό έδαφος) φαίνεται ότι στο όξινο έδαφος, η πρόσληψη Cu ήταν μεγαλύτερη απ' ότι στο αλκαλικό γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην μεγαλύτερη βιοδιαθεσιμότητα του Cu στο όξινο περιβάλλον.



**Σχ. 19 Συγκέντρωση Cu στο υπέργειο τμήμα των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε αλκαλικό έδαφος (pH=8,3)**

**Πίν. 24 Πίνακας με την εκατοστιαία αναλογία συγκέντρωσης του Cu στο υπέργειο και υπόγειο τμήμα των φυτών σε όξινο έδαφος (pH=4,6)**

Συγκέντρωση __mgCu/kg <sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ. __	Καλλιεργούμενα είδη				Ζιζάνια							
	ηλιάνθος		καλαμπόκι		ήρα		βρόμος		βλήτο		σινάπι	
	% υπέργ.	% ρίζα	% υπέργ.	% ρίζα	% υπέργ.	% ρίζα	% υπέργ.	% ρίζα	% υπέργ.	% ρίζα	% υπέργ.	% ρίζα
0	15,930	84,070	0,547	99,453	22,260	77,740	28,191	71,809	27,233	72,767	18,809	81,191
5	5,626	94,374	0,194	99,806	19,883	80,117	19,321	80,679	28,039	71,961	10,788	89,212
10	5,882	94,118	0,336	99,664	18,436	81,564	24,795	75,205	1,680	98,320	18,315	81,685
20	12,705	87,295	1,137	98,863	14,915	85,085	20,576	79,424	18,938	81,062	18,408	81,592
40	10,059	89,941	3,126	96,874	17,239	82,761	17,278	82,722	8,360	91,640	19,960	80,040
80	9,257	90,743	3,914	96,086	66,870	33,130	11,707	88,293	18,998	81,002	0	0
120	7,378	92,622	4,003	95,997	22,076	77,924	11,402	88,598	9,651	90,349	0	0
160	10,766	89,234	6,435	93,565	0	0	9,981	90,019	0	0	0	0
200	18,118	81,882	1,945	98,055	0	0	11,229	88,771	0	0	0	0



**Σχ. 20 Συγκέντρωση Cu στην ρίζα των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε αλκαλικό έδαφος (pH=8,3)**

Στον πίνακα 25, παρουσιάζεται η αναλογία χαλκού που προσλήφθηκε από το φυτό και συγκεντρώθηκε στα τμήματά του (υπέργειο και υπόγειο).

**Πίν. 25 Πίνακας με την εκατοστιαία αναλογία συγκέντρωσης του Cu στο υπέργειο και υπόγειο τμήμα των φυτών σε αλκαλικό έδαφος (pH=8,3)**

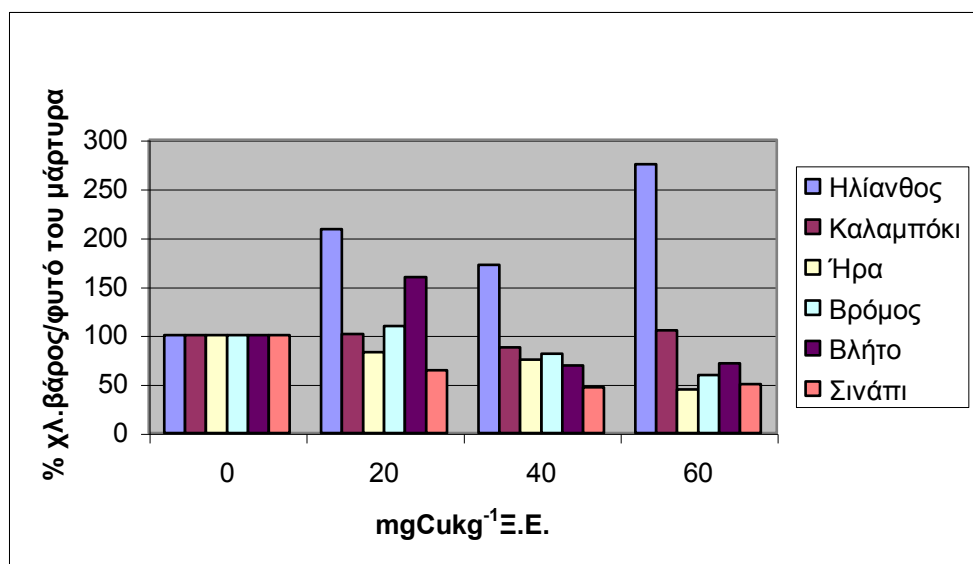
Συγκέντρωση mgCu kg <sup>-1</sup> D.W.	Ζιζάνια			
	ήρα		βρόμος	
	% υπέργ.	% ρίζα	% υπέργ.	% ρίζα
0	0,142	99,858	0,330	99,670
5	0,093	99,907	0,220	99,780
10	0,068	99,932	0,126	99,874
20	0,048	99,952	0,105	99,895
40	0,041	99,959	0,083	99,917
80	0,026	99,974	0,056	99,944
120	0,029	99,971	0,030	99,970
160	0,025	99,975	0,041	99,959
200	0,023	99,977	0,040	99,960

Στην ήρα, αλλά και στον βρόμο, όσο αυξάνονταν η συγκέντρωση του χαλκού στο έδαφος τόσο μειώνονταν το ποσοστό του τελευταίου στο υπέργειο τμήμα και αυξάνονταν στη ρίζα.

## 5.2. Πείραμα αγρού

### 5.2.α. Χλωρό βάρος υπέργειου τμήματος του φυτού (pH = 8,3)

Όπως φαίνεται στο σχήμα 21, το χλωρό βάρος του υπέργειου τμήματος των φυτών στον αγρό, δεν παρουσίασε σταθερή αντίδραση με την αύξηση της συγκέντρωσης του Cu στο έδαφος. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στην επίδραση του pH του εδάφους στην βιοδιαθεσιμότητα και την πρόσληψη του Cu από το φυτό.



Σχ.21 Χλωρό βάρος υπέργειου τμήματος των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού στον αγρό (pH=8,3)

Η μεγαλύτερη αρνητική αντίδραση παρατηρήθηκε στην ήρα, ενώ η μεγαλύτερη θετική στον ηλίανθο. Από την μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή προς την μεγαλύτερη θετική, τα φυτικά είδη κατατάσσονται ως εξής: ήρα > σινάπι > βρόμος > βλήτο > καλαμπόκι > ηλίανθος.

Μείωση μεγαλύτερη από 20% σε σχέση με τον μάρτυρα δεν παρατηρήθηκε σε όλα τα φυτικά είδη με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος. Σε καμία επέμβαση στον ηλίανθο και το καλαμπόκι δεν παρατηρήθηκε τέτοια μείωση. Αντίθετα, στην περίπτωση του βρόμου, μείωση μεγαλύτερη από 80% εμφανίστηκε στην επέμβαση 60 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ., στην ήρα και το βλήτο στις επεμβάσεις 40 και 60 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ., ενώ στο σινάπι στις επεμβάσεις 20, 40 και 60 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.



Στον πίνακα 26, παρουσιάζονται οι μέσοι όροι του χλωρού βάρους του υπέργειου τμήματος των φυτών σε σχέση με τις επεμβάσεις χαλκού που χρησιμοποιήθηκαν και από τον οποίο φαίνεται ότι το καλαμπόκι, η ήρα, ο βρόμος και το σινάπι δεν έδωσαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές.

Στον ηλίανθο, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από την επέμβαση 40 mgCu/kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ. Μη στατιστικώς σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε και μεταξύ των επεμβάσεων 20 – 40 mgCu/kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.

**Πίν. 26 Χλωρό βάρος υπέργειου τμήματος και το επί τις % του μάρτυρα σε παρένθεση, καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu στον αγρό (pH = 8,3)**

Συγκέντρωση mgCu/kg-1 Ξ.Ε.Δ.	Καλλιεργούμενα είδη			Ζιζάνια		
	ηλίανθος	καλαμπόκι	ήρα	βρόμος	βλήτο	σινάπι
	mg					
0	7358 (100)	2699 (100)	3602 (100)	3946 (100)	7330 (100)	15757 (100)
20	15391 (208)	2733 (101)	2972 (83)	4312 (109)	11700 (160)	10092 (64)
40	12705 (172)	2361 (87)	2701 (75)	3196 (81)	5070 (69)	7345 (47)
60	20309 (275)	2832 (105)	1602 (45)	2339 (59)	5220 (71)	7873 (50)
F- test	**	ns	ns	ns	*	ns
LSD <sub>0,05</sub>	5930	-	-	-	4675	-
CV%	21	14	31	25	32	46

\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%

Στο σινάπι, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις.

