



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
Π.Μ.Σ.: Περιβαλλοντική και Υγειονομική Μηχανική

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**“Φυτοεξυγίανση εδάφους από Cd και Pb με τα αλόφυτα:
Halimione portulacoides(L.) Aellen, *Tamarix parviflora* (DC) και
Limoniastrum monopetalum (L.) Boiss”**

Γαλανάκη Κοσμούλα

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:
Καθηγητής Καλογεράκης Ν. (επιβλέπων)
Καθηγητής Νικολαΐδης Ν.
Λέκτορας Παρανυχιανάκης Ν.

Χανιά 2011

Ευχαριστίες

Τελειώνοντας αυτή τη διπλωματική δεν μπορώ να μην ευχαριστήσω όλα τα άτομα που βοήθησαν, ο καθένας με τον τρόπο του, στην πραγματοποίησή της.

Καταρχήν, ευχαριστώ πολύ τον καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Καλογεράκη που μου εμπιστεύθηκε το θέμα της εργασίας, για τις συμβουλές και την οικονομική ενίσχυση όλο αυτό το χρονικό διάστημα. Επίσης τον κ. Νικολαΐδη και τον κ. Παρανυχιανάκη που δέχτηκαν να είναι στην εξεταστική επιτροπή και να αξιολογήσουν την παρούσα εργασία.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Ελένη Μανουσάκη για τη βοήθεια στο στήσιμο του πειράματος, τις συμβουλές, την καθοδήγηση και την όλη συνεργασία.

Δεν μπορώ να παραλείψω να ευχαριστήσω το προσωπικό του εργαστηρίου εδαφολογίας και φυλλοδιαγνωστικής του Μεσογειακού Αγρονομικού Ινστιτούτου Χανίων (MAICH) για τη χρήση του εργαστηρίου και τη βοήθεια, όπως και το προσωπικό από τη μονάδα διατήρησης μεσογειακών φυτών για την χρήση της υδρονέφωσης, το βοτανικό μουσείο (Herbarium) και τις συμβουλές και ιδιαίτερα την Η. Ρεμούνδου για τη συλλογή του φυτού *Limoniastrum monopetalum* από τη νήσο Χρυσή.

Τέλος ευχαριστώ την Saru Maria-Liliana για τις μετρήσεις των μετάλλων στο ICP-MS και τους Α. Σπανουδάκη και Κ. Χρύσανθο για τη βοήθεια στην συλλογή του χώματος για τις γλάστρες του πειράματος και τη μεταφορά τους στο θερμοκήπιο.

Περίληψη

Η φυτοσυσσώρευση είναι μία συνήθης μέθοδος φυτοεξυγίανσης που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων από το έδαφος. Στην πράξη, φυτά που συσσωρεύουν τα μέταλλα φυτεύονται στο ρυπασμένο έδαφος και καλλιεργούνται σύμφωνα με τις συμβατικές καλλιεργητικές τεχνικές. Τα φυτά αυτά απορροφούν τα μέταλλα από το έδαφος και τα συσσωρεύουν στους ιστούς τους. Έπειτα τα φυτά κόβονται και απομακρύνονται συνεπάγοντας έτσι την μόνιμη απομάκρυνση και των βαρέων μετάλλων από το έδαφος. Η φυτοσυσσώρευση είναι μία μέθοδος φιλική προς το περιβάλλον και πολύ πιο οικονομική από τις συμβατικές μεθόδους.

Μία άλλη πολλά υποσχόμενη μέθοδος φυτοεξυγίανσης που έχει προταθεί πρόσφατα από το εργαστήριο Βιοχημικής Μηχανικής & Περιβαλλοντικής Βιοτεχνολογίας, του τμήματος Μηχανικών περιβάλλοντος, του Πολυτεχνείου Κρήτης, είναι η Φυτοέκκριση. Η μέθοδος αυτή βασίστηκε στην παρατήρηση ότι ορισμένα φυτικά είδη, ανθεκτικά στην υψηλή αλατότητα (Αλόφυτα), εκκρίνουν από τους αλαταδένες και τις αλατώδεις κύστες τους, εκτός από τα άλατα, και μέταλλα - μηχανισμός που πιθανόν αποτελεί μηχανισμό αποτοξίνωσης από τις υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα αφού μπορεί να συνδυαστεί με τη μέθοδο της φυτοσυσσώρευσης και μειώνει τη συχνότητα κοπής και απομάκρυνσης των φυτών, συνεπάγοντας έτσι χαμηλότερο κόστος και μικρότερο χρόνο αποκατάστασης του εδάφους.

Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια, το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας έχει στραφεί στη χρήση των Αλόφυτων λόγω της ανθεκτικότητας που παρουσιάζουν σε υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων και αλατότητας και συνεπώς και της προοπτικής για τη χρήση τους σε αλατούχα εδάφη που είναι πολλές φορές ρυπασμένα και με βαρέα μέταλλα, αλλά και σε ρυπασμένα μη αλατούχα εδάφη.

Επίσης, ιδιαίτερη περίπτωση αποτελεί η προσθήκη NaCl στο έδαφος, όπου σε πολλές περιπτώσεις φαίνεται ότι συμβάλλει στην αύξηση της συσσώρευσης των βαρέων μετάλλων από τα φυτά, σε ορισμένες περιπτώσεις σε αύξηση της μεταφοράς τους από τις ρίζες στο υπέργειο τμήμα τους όπως και σε αύξηση της έκκρισης τους από τις κύστες των φύλλων τους.

Στα πλαίσια αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής επιλέχθηκαν 3 μεσογειακά, αυτοφυή της Κρήτης είδη (*Halimione portulacoides*, *Tamarix parviflora*, *Limoniasrum*

monopetalum), έτσι ώστε η εργασία να συμβάλει στην προσαρμογή της τεχνικής της φυτοαποκατάστασης του εδάφους από μέταλλα στην περιοχή της Μεσογείου και πιο ειδικά στον ελληνικό χώρο. Επίσης επιλέχθηκαν αλόφυτα που διαθέτουν αλατώδεις αδένες ή αλατώδεις κύστες στα φύλλα τους, με στόχο την συμβολή στην ανάπτυξη της νέας μεθόδου της φυτοέκκρισης και του συνδυασμού της με τη φυτοσυσσωρευση.

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα διάρκειας 6 εβδομάδων σε ρυπασμένο με Cd και Pb έδαφος, σε συνδυασμό με διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Σκοπός ήταν ο χαρακτηρισμός της ανθεκτικότητας των φυτών στα μέταλλα, της ικανότητάς τους να τα συσσωρεύουν στους ιστούς τους και να τα εκκρίνουν από τα φύλλα τους, καθώς και της επίδρασης της εδαφικής αλατότητας στην ικανότητά τους αυτή. Συνοπτικά, μπορούμε από τα αποτελέσματα να συμπεράνουμε ότι πρόκειται για τρία, ανθεκτικά στο κάδμιο και στον μόλυβδο, αλόφυτα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τεχνική της φυτοσυσσωρευσης και της φυτοέκκρισης ή για συνδυασμό αυτών. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη NaCl στο έδαφος συνέβαλλε στην μετακίνηση των μετάλλων από τις ρίζες προς τα υπέργεια μέρη των φυτών σε πολλές περιπτώσεις, όπως και στην αύξηση της έκκρισης του Cd και του Pb από τα φύλλα τους. Επίσης αυτή η εργασία παρουσιάζει ενδείξεις ότι το είδος *Limoniastrum monopetalum* πρόκειται για έναν πιθανό *υπερσυσσωρευτή* του καδμίου κάτι που αξίζει περαιτέρω διερεύνηση.

Abstract

Phytoextraction is a standard method of Phytoremediation which involves the use of plants in removing metals from the soil into their above-ground biomass, which can be harvested using conventional agricultural techniques. Phytoextraction is a cost-effective and environmentally-friendly method.

Another promising method of phytoremediation, which has been recently proposed by the Biochemical Engineering & Environmental Biotechnology Laboratory of The Department of Environmental Engineering of The Technical University of Crete, is Phytoexcretion. This method is based on the observation that some plant species can excrete metals, in addition to salts, from their salt glands or salt bladders- a probable detoxification mechanism of the plants. Phytoexcretion has many benefits as it can be combined with phytoextraction resulting in a lower-cost than conventional techniques, and in less time for the restoration of the soil.

Furthermore, over the last years, the scientific communities has taken interest in the use of halophytes, as they present great tolerance in high concentrations of heavy metals and are able to survive and reproduce in environments with excessive salt concentrations and, consequently, can potentially be used in saline or non saline soils polluted with heavy metals.

Moreover, a matter of special interest is the addition of NaCl in the soil, which in many cases results in increasing the transfer of metals from the roots to the aerial tissues of the plants and in increasing the excretion of metals from the salt glands and bladders.

In this study, three Mediterranean, native plant species of Crete (*Halimione portulacoides*, *Tamarix parviflora*, *Limoniastrum monopetalum*), are investigated in order for the study to contribute to the application of the phytoremediation of soil from metals in the Mediterranean region and especially in Greece. Also, halophytes with salt glands and salt bladders have been selected with the aim of contributing to the novel method of phytoexcretion, as well as to phytoexcretion in combination with phytoextraction.