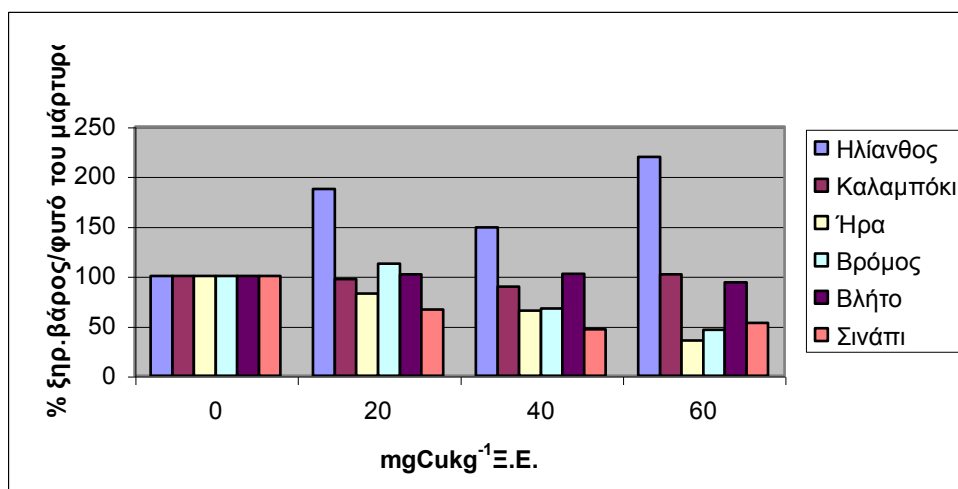
### 5.2.β. Ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος του φυτού (pH = 8,3)

Το ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος των διαφόρων ειδών παρουσίασε αντίδραση στην αύξηση της συγκέντρωσης του Cu στο έδαφος, όπως προκύπτει αντίστοιχα και στο χλωρό βάρος (Σχ.22).

Η μεγαλύτερη μείωση του βάρους στα φυτά παρατηρήθηκε στην ήρα, ενώ η μεγαλύτερη αύξηση στον ηλίανθο. Από την μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή προς την μεγαλύτερη θετική, τα φυτικά είδη κατατάσσονται στη σειρά ως εξής: ήρα > βρόμος > σινάπι > καλαμπόκι > βλήτο > ηλίανθος.

Μείωση μεγαλύτερη από 20% σε σχέση με τον μάρτυρα δεν παρατηρήθηκε σε όλα τα φυτικά είδη με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος. Σε καμία επέμβαση στον ηλίανθο, το καλαμπόκι και το βλήτο δεν

παρατηρήθηκε τέτοια μείωση. Αντίθετα, στην περίπτωση του βρόμου και της ήρας μείωση μεγαλύτερη από 80% εμφανίστηκε στις επεμβάσεις 40 - 60 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ., ενώ στο σινάπι στις επεμβάσεις 20, 40 και 60 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ.



Σχ. 22 Ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού στον αγρό (pH=8,3)

Στον πίνακα 27, παρουσιάζονται οι μέσοι όροι του ξηρού βάρους του υπέργειου τμήματος των φυτών σε σχέση με τις επεμβάσεις χαλκού που χρησιμοποιήθηκαν και από τον οποίο φαίνεται ότι το καλαμπόκι, ο βρόμος, το βλήτο και το σινάπι δεν έδωσαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές.

Στον ηλιάνθο, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από την επέμβαση 40 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ. Μη στατιστικώς σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε και μεταξύ των επεμβάσεων 20 – 40 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ.

Πίν. 27 Ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu στον αγρό (pH = 8,3)

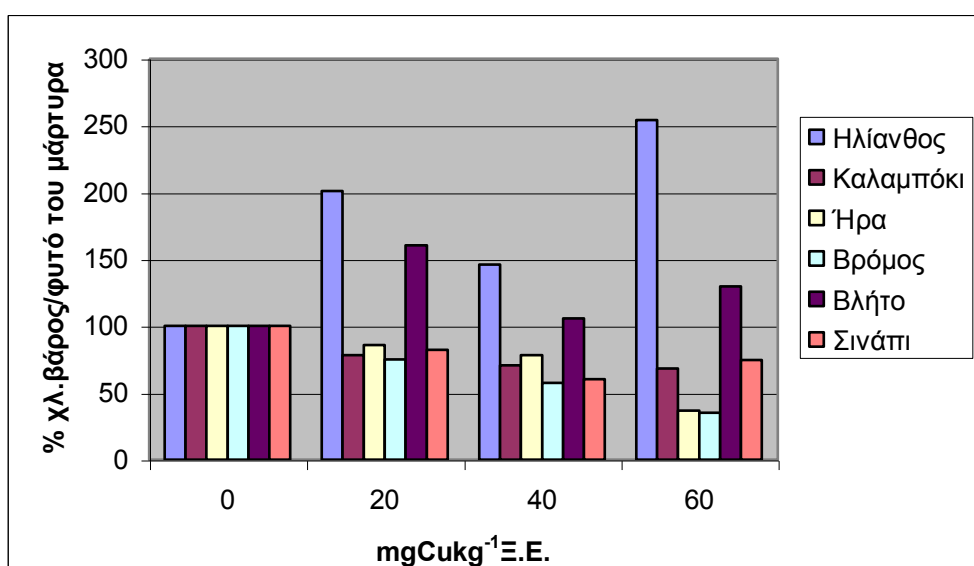
Συγκέντρωση __mgCu <sub>kg</sub> <sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ. __	Καλλιεργούμενα είδη				Ζιζάνια	
	__ηλιάνθος__	__καλαμπόκι__	__ήρα__	__βρόμος__	__βλήτο__	__σινάπι__
	mg					
0	939	322	693	505	242	1936
20	1760	312	573	568	246	1287
40	1399	287	453	340	247	905
60	2059	327	243	234	22	1024
F- test	**	ns	*	ns	ns	ns
LSD <sub>0,05</sub>	492	-	288	-	-	-
CV%	16	13	29	31	14	40

\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%

Στην ήρα, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από τις επεμβάσεις 20 – 40 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ., ενώ διέφερε στατιστικώς σημαντικά από την επέμβαση 60 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ.

### 5.2.γ. Χλωρό βάρος ρίζας (pH = 8,3)

Όπως φαίνεται στο σχήμα 23, το χλωρό βάρος του υπόγειου τμήματος των φυτών στον αγρό, δεν παρουσίασε σταθερή αντίδραση με την αύξηση της συγκέντρωσης του Cu στο έδαφος. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στην επίδραση του pH του εδάφους στην βιοδιαθεσιμότητα και την πρόσληψη του Cu από το φυτό.



Σχ. 23 Χλωρό βάρος της ρίζας των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού στον αγρό (pH=8,3)

Η μεγαλύτερη μείωση του χλωρού βάρους της ρίζας παρατηρήθηκε στον βρόμο, ενώ η μεγαλύτερη αύξηση στον ηλίανθο. Από την μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή προς την μεγαλύτερη θετική, τα φυτικά είδη κατατάσσονται στη σειρά: βρόμος > ήρα > καλαμπόκι > σινάπι > βλήτο > ηλίανθος.

Μείωση μεγαλύτερη από 20% σε σχέση με τον μάρτυρα δεν παρατηρήθηκε σε όλα τα φυτικά είδη με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος. Σε καμία επέμβαση στον ηλίανθο και το βλήτο δεν παρατηρήθηκε τέτοια μείωση. Αντίθετα, στην περίπτωση του σιναπιού και της ήρας, μείωση μεγαλύτερη από 20% εμφανίστηκε στις επεμβάσεις 40 - 60 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ., ενώ στο καλαμπόκι και τον βρόμο στις επεμβάσεις 20, 40 και 60 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup>Ξ.ΕΔ.

Στον πίνακα 28, παρουσιάζονται οι μέσοι όροι του χλωρού βάρους της ρίζας των φυτών σε σχέση με τις επεμβάσεις χαλκού που χρησιμοποιήθηκαν και από τον οποίο φαίνεται ότι η ήρα, ο βρόμος, το βλήτο και το σινάπι δεν έδωσαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές.

**Πίν. 28 Χλωρό βάρος ριζικού συστήματος και το επί τις % του μάρτυρα σε παρένθεση, καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu στον αγρό (pH = 8,3)**

Συγκέντρωση mgCukg <sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ.	Καλλιεργούμενα είδη			Ζιζάνια		
	ηλίανθος	καλαμπόκι	ήρα	βρόμος	βλήτο	σινάπι
	mg					
0	573 (100)	1328 (100)	607 (100)	1266 (100)	498 (100)	886 (100)
20	1150 (201)	1036 (78)	520 (86)	951 (75)	797 (160)	727 (82)
40	835 (146)	938 (71)	474 (78)	729 (58)	530 (106)	534 (60)
60	1454 (254)	908 (68)	222 (37)	445 (35)	647 (130)	659 (74)
F- test	**	*	ns	ns	ns	Ns
LSD <sub>0,05</sub>	292	297	-	-	-	-
CV%	15	14	29	36	18	49

\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%

Στον ηλίανθο, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από την επέμβαση 40 mgCukg<sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ., ενώ διέφερε με όλες τις υπόλοιπες.

Στο καλαμπόκι, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από την επέμβαση 20 mgCukg<sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ. επίσης, μη στατιστικώς σημαντική διαφορά παρουσιάστηκε και μεταξύ των επεμβάσεων 20 – 60 mgCukg<sup>-1</sup> Ξ.ΕΔ.

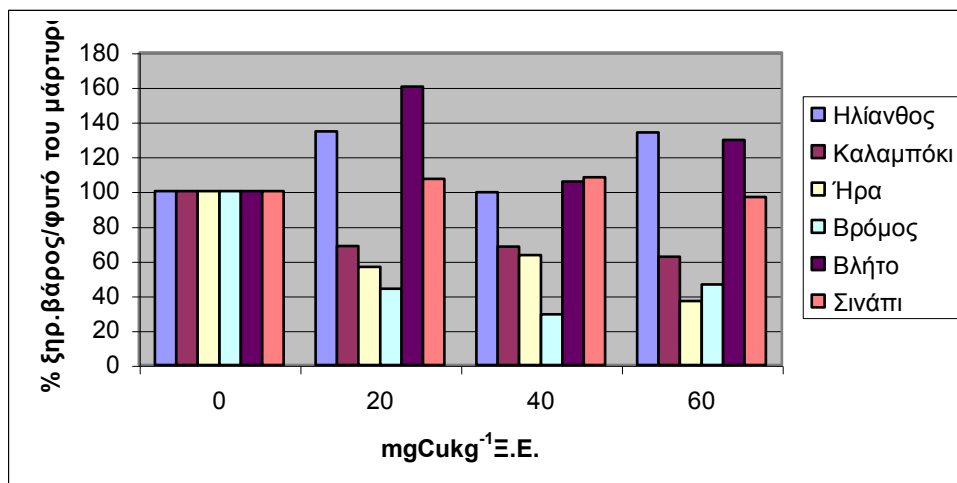
### 5.2.δ. Ξηρό βάρος ρίζας (pH = 8,3)

Το ξηρό βάρος του ριζικού συστήματος των διαφόρων ειδών παρουσίασε αντίδραση στην αύξηση της συγκέντρωσης του Cu στο έδαφος, όπως προκύπτει αντίστοιχα και στο χλωρό βάρος (Σχ.24).

Η μεγαλύτερη μείωση παρατηρήθηκε στον βρόμο, ενώ η μεγαλύτερη αύξηση στο βλήτο. Από την μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή προς την μεγαλύτερη θετική, τα φυτικά είδη κατατάσσονται στη σειρά: βρόμος > ήρα > καλαμπόκι > σινάπι > ηλίανθος > βλήτο.

Μείωση μεγαλύτερη από 20% σε σχέση με τον μάρτυρα δεν παρατηρήθηκε σε όλα τα φυτικά είδη με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος. Σε καμία επέμβαση στον ηλίανθο, το βλήτο και το σινάπι δεν παρατηρήθηκε τέτοια

μείωση. Αντίθετα, στην περίπτωση του καλαμποκιού, της ήρας και του βρόμου μείωση μεγαλύτερη από 80% εμφανίστηκε στις επεμβάσεις 20, 40 και 60 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.



**Σχ. 24 Ξηρό βάρος της ρίζας των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού στον αγρό (pH=8,3)**

Στον πίνακα 29, παρουσιάζονται οι μέσοι όροι του ξηρού βάρους της ρίζας των φυτών σε σχέση με τις επεμβάσεις χαλκού που χρησιμοποιήθηκαν και από τον οποίο φαίνεται ότι η ήρα, το βλήτο και το σινάπι δεν έδωσαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές.

Στον ηλίανθο, ο μάρτυρας δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά από την επέμβαση 40 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ. Μη στατιστικώς σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε και μεταξύ των επεμβάσεων 20 – 40 mgCu<sub>kg</sub><sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.

**Πίν.29 Ξηρό βάρος ριζικού συστήματος καλλιεργούμενων ειδών και ζιζανίων σε διάφορες συγκεντρώσεις Cu στον αγρό (pH = 8,3)**

Συγκέντρωση mgCu <sub>kg</sub> <sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.	Καλλιεργούμενα είδη			Ζιζάνια		
	ηλίανθος	καλαμπόκι	ήρα	βρόμος	βλήτο	σινάπι
	mg					
0	161	243	228	404	270	131
20	217	166	162	177	430	140
40	160	166	182	118	283	142
60	215,33	152	106	187	350	127
F- test	***	*	ns	**	ns	Ns
LSD <sub>0,05</sub>	17	52	-	128	-	-
CV%	5	14	27	29	18	47

\* Επίπεδο σημαντικότητας 5%, \*\* Επίπεδο σημαντικότητας 1%, \*\*\* Επίπεδο σημαντικότητας 0,1%

Στο καλαμπόκι, ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά από όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις, ενώ μη στατιστικώς σημαντικά διέφεραν οι επεμβάσεις 20 - 60 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.

Στον βρόμο, ο μάρτυρας διέφερε στατιστικώς σημαντικά από όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις, ενώ μη στατιστικώς σημαντικά διέφεραν οι επεμβάσεις 20 - 60 mgCu kg<sup>-1</sup> Ξ.Ε.Δ.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της διατριβής αυτής ήταν η εξέταση έξι (6) φυτικών ειδών (δύο καλλιεργούμενων και τεσσάρων ζιζανίων) για την ικανότητά τους να αντεπεξέλθουν σε ένα σύστημα φυτοαποκατάστασης εδαφών επιβαρημένων με το βαρύ μέταλλο χαλκό (Cu).

Στα εργαστηριακά πειράματα που διεξήχθησαν σε όξινο έδαφος (pH=4,6) φαίνεται ότι το σινάπι είχε την μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή σε σχέση με τον μάρτυρα με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος, στα περισσότερα από τα χαρακτηριστικά που μελετήθηκαν. Συγκεκριμένα στο χλωρό και ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος του φυτού και της ρίζας, στο ύψος και στην τιμή του SPAD στο 3<sup>ο</sup> φύλλο.

Σημαντική μείωση του χλωρού βάρους του υπέργειου και υπόγειου τμήματος του φυτού παρατηρήθηκε σε συγκέντρωση χαλκού στο έδαφος  $\geq 40 \text{ mgCu kg}^{-1}$  Ξ. ΕΔ. Παρά την ισχυρή επίδραση του χαλκού στην ανάπτυξη του φυτού, η συγκέντρωση του τελευταίου μέσα στο φυτό ήταν πολύ μικρή σε σχέση με τα υπόλοιπα φυτικά είδη.

Αντίθετα με το σινάπι, τα φυτικά είδη βρόμος και καλαμπόκι, ήταν αυτά που παρουσίασαν την μικρότερη αρνητική μεταβολή σε σχέση με τον μάρτυρα από την επίδραση της αύξησης της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος. Συγκεκριμένα, ο βρόμος είχε την μικρότερη αρνητική μεταβολή σε σχέση με τον μάρτυρα στα υπό εξέταση χαρακτηριστικά, χλωρό και ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος και ρίζας του φυτού και στο ύψος, ενώ το καλαμπόκι, το εμβαδόν και η τιμή SPAD στο 3<sup>ο</sup> φύλλο. Σημαντική μείωση, μεγαλύτερη από 20% σε σχέση με τον μάρτυρα για τον βρόμο και το καλαμπόκι παρατηρήθηκε σε συγκεντρώσεις χαλκού μεγαλύτερες από 10 ppm.

Το καλαμπόκι ήταν αυτό που είχε την μεγαλύτερη συγκέντρωση χαλκού στην ρίζα του και η οποία αυξάνονταν όσο αυξάνονταν και η συγκέντρωση του χαλκού στο έδαφος. Αντίθετα, η μεγαλύτερη συγκέντρωση χαλκού στο υπέργειο τμήμα του φυτού παρατηρήθηκε στην ήρα. Στην ήρα σημαντική μεταβολή στο χλωρό και ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος του φυτού μεγαλύτερη από 20% σε σχέση με τον μάρτυρα παρατηρήθηκε σε συγκεντρώσεις χαλκού στο έδαφος μεγαλύτερες από 10 ppm. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά που μελετήθηκαν για αυτό το φυτικό είδος δεν

παρουσίασαν κάποια ιδιαίτερη υπεροχή από τα χαρακτηριστικά των υπολοίπων φυτικών ειδών.