Over a period of six weeks, pot experiments were conducted with plants grown in soil polluted with Cd & Pb, and in different soil salinities. The aim of the study was the characterization of plant tolerance in metals, their capability to accumulate metals in their tissues and to excrete them through their excreting glands, as well as the influence of soil salinity in their ability to do so. Concisely, the results of the experiment have showed that all three plants are tolerant to lead and cadmium and can be used for phytoextraction and/or

phytoexcretion purposes. Also, it has been ascertained that the increased soil salinity results, in many cases, in an increased transfer of metals into the aerial parts of the plants and in an increased excretion of both metals from the leaves' surface. Furthermore, this study suggests that the species *Limoniastrum monopetalum* is a probable *hyperaccumulator* of Cd, something which deserves further investigation.

Περιεχόμενα

1 Κεφάλαιο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. Στόχοι και αντικείμενο μεταπτυχιακής διατριβής	3
2 Κεφάλαιο: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	
2.1. Τοξικά μέταλλα στο περιβάλλον	5
2.1.1. Πηγές βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον	5
2.1.2. Κάδμιο και μόλυβδος στον ελληνικό χώρο	6
2.1.3. Επιπτώσεις του Cd και του Pb στον άνθρωπο	9
2.1.4. Μορφές του Cd και του Pb στο έδαφος	10
2.1.5. Παράγοντες που επηρεάζουν την πρόσληψη του Cd και του Pb από τα φυτά	11
2.1.5.1. Εδαφικοί παράγοντες (αβιοτικοί)	11
2.1.5.2. Παράγοντες που σχετίζονται με το φυτό (βιοτικοί)	14
2.2. Αβιοτικές καταπονήσεις των φυτών	16
2.2.1. Καταπόνηση από βαρέα μέταλλα	16
2.2.1.1. Επιπτώσεις καταπόνησης από βαρέα μέταλλα στα φυτά	17
2.2.1.2. Μηχανισμοί αντιμετώπισης της καταπόνησης από βαρέα μέταλλα	19
2.2.2. Καταπόνηση αλατότητας στα φυτά	25
2.2.2.1. Επιπτώσεις υψηλής αλατότητας στα φυτά	25
2.2.2.2. Προσαρμογή των φυτών στην καταπόνηση από αλατότητα και μηχανισμοί αντιμετώπισης	27
2.3. Έκκριση βαρέων μετάλλων από τους αλαταδένες και τις κύστεις των φυτών	33
2.4. Φυτοεξυγίανση (Phytoremediation)	35
2.4.1. Φυτοσυσσώρευση (phytoextraction ή phytoaccumulation)	36
2.4.1.1. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φυτοσυσσώρευσης	40
2.4.2. Φυτοέκκριση (Phytoexcretion)	41
2.5. Χαρακτηριστικά των υπό εξέταση φυτών	43
2.5.1. <i>Tamarix parviflora</i> (De Candolle)	43
2.5.2. <i>Halimione portulacoides</i> (L.) Aellen	44
2.5.3. <i>Limoniastrum monopetalum</i> (L.) Boiss	46
2.6. Επιλογή των συγκεκριμένων φυτών	47
3 Κεφάλαιο: ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	50
3.1. Επιλογή των συγκεκριμένων πειραματικών συνθηκών	51
3.2. Προετοιμασία των φυτών	51
3.3. Κύριο πειραματικό μέρος	53
3.3.1. Πειραματικός σχεδιασμός	53
3.3.2. Έκθεση των φυτών στα μέταλλα	55
3.3.3. Μετρήσεις στα φυτά	56
3.3.3.1. Προσδιορισμός της ποσότητας Cd και Pb που εκκρίνεται στην επιφάνεια των φύλλων	56
3.3.3.2. Προσδιορισμός των παραμέτρων αύξησης	56
3.3.3.3. Προσδιορισμός της χλωροφύλλης	56
3.3.3.4. Προσδιορισμός της συγκέντρωσης Cd & Pb στο φυτικό ιστό	57
4 Κεφάλαιο: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	58
4.1. Υπό εξέταση φυτό: <i>Halimione portulacoides</i>	59
4.1.1. Συσσώρευση μετάλλων στον φυτικό ιστό	59
4.1.1.1. Κάδμιο	59
4.1.1.2. Μόλυβδος	62
4.1.2. Έκκριση Cd και Pb από τον υπέργειο φυτικό ιστό	66