Τα υπόλοιπα φυτικά είδη δεν παρουσίασαν κάποιο σημαντικό ενδιαφέρον σε σχέση με την επίδραση του χαλκού στην ανάπτυξή τους. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση χαλκού στα φυτικά είδη και η αντίστοιχη συγκέντρωση χαλκού στο έδαφος παρουσιάζεται παρακάτω:

Η σειρά από την μεγαλύτερη προς την μικρότερη συγκέντρωσης Cu στα φυτά και η αντίστοιχη συγκέντρωση Cu στο έδαφος ήταν για το υπέργειο τμήμα: ήρα,  $0,465 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηράς μάζας στην επέμβαση  $120 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηρού εδάφους, ηλίανθος,  $0,201 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηράς μάζας στην επέμβαση  $200 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηρού εδάφους, βρόμος,  $0,08 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηράς μάζας στην επέμβαση  $200 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηρού εδάφους, καλαμπόκι,  $0,062 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηράς μάζας στην επέμβαση  $200 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηρού εδάφους, σινάπι,  $0,04 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηράς μάζας στην επέμβαση  $40 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηρού εδάφους και βλήτο,  $0,045 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηράς μάζας στην επέμβαση  $120 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηρού εδάφους

Για την ρίζα: καλαμπόκι,  $3,11 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηράς μάζας στην επέμβαση  $200 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηρού εδάφους, ήρα,  $1,64 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηράς μάζας στην επέμβαση  $120 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηρού εδάφους, ηλίανθος,  $0,91 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηράς μάζας στην επέμβαση  $200 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηρού εδάφους, βρόμος,  $0,61 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηράς μάζας στην επέμβαση  $200 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηρού εδάφους, βλήτο,  $0,42 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηράς μάζας στην επέμβαση  $120 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηρού εδάφους και σινάπι,  $0,16 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηράς μάζας στην επέμβαση  $40 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηρού εδάφους.

Στα εργαστηριακά πειράματα που διεξήχθησαν σε αλκαλικό έδαφος (pH=8,3), φαίνεται ότι το βλήτο παρουσιάζει την μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή σε σχέση με τον μάρτυρα, σε όλα τα χαρακτηριστικά που μελετήθηκαν, με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος. Σημαντική μείωση στο χλωρό και ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος και της ρίζας του φυτού σε σχέση με τον μάρτυρα (>20%) παρατηρήθηκε σε όλες τις επεμβάσεις.

Αντίθετα, στο καλαμπόκι παρατηρήθηκε η μικρότερη αρνητική μεταβολή σε σχέση με τον μάρτυρα, με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος και ιδιαίτερα στο χλωρό και ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος του φυτού, στο ύψος και το εμβαδόν του 3<sup>ου</sup> φύλλου. Όσον αφορά το χλωρό και ξηρό βάρος της ρίζας και της τιμής SPAD στο 3<sup>ο</sup> φύλλο, τα φυτικά είδη που παρουσίασαν την μικρότερη



αρνητική μεταβολή σε σχέση με τον μάρτυρα είναι το σινάπι και ο βρόμος αντίστοιχα.

Για την συγκέντρωση του χαλκού στα φυτά, μελετήθηκαν τα ζιζάνια βρόμος και ήρα, όπου και αποδείχθηκε ότι η ήρα έχει την ικανότητα να απορροφά και να συγκρατεί μεγαλύτερη ποσότητα χαλκού τόσο στο υπέργειο τμήμα του φυτού, όσο και στην ρίζα σε σχέση με τον βρόμο.

Η μεγαλύτερη συγκέντρωση χαλκού που μετρήθηκε στην ήρα και τον βρόμο και η αντίστοιχη συγκέντρωση του χαλκού στο έδαφος όπου και παρατηρήθηκε ήταν, για το υπέργειο τμήμα: ήρα,  $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηράς μάζας στην επέμβαση  $200 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηρού εδάφους και στον βρόμο,  $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηράς μάζας στην επέμβαση  $200 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηρού εδάφους. Για την ρίζα: ήρα,  $0,68 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηράς μάζας στην επέμβαση  $200 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηρού εδάφους και για τον βρόμο,  $0,4 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηράς μάζας στην επέμβαση  $200 \text{ mgCu kg}^{-1}$  ξηρού εδάφους.

Τα υπόλοιπα φυτικά είδη δεν παρουσίασαν μία σταθερή μεταβολή των χαρακτηριστικών τους σε σχέση με την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος.

Στο πείραμα αγρού (εδαφικό pH = 8,3), φαίνεται ότι η ήρα παρουσίασε την μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή σε σχέση με τον μάρτυρα στο χλωρό και ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος των φυτών. Σημαντική επίδραση, μεγαλύτερη από 20% σε σχέση με τον μάρτυρα παρατηρήθηκε σε συγκέντρωση χαλκού στο έδαφος μεγαλύτερη από 40 ppm.

Στην περίπτωση του ηλιάνθου, η αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος είχε θετική επίδραση στην ανάπτυξη των φυτών σε σχέση με τον μάρτυρα, έως την συγκέντρωση των 60 ppm Cu, όπου και μελετήθηκε.

Η επίδραση της αύξησης της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος είχε τα ίδια αποτελέσματα και στο χλωρό και ξηρό βάρος της ρίζας των φυτικών ειδών.

Γενικά στο πείραμα αγρού, τα ζιζάνια ήταν αυτά που δέχτηκαν τις μεγαλύτερες αρνητικές συνέπειες από την αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος.

Συμπερασματικά, τα μεγάλα CV που προέκυψαν από τους πίνακες Ανάλυσης Παραλλακτικότητας, οφείλονται κυρίως στις συνθήκες του πειραματισμού και στο μεγάλο εύρος τιμών μεταξύ των επεμβάσεων και των επαναλήψεων αυτών. Έτσι, αν και το υψηλό CV δείχνει εν μέρει μειωμένη πειραματική ακρίβεια, εν τούτοις γίνονται φανερές οι κύριες επιδράσεις του παράγοντα Cu.

Στο όξινο έδαφος (pH = 4,6), από τα φυτικά είδη που μελετήθηκαν αυτά που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε ένα πρόγραμμα φυτοαποκατάστασης είναι η ήρα και ο ηλίανθος (το σινάπι αν και είχε την μικρότερη αρνητική μεταβολή σε σχέση με τον μάρτυρα, δεν απορροφά μεγάλη ποσότητα χαλκού και δεν αναπτύσσεται σε συγκέντρωση χαλκού στο έδαφος μεγαλύτερη από 40 ppm). Στο αλκαλικό έδαφος (pH= 8,3), το καλαμπόκι και ο ηλίανθος, ήταν αυτά τα φυτικά είδη που παρουσίασαν τέτοια συμπεριφορά ώστε να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν σε ένα πρόγραμμα φυτοαποκατάστασης εδαφών επιβαρημένων με χαλκό . Στον αγρό (εδαφικό pH = 8,3), ο ηλίανθος ήταν αυτός που είχε την καλύτερη συμπεριφορά, αφού η αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού στο έδαφος έως τα 60 ppm είχε ως συνέπεια την μεγαλύτερη ανάπτυξη των φυτών.

## Βιβλιογραφία

- Arteaga S, Chianelli R., Gardea-Torresdey J., Graham G. and Pickering I., 1998. Use of XAS to Determine Copper Uptake by *Larrea tridentata* Utilizing Hydroponics. 1998 SSRL Activity Report
- Baker, A.J.M., Reeves R.D., and McGrath S.P., 1991. In situ decontamination of heavy metal polluted soils using crops of metal accumulating plants - A feasibility study. pp. 600-605. In R.E. Hinchee and R.F. Oflenbuttel, eds., In Situ Bioreclamation: Applications and Investigations for Hydrocarbon and Contaminated Site Remediation. Battelle Memorial Institute, Columbus, OH. Butterworth-Heinemann. Boston, MA.
- Banks, M.K, Fiorenza, S., Oubre, C.L., & Ward, C.H., 2000. Phytoremediation of Hydrocarbon-contaminated Soil. Boca Raton, FL: Lewis Publishers.
- Baumann, A., 1885. Das verhalten von zinksätzen gegen pflanzen und imboden Landwirtsch.
- Bennett, L.E., Burkhead, J.L., Hale, K.L., Terry, N., Pilon, M., Pilon – Smits, E.A.H., 2003. Analysis of transgenic Indian mustard plant for phytoremediation of metal – contaminated mine tailings. J. Environ. Qual. 32 : 432 – 440.
- Bigaliev A.B., Boguspaev K., Znanburshin. E.T. Phytoremediation Potential Of *Amaranthus sp.* for Heavy Metals Contaminated Soil of Oil Producing Territory.
- Blaylock M, Huang J, 2000. Phytoextraction of Metals. In: Raskin I, Ensley B, eds Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment. Wiley Interscience, New York. pp 53-70
- Bluskov S., Arocena J. M., Omotoso O. O., J. P. Young, 2005. Uptake, Distribution, and Speciation of Chromium in *BRASSICA JUNCEA*. International Journal of Phytoremediation, 7:153–165, 2005
- Brooks, R R; Morrison, R S; Reeves, R D; Dudley, T R; Akman, Y , 1979. Hyperaccumulation of nickel by *Alyssum Linnaeus*, Cruciferae Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological

Character. Royal Society, Great Britain Volume 203, Issue 1153 , January 15, 1979, Pages 387-403

- Brooks, R.R., J. Lee, R.D. Reeves, and Jaffre. T., 1977. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. *J. Geochem. Explor.* 7:49-57.
- Brooks, R.R., Reeves R.D., Morrison R.S., and Malaisse F., 1980. Hyperaccumulation of copper and cobalt - α review. *Bulletin Societe Royale Botanique Belgique.* 113:166-172.
- Cavallaro, N., and McBride M.B., 1978. Copper and Cadmium Adsorption Characteristics of Selected Acid Calcareous Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J* 42: 550-556.
- Chaney Rufus L., Malik Minnie, Li Yin M., Brown Sally L., Brewer Eric P., Scott Angle J. and Baker Alan J.M., 1997. *Phytoremediation of Soil Metals.*
- Chaney, R.L., 1983. Plant uptake of inorganic waste constituents. In J.F. Parr, P.B. Marsh, and J.M. Kia, eds., *Land Treatment of Hazardous Waste*, pp. 50-76. Noyes Data Corporation, Park Ridge, NJ.
- Chen H. και Cutright T., 2001. EDTA and HEDTA effects on Cd, Cr, and Ni uptake by *Helianthus annuus*. *Chemosphere* , 45,21-28
- Chen Y. X., Q. Lin, Y. M. Luo, Y. F. He, S. J. Zhen, Y. L. Yu, G. M. Tian and M. H. Wong, 2003. The role of citric acid on the phytoremediation of heavy metal contaminated soil. *Chemosphere* 50,807-811
- Chen Y., Shen Z. and Xiangdong L., 2004. The use of vetiver grass, *Vetiveria zizanioides* in the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. *Applied Geochemistry* , 19,1553-1565
- Chiou, C.T., 2002. *Partition and Adsorption of Organic Contaminants in Environmental Systems.* Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
- Christensen-Kirsh, K.M., 1996. *Phytoremediation and wastewater effluent disposal: Guidelines for landscape planners and designers.* Unpublished master's project, Department of Landscape Architecture, University of Oregon, Eugene.

- Ciura J., Poniedzialek M., Skara A., Jdrszczyk E., 2005. The Possibility of Using Crops as Metal Phytoremediants. Polish Journal of Environmental Studies 14,17-22
- Clemente R., Concepción A. and Pilar M., 2005. A remediation strategy based on active phytoremediation followed by natural attenuation in a soil contaminated by pyrite waste .
- Cox S., 2000. Mechanisms and Strategies for Phytoremediation of Cadmium. <http://lamar.colostate.edu/~samcox/pH.html>
- Davis RD, Carlton-Smith CN., 1980. Water Research Center. Stevenage, Tech. Rep. p. 140.
- Dimitriou I., Eriksson J., Adler A., Aronsson P. and Verwijst T., 2006. Fate of heavy metals after application of sewage sludge and wood–ash mixtures to short-rotation willow coppice. Environmental Pollution 142,160-169
- Doucette, W.J., Bugbee, B.G, Smith, S.C., Pajak, C.J., & Ginn, J.S., 2003. Phytoremediation: Transformation and control of Contaminants., pp. 561-588. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, Inc. In McCutcheon, S.C., & Schnoor, J.L., Eds.,
- Dzantor, E.K, & Beauchamp, R.G., 2002. Phytoremediation, Part I: Fundamental basis for the use of plants in remediation of organic and metal contamination. Environmental Practice: Journal of the National Association of Environmental Professionals, 4, 77-87.
- Ellen A., 2005, Phytoremediation. Critical Reviews in Plant Sciences, 24: 109 – 122
- Ernst W.H.O., 1996. Bioavailability of heavy metals and decontamination of soils by plants. Applied *Geochemistry*, 11,163-167, Elsevier Science Ltd
- Everhart J. L., McNear D. Jr., Peltier E., Van der Lelie D., Chaney R. L. and Sparks D. L., 2006. Assessing nickel bioavailability in smelter-contaminated soils. Science of The Total Environment
- Freeman J.L, Persans M.W., Nieman K, Albrecht C, Peer WA, Pickering I.J., Salt D.E., 2004. Increased glutathione biosynthesis plays a role in nickel tolerance in *Thlaspi* nickel hyperaccumulators. Plant Cell 16:2176-2191

- Fritoff, A., & Greger, M., 2003. Aquatic and terrestrial plant species with potential to remove heavy metals from stormwater. *International Journal of Phytoremediation*, 5, 211.
- Gardea-Torresdey J.L., Tiemann K.J., Gonzaleza J.H., Henningb J.A., Townsends M.S., 1995. Ability of silica-immobilized *Medicago sativa*, alfalfa, to remove copper ions from solution. *Journal of Hazardous Materials* 48,181-190
- Grjčman H., Velikonja-Bolta Š., Vodnik D., Kos B. & Leštan D., 2001, EDTA enhanced heavy metal phytoextraction: metal accumulation, leaching and toxicity. *Plant and Soil* 235: 105–114, 2001.
- Hall J.L., 2002 Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *J Exp Bot* 53:1-11
- Harter, R. D., 1979. Absorption of Copper and Lead by Ap and B<sub>2</sub> Horizons of Several Northeastern United States Soils. *Soil Sci. Am. J.* 43: pp 679.
- He QB, Singh BR., 1994. *Water, Air and Soil Pollution* 74: 251.
- James, R. O., and Barrow N. J., 1981. In *Copper in Soils and Plants*. Loneragan. J. F., Robson, A.D. and R. D. Grahameds. Academic press. New York. pp 47-68.
- Johansson L., Xydas C., Messios N., Stoltz E. and Greger M., 2004. Growth and Cu accumulation by plants grown on Cu containing mine tailings in Cyprus . *Applied Geochemistry* 20,101-107
- Kukier, U., Peters, C., Chaney, R., Angle, J., Roseberg, R., 2004. The Effect of Ph on Metal Accumulation in Two Alyssum Species. *Journal of Environmental Quality*. 32:2090-2102.
- Kupper H, Lombi E, Zhao FJ, McGrath SP, 2000. Cellular compartmentation of cadmium and zinc in relation to other elements in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Planta* 212:75-84
- Kupper H, Zhao F, McGrath SP, 1999 Cellular compartmentation of zinc in leaves of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant Physiol* 119:305-311

- Lesage E. and Meers E., 2005. Enhanced Phytoextraction: II. Effect Of Edta And Citric Acid On Heavy Metal Uptake By *Helianthus Annuus* From A Calcareous Soil. *International Journal of Phytoremediation*, 7:143–152
- Liu DH, Jiang WS, Hou WQ, 2001. Uptake and accumulation of copper by roots and shoots of maize, *Zea mays L*, *J. Environ Sci, China*. 13:228-32.
- Loneragan, J. F., 1981. Distribution and Movement of Copper in Plants, in eds. Loneragan. J. F., Robson, A.D. and Graham, R. D. *Copper in Soils and Plants*. Academic Press. New York. pp: 109.
- Luo C. , Zhenguo S. and Xiangdong L., 2005. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS. *Chemosphere* , 59,1-11
- McCutcheon, S.C., & Schnoor, J.L., Eds., 2003. *Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, Inc.
- McGrath S.P., F.J. Zhao & E. Lombi, 2001. Plant and rhizosphere processes involved in phytoremediation of metal-contaminated soils. *Plant and Soil* 232: 207–214, 2001.
- McGrath, S.P., and J. Cegarra, 1992. Chemical Extractability of Heavy Metals During and After Long - Term Applications of Sewage Sludge to Soil. *Journal of Soil Science*. 43 : 313-321.
- Meharg A, Macnair M, 1992a. A Genetic correlation between arsenate tolerance and the rate of influx of arsenate and phosphate in *Holcus lanatus L*. *Heredity* 69:336-341
- Meharg A, Macnair M, 1992b. Suppression of the high-affinity phosphate-uptake system - a mechanism of arsenate tolerance in *Holcus lanatus L*. *J Exp Botany* 43:519-524
- Minguzzi, C., and Vergnano O., 1948. Il contenuto di nichel nelli ceneri di *Alyssum bertlonii* Desk. *Att. dells Society Tocsin di Science Naturali, Mem Ser A* 55:49-77.
- Ng B.H, Anderson JW, 1979. Light-dependent incorporation of selenite and sulphite into selenocysteine and cysteine by isolated pea chloroplasts. *Phytochemistry* 18:573-580
- Olson, P.E., Reardon, KF., & Pilon-Smits, E.A.H., 2003. Ecology of rhizosphere bioremediation. In McCutcheon, S.C., & Schnoor, J.L., Eds.,

Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants., pp. 317-353.  
Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, Inc.