4.1.3. Επίδραση των μετάλλων και της εδαφικής αλατότητας στα παραγωγικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά του φυτού <i>Halimione portulacoides</i>	68
4.1.4. Συνοπτικά αποτελέσματα για το φυτό <i>Halimione portulacoides</i>	71
4.2. Υπό εξέταση φυτό <i>Tamarix parviflora</i>	72
4.2.1. Συσσώρευση μετάλλων στον φυτικό ιστό.....	72
4.2.1.1. Κάδμιο.....	72
4.2.1.2. Μόλυβδος.....	75
4.2.2. Έκκριση Cd και Pb από τον υπέργειο φυτικό ιστό.....	78
4.2.3. Επίδραση των μετάλλων και της εδαφικής αλατότητας στα παραγωγικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά του <i>Tamarix parviflora</i>	80
4.2.4. Συνοπτικά αποτελέσματα για το φυτό <i>Tamarix parviflora</i>	83
4.3. Υπό εξέταση φυτό <i>Limoniastrum monopetalum</i>	84
4.3.1. Συσσώρευση μετάλλων στον φυτικό ιστό.....	84
4.3.1.1. Κάδμιο.....	84
4.3.1.2. Μόλυβδος.....	87
4.3.2. Έκκριση Cd και Pb από τον υπέργειο φυτικό ιστό.....	89
4.3.3. Επίδραση των μετάλλων και της εδαφικής αλατότητας στα παραγωγικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά του <i>Limoniastrum monopetalum</i>	91
4.3.4. Συνοπτικά αποτελέσματα για το φυτό <i>Limoniastrum monopetalum</i>	94
6 Κεφάλαιο: ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	96
6.1. Συνολικά συμπεράσματα για το φυτό <i>Halimione portulacoides</i>	97
6.2. Συνολικά συμπεράσματα για το φυτό <i>Tamarix parviflora</i>	98
6.3. Συνολικά συμπεράσματα για το φυτό <i>Limoniastrum monopetalum</i>	98
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	100

Περιεχόμενα Σχημάτων

Κεφάλαιο 2^ο.

Σχήμα 2.2.1. Η δομή της [γ -γλουταμυλκυστεϊνύλ] ₃ -γλυκίνης, μιας φυτοχηλατίνης.....	20
--	----

Κεφάλαιο 4^ο.

Σχήμα 4.1.1. Συγκέντρωση καδμίου (mg/kg ξηρού βάρους) στα υπέργεια μέρη και στις ρίζες του φυτού <i>H. portulacoides</i> που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.	60
---	----

Σχήμα 4.1.2. Συνολική συσσώρευση καδμίου στους φυτικούς ιστούς (μg) του <i>H. portulacoides</i> που καλλιεργήθηκε σε μη ρυπασμένο έδαφος και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	61
--	----

Σχήμα 4.1.3. Βιομάζα του <i>H. portulacoides</i> που καλλιεργήθηκε σε έδαφος μη ρυπασμένο και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	62
---	----

Σχήμα 4.1.4. Συγκέντρωση μολύβδου (mg/kg ξηρού βάρους) στα υπέργεια μέρη των φυτών (Α) και στις ρίζες (Β), του <i>Halimione portulacoides</i> που καλλιεργήθηκε σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	63
---	----

Σχήμα 4.1.5. Συνολική ποσότητα Pb (μg) στα υπέργεια μέρη (Α) και στις ρίζες (Β) του <i>H. portulacoides</i> που καλλιεργήθηκε σε έδαφος καθαρό και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	65
--	----

Σχήμα 4.1.6. Ποσό Cd (μg/g) που εκκρίνεται από τα φύλλα του <i>H. portulacoides</i> το οποίο καλλιεργήθηκε σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	67
--	----

Σχήμα 4.1.7. Ποσό Pb (μg/g) που εκκρίνεται από τα φύλλα του <i>H. portulacoides</i> το οποίο καλλιεργήθηκε σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	68
---	----

Σχήμα 4.1.8. Περιεχόμενη χλωροφύλλη (mg/g νωπού βάρους) στα φύλλα του <i>Halimione portulacoides</i> που καλλιεργήθηκε σε έδαφος καθαρό και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	69
---	----

Σχήμα 4.1.9. Περιεχόμενο σε νερό (%) του <i>H. portulacoides</i> που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	70
---	----