- Panfili F., Manceau A., Sarret G., Spadini L., Kirpichtchikova T., Bert V., Laboudigue A., Marcus M. A., Ahamdach N. and Libert M.-F., 2005. The effect of phytostabilization on Zn speciation in a dredged contaminated sediment using scanning electron microscopy, X-ray fluorescence, EXAFS spectroscopy, and principal components analysis *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69,2265-2284
- Panwar B.S., Singh JP, Laura RD., 1999. Cadmium uptake by cowpea and mungbean as affected by Cd and P application. *Water, Air and Soil Pollution* 112: 163-169.
- Papadopoulos, P., and Rowell D.L, 1988. The Reactions of Copper and Zinc with Calcium Carbonate Surfaces. *Journal of Soil Science.* 39: 39-48.
- Pastor J., Hernández A.J., Prieto N, Mercedes F.P., 2003. Accumulating behaviour of *Lupinus albus*L. growing in a normal and a decalcified calcic luvisol polluted with Zn. *Journal of Plant Physiology* 160. 1457–1465
- Peer W.A., Baxter I.R., Richards E.L., Freeman J.L., Murphy A.G., .Phytoremediation and hyperaccumulator plants.
- Pickering I.J, Wright C, Bubner B, Ellis D, Persans MW, Yu EY, George GN, Prince RC, Salt DE, 2003 Chemical form and distribution of selenium and sulfur in the selenium hyperaccumulator *Astragalus bisulcatus*. *Plant Physiol* 131:1460-1467
- Pyatt F. B., 2001. Copper and Lead Bioaccumulation by *Acacia retinoides* and *Eucalyptus torquata* in Sites Contaminated as a Consequence of Extensive Ancient Mining Activities in Cyprus. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 50, 60-64
- Randle, K., and Harymann E. H., 1995. Applications of the Continious- Flow Stirred-Cell, CFSC Technique: II. The Adsorption Behaviour of Na, Cs, Sr, Cu, Ni and Pb on Humic Acids. *European Journal of Soil Science.*46: 303-315.
- Raskin, I, & Ensley B.D., 2000. *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean up the Environment.* New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.



- Reeves, R.D., 1992. The hyperaccumulation of nickel by serpentine plants. pp. 253-277. In A.J.M. Baker, J. Proctor, and R.D. Reeves, eds., *The Ecology of Ultramafic Serpentine Soils*. Intercept Ltd., Andover, Hants.
- Reeves, R.D., and Brooks R.R., 1983. European species of *Thlaspi* L., Cruciferae as indicators of nickel and zinc. *J. Geochem. Explor.* 18:275
- Robinson B. H., Brooks R. R., Gregg E. H. and Kirkman J. H., 1998. The nickel phytoextraction potential of some ultramafic soils as determined by sequential extraction. *Geoderma* 87,293-304
- Robinson B.H., Chiarucci A., Brooks R.R., Petit D., Kirkman J.H., Gregg P.E.H., De Dominicis V., 1997. The nickel hyperaccumulator plant *Alyssum bertolonii* as a potential agent for phytoremediation and phytomining of nickel. *Journal of Geochemical Exploration* 59, 75-86
- Sanders, J. R., and Broomfield C., 1980. The Influence of pH, Ionic Strength and Reactant Concentrations on Copper Complexing by Humified Organic Matter. *J. Soil Sci.* 31. pp 53.
- Schmidt, W., Bunzl K. and Sansoni B., 1976. Kinetics of Ion Exchange in Soil Organic Matter. IV. Adsorption and Desorption of  $Pb^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  and  $Ca^{2+}$  by Peat. *Journal of Soil Science.* 27: 32-41.
- Song J., Fang Z., Yong L., McGrath Steve P. and Zhang H, 2004. Copper uptake by *Elsholtzia splendens* and *Silene vulgaris* and assessment of copper phytoavailability in contaminated soils. *Environmental Pollution*, 128, 307-315
- Stern, KR., 2000. *Introductory Plant Biology.*, 8<sup>th</sup> ed.. Boston, MA: McGraw Hill.
- Subramanian, M., & Shanks, J.V., 2003. Role of plants in the transformation of explosives. In McCutcheon, S.C., & Schnoor, J.L., Eds., *Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants.*, pp. 389-408. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, Inc.
- Tandy S., Rainer S. and Bernd S., 2006. The influence of EDDS on the uptake of heavy metals in hydroponically grown sunflowers. *Chemosphere* Volume 62, 1454-1463
- Tiffin, L. O., 1972. Translocation of Microelements in Plants. In J. J. Mortvent, P. M. Giordano and W. L. Lindsay, eds.. *Micronutrients in*

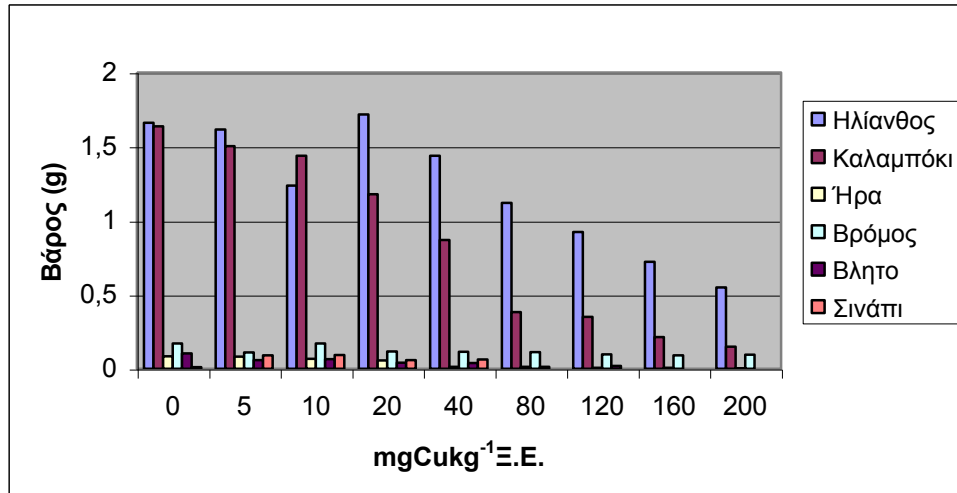
Agriculture. pp 199. Soil Science Society of America Inc. Madison. Wisconsin. USA.

- Turvey Nigel D. and Grant B. R., 1990. Copper deficiency in coniferous trees. *Forest Ecology and Management*, 37, 95-122, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam
- U.S. Environmental Protection Agency [US EPA]., 2000. Introduction to Phytoremediation., Publication No. 600/R-99/107. Cincinnati, OH.
- Utsunomia, T., 1980, Japanese Patent Application No 55-72959
- Van Huysen T, Terry N., Pilon-Smits EAH, 2004. Exploring the selenium phytoremediation potential of transgenic Indian Mustard overexpressing ATP sulfurylase or cystathionine-  $\gamma$ -synthase. *Int J Phytoremediation* 6:1-8
- Wang J, Evangelou VP, 1994. Metal tolerance aspects of plant cell walls and vacuoles. In: Pessaraki M, ed *Handbook of Plant and Crop Physiology*. Marcel Dekker, Inc, New York, pp. 695-717
- Wei C.Y., X. Sun, C. Wang and W.Y. Wang, 2006. Factors influencing arsenic accumulation by *Pteris vittata*: A comparative field study at two sites. *Environmental Pollution* Volume 141, Issue 3, June 2006, Pages 488-493
- Wu L.H., Li H., Luo Y.M. & Christie P., 2004. Nutrients can enhance phytoremediation of copper-polluted soil by Indian mustard. *Environmental Geochemistry and Health* 26: 331–335
- Xavier Q., Alastuey A, Moreno N, Alvarez-Ayuso E., García-Sánchez A., Cama J., Ayora C. and Simón M., 2006. Immobilization of heavy metals in polluted soils by the addition of zeolitic material synthesized from coal fly ash. *Chemosphere* 62, 171-180
- Xiaomei L., Qitang W., Banks M. K., 2005. Effect Of Simultaneous Establishment Of *Sedum Alfredii* And *Zea Mays* On Heavy Metal Accumulation In Plants. *International Journal of Phytoremediation*, 7:43–53
- Yanai J., Fang-Jie Z., McGrath S.P. and Kosaki T., 2006. Effect of soil characteristics on Cd uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Environmental Pollution*, 139, 167-175
- Yang Xiao-E., Peng H.Y., Jiang L.Y. και He Z.L., 2002. Phytoextraction Of Copper From Contaminated Soil By *Elsholtzia Splendens* As Affected By

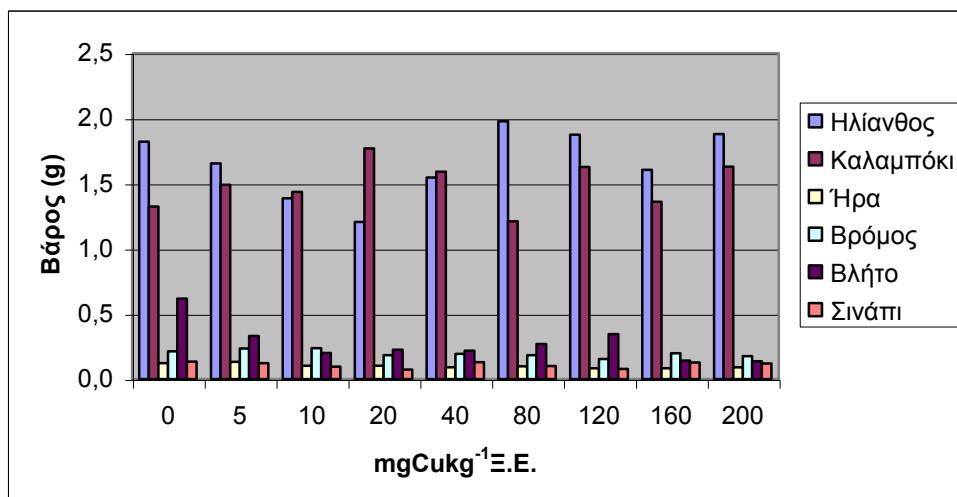
Edta, Citric Acid, And Compost. *International Journal of Phytoremediation*, 7, 69–83

- Zhang W., Yong C., Kelsey R. D. and Lena Q. Ma, 2004. Arsenic complexes in the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata*, Chinese brake fern. *Journal of Chromatography A* 1043, 249-254
- Λόλας, Π. Χ., 2001. Χρήση των ζιζανίων για φυτοαποκατάσταση εδαφών και νερών επιβαρυσμένων με ζιζανιοκτόνα ή βαρέα μέταλλα. *Περιοδικό Γεωπονικά: Μάρτιος – Απρίλιος 2001*, τεύχος 392
- Λόλας, Π. Χ., 2003. ΖΙΖΑΝΙΟΛΟΓΙΑ: ΖΙΖΑΝΙΑ-ZΙΖΑΝΙΟΚΤΟΝΑ. Τύχη και συμπεριφορά στο περιβάλλον. Εκδόσεις *Σύγχρονη Παιδεία*, σελ 588.
- Μήτσιος, Ι. Κ., 2004 Γονιμότητα εδαφών: Θρεπτικά στοιχεία φυτών και βαρέα μέταλλα. Εκδόσεις Zymed.
- Φωτιάδης Λ., 2006. Διερεύνηση της φυσιολογίας και της αποτελεσματικότητας ζιζανίων και καλλιεργούμενων ειδών στην φυτοαποκατάσταση. Δημοσίευτη διδακτορική Διατριβή που διεκπεραιώθηκε στο Εργαστήριο Ζιζανιολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

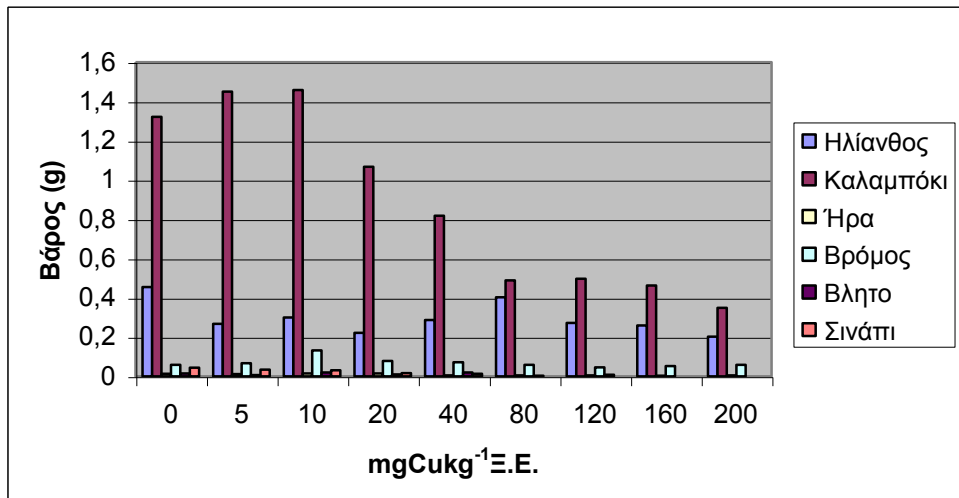
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



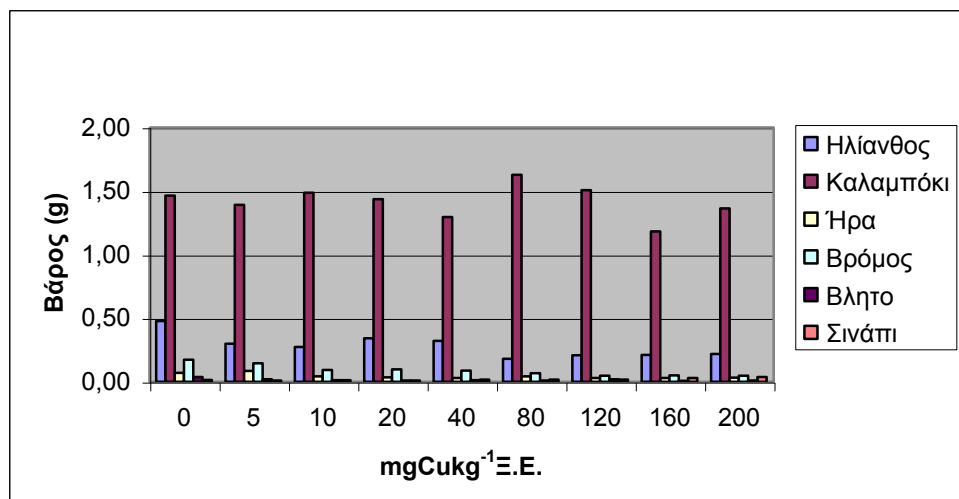
Σχ.1 Χλωρό βάρος του υπέργειου τμήματος των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε όξινο έδαφος (pH=4,6)



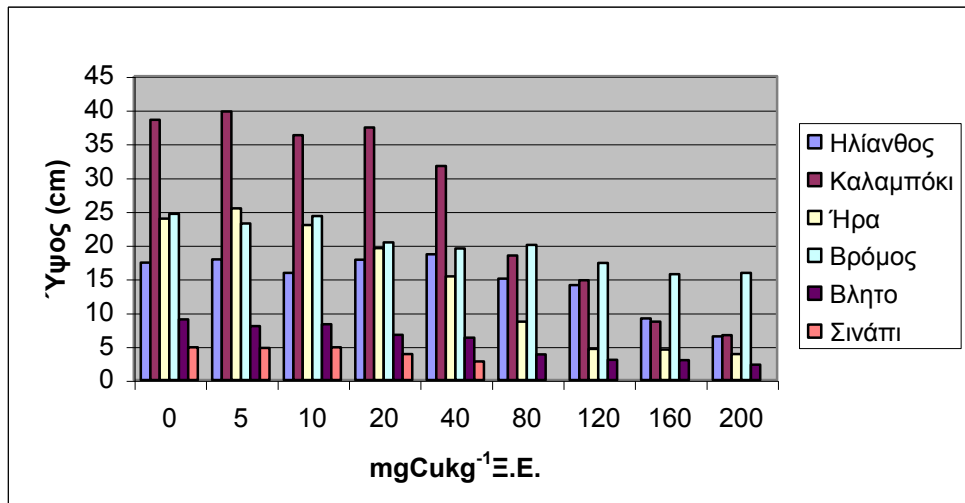
Σχ.2 Χλωρό βάρος του υπέργειου τμήματος των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε αλκαλικό έδαφος (pH=8,3)



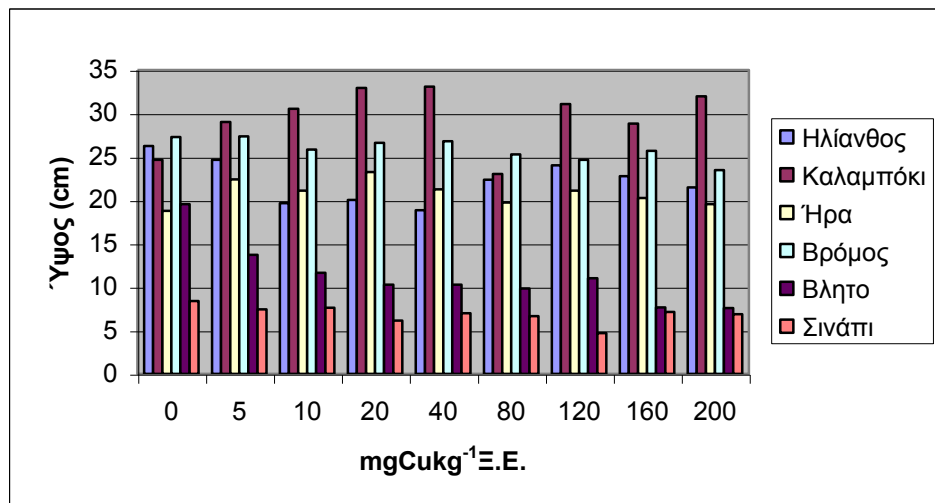
Σχ.3 Χλωρό βάρος της ρίζας των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε όξινο έδαφος (pH=4,6)