Σχήμα 4.2.1. Συγκέντρωση του καδμίου (mg/kg ξηρού βάρους) στα υπέργεια μέρη και τις ρίζες του <i>Tamarix parviflora</i> που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	73
Σχήμα 4.2.2. Συνολικό ποσό Cd (μg) στα φυτικά μέρη του <i>Tamarix parviflora</i> που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο έδαφος με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	74
Σχήμα 4.2.3. Συγκέντρωση του μολύβδου (mg/kg ξηρού βάρους) στα υπέργεια μέρη του <i>Tamarix parviflora</i> που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	75
Σχήμα 4.2.4. Συγκέντρωση του μολύβδου (mg/kg ξηρού βάρους) στις ρίζες του <i>Tamarix parviflora</i> που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	76
Σχήμα 4.2.5. Συνολικό ποσό (μg) Pb που συσσωρεύτηκε, κατά τη διάρκεια του πειράματος, στα υπέργεια μέρη (Α) και στις ρίζες (Β) του <i>Tamarix parviflora</i> το οποίο καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο έδαφος με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	77
Σχήμα 4.2.6. Ποσό Cd (μg/g) που εκκρίνεται από τα φύλλα του <i>Tamarix parviflora</i> το οποίο καλλιεργήθηκε σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	79
Σχήμα 4.2.7. Ποσό Pb (μg/g) που εκκρίνεται από τα φύλλα του <i>Tamarix parviflora</i> το οποίο καλλιεργήθηκε σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	80
Σχήμα 4.2.8. Περιεχόμενη χλωροφύλλη (mg/g νωπού βάρους) στα φύλλα του <i>Tamarix parviflora</i> που καλλιεργήθηκε σε έδαφος καθαρό και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	81
Σχήμα 4.2.9. Περιεχόμενο σε νερό (%) του <i>Tamarix parviflora</i> που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb, ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	82
Σχήμα 4.2.10. Βιομάζα του <i>Tamarix parviflora</i> που καλλιεργήθηκε σε έδαφος μη ρυπασμένο και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	83
Σχήμα 4.3.1. Συγκέντρωση του Cd (mg/kg ξηρού βάρους) στις ρίζες και στα υπέργεια μέρη του <i>Limoniastrum monopetalum</i> , που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο έδαφος με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb (ξηρού βάρους εδάφους), σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	86

Σχήμα 4.3.2. Συνολικό ποσό (μg) Cd που συσσωρεύτηκε, κατά τη διάρκεια του πειράματος, στους ιστούς του <i>Limoniastrum monopetalum</i> , το οποίο καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο έδαφος με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	86
Σχήμα 4.3.3. Συγκέντρωση του Pb (mg/kg ξηρού βάρους) στα υπέργεια μέρη (Α) και στις ρίζες (Β) του <i>Limoniastrum monopetalum</i> , που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο έδαφος με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb (ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	87
Σχήμα 4.3.4. Συνολικό ποσό (μg) Pb που συσσωρεύτηκε, κατά τη διάρκεια του πειράματος, στα υπέργεια μέρη (Α) και στις ρίζες (Β) του <i>Limoniastrum monopetalum</i> , το οποίο καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο έδαφος με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	88
Σχήμα 4.3.5. Ποσό Cd (μg) που εκκρίνεται από τα φύλλα του <i>Limoniastrum monopetalum</i> το οποίο καλλιεργήθηκε σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	90
Σχήμα 4.3.6. Ποσό Pb (μg) που εκκρίνεται από τα φύλλα του <i>Limoniastrum monopetalum</i> το οποίο καλλιεργήθηκε σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	91
Σχήμα 4.3.7. Περιεχόμενη χλωροφύλλη (mg/g νωπού βάρους) στα φύλλα του <i>Limoniastrum monopetalum</i> που καλλιεργήθηκε σε έδαφος καθαρό και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	92
Σχήμα 4.3.8. Περιεχόμενο σε νερό (%) του <i>Limoniastrum monopetalum</i> που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb, ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	93
Σχήμα 4.3.9. Βιομάζα του <i>Limoniastrum monopetalum</i> που καλλιεργήθηκε σε έδαφος μη ρυπασμένο και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες.....	93

Περιεχόμενα Πινάκων

Κεφάλαιο 2ο.

Πίνακας 1. Οριακές επιτρεπτές τιμές συγκεντρώσεων κάποιων βαρέων μετάλλων στο έδαφος, στην Ελλάδα.....	7
Πίνακας 2. Οριακές τιμές ποσοτήτων βαρέων μετάλλων που μπορούν να εισάγονται κατ' έτος στα καλλιεργημένα εδάφη με βάση ένα μέσο όρο 10 ετών (σε mg/ εκτάριο/ έτος).....	7
Πίνακας 3. Οι σημαντικότερες οικογένειες φυτών με περισσότερα από 10 ανθεκτικά στην υψηλή αλατότητα είδη	27

Κεφάλαιο 3^ο.

Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά του εδάφους που χρησιμοποιήθηκε στις γλάστρες του πειράματος.....	52
Πίνακας 5. Οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας καθώς και οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές τους, που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος, για κάθε χρονική περίοδο της ημέρας.....	53
Πίνακας 6. Ομάδες των φυτών του <i>Tamarix parviflora</i> και οι επεμβάσεις που πραγματοποιήθηκαν.....	54
Πίνακας 7. Ομάδες των φυτών του <i>Halimione portulacoides</i> και οι επεμβάσεις που πραγματοποιήθηκαν.....	54
Πίνακας 8. Ομάδες των φυτών του <i>Limoniasrum monopetalum</i> και οι επεμβάσεις που πραγματοποιήθηκαν.....	55

Περιεχόμενα Εικόνων

Κεφάλαιο 2^ο.