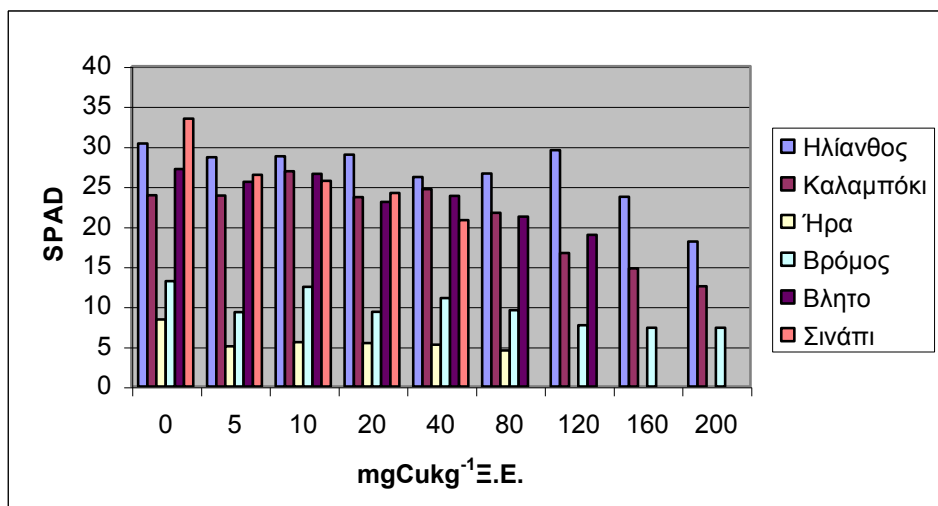
Σχ. 4 Χλωρό βάρος της ρίζας των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε αλκαλικό έδαφος (pH=8,3)



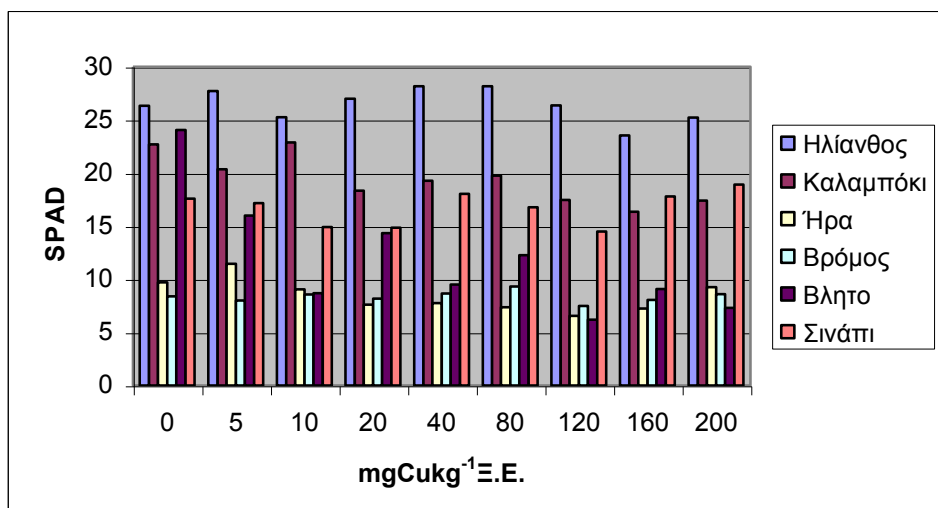
Σχ.5 Ύψος φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε όξινο έδαφος (pH=4,6)



Σχ.6 Ύψος φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε αλκαλικό έδαφος (pH=8,3)

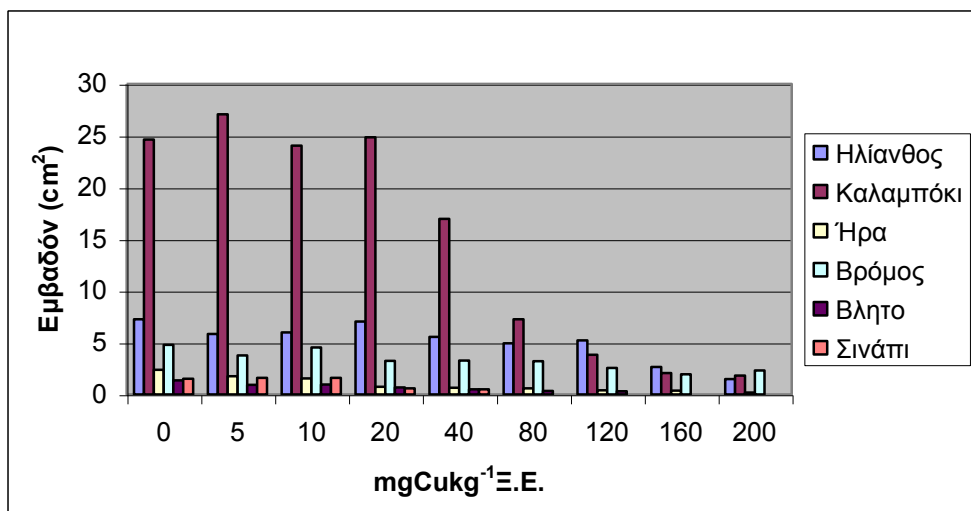


Σχ.7 Τιμή SPAD στο 3<sup>ο</sup> φύλλο των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε όξινο έδαφος (pH=4,6)

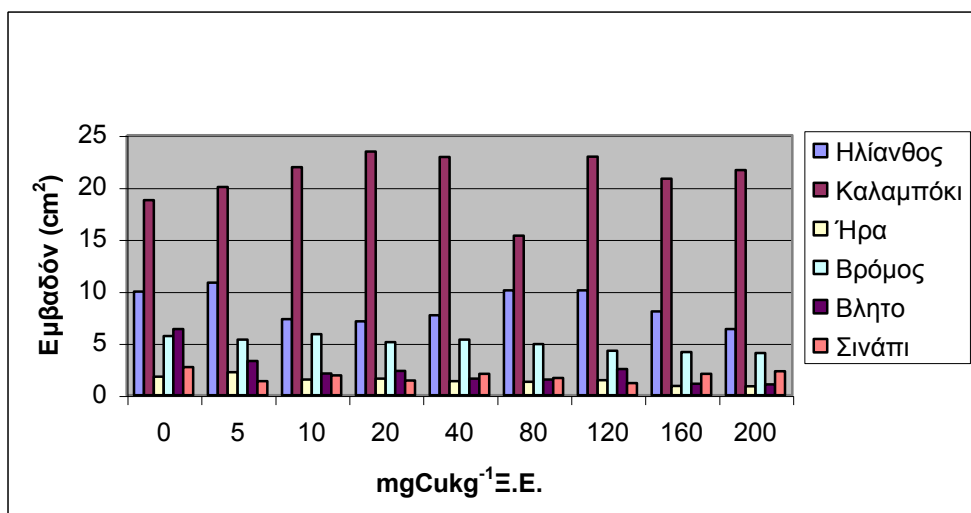


Σχ.8 Τιμή SPAD στο 3<sup>ο</sup> φύλλο των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε αλκαλικό έδαφος (pH=8,3)





Σχ.9 Εμβαδόν 3<sup>ου</sup> φύλλου των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε όξινο έδαφος (pH=4,6)



Σχ.10 Εμβαδόν 3<sup>ου</sup> φύλλου των φυτών σε διάφορες συγκεντρώσεις χαλκού σε αλκαλικό έδαφος (pH=8,3)

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ

ΗΛ011	Σ012	BP013	K014	HP015	ΒΛ016	ΒΛ021	HP022	K023	ΗΛ024	BP025	Σ026	K031	ΗΛ032	HP033	BP034	ΒΛ035	Σ036
BP111	K112	ΗΛ113	HP114	Σ115	ΒΛ116	ΗΛ121	HP122	K123	BP124	Σ125	ΒΛ126	ΗΛ131	K132	HP133	ΒΛ134	Σ135	BP136
ΗΛ211	ΒΛ212	HP213	Σ214	BP215	K216	HP221	Σ222	ΗΛ223	K224	ΒΛ225	BP226	BP231	ΒΛ232	K233	ΗΛ234	HP235	Σ236
K311	ΗΛ312	HP313	Σ314	BP315	ΒΛ316	HP321	ΒΛ322	Σ323	K324	ΗΛ325	BP326	ΒΛ331	BP332	ΗΛ333	HP334	K335	Σ336

Συγκεντρώσεις Cu : 0\*\* έχουμε 0 mgK<sup>-1</sup> εδάφους  
1\*\* έχουμε 20 mgK<sup>-1</sup> εδάφους  
2\*\* έχουμε 40 mgK<sup>-1</sup> εδάφους  
3\*\* έχουμε 60 mgK<sup>-1</sup> εδάφους

Καλλιέργειες: ΗΛ : ηλιάνθος  
HP : ήρα  
BP : βρώμος  
ΒΛ : βλίτο  
Κ : καλαμπόκι  
Σ : σινάπι

Μετρήσεις :

1. Ύψος
2. Φύλλα
3. SPAD
4. Φυλλική επιφάνεια
5. Νωπό – Ξηρό βάρος βλαστού
6. Νωπό – Ξηρό βάρος ρίζας
7. Συγκέντρωση Cu στο έδαφος
8. Συγκέντρωση Cu στον βλαστό - ρίζα