Εικόνα 1. Πιθανοί μηχανισμοί αποφυγής ή ανθεκτικότητας σε βαρέα μέταλλα.....	23
Εικόνα 2. Στρατηγικές των φυτών για την αντιμετώπιση των υψηλών συγκεντρώσεων μετάλλων στο έδαφος.....	24
Εικόνα 3. Αλατώδης αδένας στα φύλλα του είδους <i>Tamarix</i> (A) και εγκάρσια τομή του φύλλου του είδους <i>Atriplex spongiosa</i> με τις αλατώδεις κύστες (B).....	32
Εικόνα 4. Αλατούχοι αδένες του φυτού <i>Tamarix</i> , όπως εμφανίζονται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.....	33
Εικόνα 5. Σχηματική παράσταση των διαδικασιών που περιλαμβάνονται στην φυτοσυσσώρευση των μετάλλων από το έδαφος (τροποποιημένο από: Nascimento & Xing 2006).....	36
Εικόνα 6. Φυτό του <i>Tamarix parviflora</i> και τα φύλλα από φυτό του πειράματος, μετά την έκθεση στο αλάτι, όπου διακρίνονται οι κρύσταλλοι αλάτων που εκκρίνονται από τους αλαταδένες.....	43
Εικόνα 7. Το <i>Halimione portulacoides</i> στον υγροβιότοπο του κόλπου της Σούδας στα Χανιά.....	45
Εικόνα 8. Αλατώδης κύστη του <i>Halimione portulacoides</i> . Φαίνεται το μισχοειδές κύτταρο (Sc) και το κυστικό κύτταρο (Bc) σε μεγέθυνση 3000x και 1000x.....	46
Εικόνα 9. <i>Limoniastrum monopetalum</i> σε άνθιση στο φυσικό περιβάλλον και σε γλάστρα του πειράματος.....	47
Εικόνα 10. Φύλλο του <i>Limoniastrum monopetalum</i> από φυτό του πειράματος, στο οποίο διακρίνεται το αλάτι που εκκρίνεται από τους αλατώδεις αδένες.....	47
Εικόνα 11. Τα φυτά του πειράματος στο θερμοκήπιο.....	55
Εικόνα 12. Φύλλο του <i>Halimione portulacoides</i> του πειράματος, στο οποίο φαίνονται οι ουσίες και τα άλατα που εκκρίνονται από τις αλατώδεις κύστες.....	66
Εικόνα 13. Φύλλα του <i>Tamarix parviflora</i> , από φυτό του πειράματος, στα οποία διακρίνονται οι ουσίες και τα άλατα που εκκρίνονται από τους αλατώδεις αδένες.....	79
Εικόνα 14. Φύλλο του <i>Limoniastrum monopetalum</i> , από φυτό του πειράματος, στο οποίο φαίνονται οι εκκρίσεις των αλάτων και των άλλων ουσιών.....	89

1. Εισαγωγή

Η ρύπανση του περιβάλλοντος με βαρέα μέταλλα είναι ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα που απαιτεί μέγιστη προσοχή. Ως αποτέλεσμα της παγκόσμιας βιομηχανοποίησης η ρύπανση του εδάφους με τοξικά μέταλλα, όπως το κάδμιο και ο μόλυβδος, έχει επιταχυνθεί δραματικά. Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται για τον καθαρισμό του εδάφους όπως η απομόνωση, ο μηχανικός διαχωρισμός, η χημική επεξεργασία και το ξέπλυμα του εδάφους έχουν αποδειχτεί ότι είναι αποτελεσματικές μόνο σε μικρή κλίμακα, αποτελούν τεχνικές ex-situ και επιπρόσθετα απαιτούν ειδικό εξοπλισμό εργαστηρίου. Επιπλέον, εκτός από το μεγάλο κόστος που έχουν προκαλούν ζημιές στα χαρακτηριστικά του εδάφους και γενικά δεν είναι αποδεκτές από το ευρύ κοινό (Gardea-Torresdey et al. 2005). Έτσι, αναπτύχθηκε η τεχνολογία της “φυτοεξυγίανσης” (phytoremediation) η οποία αποτελεί μία οικονομικά αποδοτική “πράσινη” τεχνολογία που προσφέρει τα οφέλη μιας τεχνικής in-situ. Είναι περιβαλλοντικά βιώσιμη, δεδομένου ότι το έδαφος που προκύπτει δεν χαρακτηρίζεται από μείωση της γονιμότητάς του. Η φυτοεξυγίανση ως μέθοδος αποκατάστασης εδαφών ρυπασμένων με μέταλλα, τα τελευταία χρόνια, αποτελεί αντικείμενο έντονου ενδιαφέροντος του κοινού και της επιστημονικής κοινότητας (Gnaya et al. 2007, Μανουσάκη 2008, Jadia and Fulekar 2009).

Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας έχει στραφεί στη χρήση των αλόφυτων για την φυτοεξυγίανση του εδάφους. Τα αλόφυτα και τα φυτά που είναι ανθεκτικά στις υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων έχει γενικά παρατηρηθεί ότι διαθέτουν μηχανισμούς ανθεκτικότητας σε ένα μεγάλο εύρος αβιοτικών καταπονήσεων. Η ανθεκτικότητα στις υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων και στις υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, τουλάχιστον κατά ένα μέρος, βασίζονται σε κοινούς φυσιολογικούς μηχανισμούς (Manousaki & Kalogerakis 2011). Τα αλόφυτα λοιπόν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για την απομάκρυνση των μετάλλων από το έδαφος με τις μεθόδους της *φυτοσυσσώρευσης*, είτε για τη μείωση της κινητικότητάς τους και της βιοδιαθεσιμότητάς τους στο έδαφος με τις μεθόδους της *φυτοσταθεροποίησης*. Επιπλέον, η ικανότητα που παρουσιάζουν πολλά αλόφυτα να εκκρίνουν από τους αδένες τους τα περίσσεια άλατα και μαζί με αυτά και μέταλλα, τα καθιστά ενδιαφέροντα για έρευνα ως προς την χρήση τους για την εφαρμογή της *φυτοέκκρισης* μίας μεθόδου που έχει προταθεί ως μέθοδος φυτοεξυγίανσης πρόσφατα στην βιβλιογραφία (Kadukova et al. 2008, Manousaki et al. 2008).

Επίσης τα αλόφυτα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την απομάκρυνση των αλάτων από τα αλατούχα εδάφη με σκοπό την αποκατάστασή και την επαναχρησιμοποίησή τους. Κάποια αλόφυτα έχει αναφερθεί ότι συσσωρεύουν υψηλές

συγκεντρώσεις αλάτων στους υπέργειους ιστούς τους συνεπάγοντας την αναβάθμιση του εδάφους με την απομάκρυνσή της φυτικής τους βιομάζας. Για τη συγκεκριμένη μέθοδο έχει προταθεί ο όρος Phytodesalination (Glenn et al. 1999, Rabhi et al. 2010, Manousaki & Kalogerakis 2011).

1.1. Στόχοι και αντικείμενο μεταπτυχιακής διατριβής

Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας 3 διαφορετικών μεσογειακών αλόφυτων (*Halimione portulacoides*, *Tamarix parviflora*, *Limoniastrum monopetalum*) να χρησιμοποιηθούν για αποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών με χρήση των μεθόδων της φυτοσυσσώρευσης και της φυτοέκκρισης. Πιο συγκεκριμένα οι στόχοι της εργασίας είναι:

- Ο χαρακτηρισμός της ικανότητας των επιλεγμένων ειδών να συσσωρεύουν το κάδμιο και τον μόλυβδο.
- Η κατανομή των μετάλλων αυτών στα υπέργεια μέρη τους και στις ρίζες.
- Η διερεύνηση της έκκρισης αυτών των μετάλλων από την επιφάνεια των φύλλων των υπό εξέταση φυτών.
- Η μελέτη της επίδρασης της εδαφικής αλατότητας στην πρόσληψη, συσσώρευση, και κατανομή των μετάλλων στους φυτικούς ιστούς.
- Η μελέτη της επίδρασης της εδαφικής αλατότητας στην έκκριση των μετάλλων στην επιφάνεια των φύλλων των υπό εξέταση φυτών.
- Η ικανότητα των φυτών να αντέχουν σε υψηλές συγκεντρώσεις καδμίου και μολύβδου και συγχρόνως υψηλής εδαφικής αλατότητας.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1. Τοξικά μέταλλα στο Περιβάλλον

2.1.1. Πηγές βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον

Σύμφωνα με τους Ghosh & Singh (2005), ως βαρέα μέταλλα ορίζονται τα στοιχεία που έχουν ατομικό βάρος μεταξύ 63,54 και 200,59 και ειδικό βάρος μεγαλύτερο του 4. Σύμφωνα πάλι κατ' άλλους βαρέα μέταλλα είναι τα στοιχεία με μεταλλικές ιδιότητες (ελατά, αγωγίμα, σταθερά ως κατιόντα, ικανά να λειτουργούν ως υποκαταστάτες κτλ. και ατομικό αριθμό >20) (Lasat 2000). Δέκα βασικά στοιχεία: O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti και P αποτελούν το 99% του φλοιού της γης. Τα υπόλοιπα στοιχεία του περιοδικού πίνακα ονομάζονται ιχνοστοιχεία και υπό φυσιολογικές συνθήκες η συγκέντρωσή τους δεν ξεπερνάει συνήθως τα 1000 mg/Kg (0,1%). Στην πραγματικότητα τα πιο πολλά εμφανίζουν συνήθως συγκεντρώσεις μικρότερες των 100 mg/Kg (Alloway 1995). Πολύ μικρές ποσότητες από κάποια βαρέα μέταλλα και μεταλλοειδή είναι απαραίτητα στους ζωντανούς οργανισμούς αλλά μεγαλύτερες ποσότητες από αυτά μπορούν να είναι καταστρεπτικές γι' αυτούς (Ghosh & Singh 2005). Τα μη απαραίτητα για τους οργανισμούς ιχνοστοιχεία περιλαμβάνουν τα: As, Sb, Cd, Cr, Hg, Pb κ.τ.λ. Αυτά τα μέταλλα παρουσιάζουν ιδιαίτερη σημασία για τα επιφανειακά νερά και την εδαφική ρύπανση (Ghosh & Singh 2005).

Τα μέταλλα που βρίσκονται στο έδαφος προέρχονται από φυσικές και από ανθρωπογενείς πηγές (Alloway 1995, Orcutt & Nilsen 2000). Όπως αναφέρεται και στις ανασκοπήσεις των: Freedman & Hutchinson (1981), Friedland (1990), Ross (1994), Seaward & Richardson (1990) και Verkleij (1993), τις οποίες και συγκεντρώνουν οι Orcutt & Nilsen (2000), μία από τις σημαντικότερες φυσικές πηγές είναι το μητρικό πέτρωμα. Τα πυριγενή πετρώματα για παράδειγμα περιέχουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις των μετάλλων: Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Sn, Hg, Pb απ' ότι τα ιζηματογενή πετρώματα. Τα εδάφη που αναπτύσσονται σε σερπεντινικά πετρώματα παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις τοξικών μετάλλων όπως Ni, Cr, Co, Mn, Mg (Kazakou et al. 2008, Raskin et al. 1994) και έλλειψη Ca, χαμηλές συγκεντρώσεις μακροστοιχείων που πιθανόν οφείλονται στην έλλειψη οργανικής ύλης και στην έλλειψη P και K από το μητρικό πέτρωμα (Kazakou et al. 2008). Άλλες φυσικές πηγές βαρέων μετάλλων είναι τα αέρια που παράγονται κατά τις εκρήξεις των ηφαιστείων και τις πυρκαγιές των δασών, καθώς και οι αποθέσεις των μαζών σκόνης που μεταφέρονται από την Σαχάρα σε άλλες περιοχές (Orcutt & Nilsen, 2000). Το Cd βρίσκεται φυσικά στο περιβάλλον και συγκεκριμένα στο

έδαφος και στα ιζήματα σε συγκεντρώσεις συνήθως μεγαλύτερες του 1 mg/kg (Peterson & Alloway 1979 στο: Das et al. 1998).

Από την αρχή όμως της βιομηχανικής επανάστασης η ρύπανση του εδάφους με τοξικά μέταλλα αυξήθηκε δραματικά. Περίπου το 90% των ανθρωπογενών εκπομπών βαρέων μετάλλων συνέβησαν από το 1900 μ.χ και έπειτα και είναι πλέον γνωστό ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες οδηγούν σε σημαντική συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στο έδαφος σε παγκόσμια κλίμακα (Jadia & Fulekar 2009). Οι μεταλλευτικές δραστηριότητες μεταφέρουν μέταλλα στο περιβάλλον είτε κατά τη διαδικασία της επεξεργασίας των μεταλλευμάτων είτε με τη ρύπανση των νερών και του εδάφους από τη διάβρωση και την απορροή των υπολειμμάτων των μεταλλίων ή με την μεταφορά της σκόνης που παράγεται. Άλλες βιομηχανικές πηγές βαρέων μετάλλων αποτελούν η παραγωγή και επεξεργασία πλαστικού και υφασμάτων, τα ηλεκτρονικά συστήματα, τα φωτοβολταϊκά συστήματα, η συντήρηση της ξυλείας, η επεξεργασία του χαρτιού και τα διυλιστήρια. Επίσης βαρέα μέταλλα απελευθερώνονται στο γύρω περιβάλλον κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, από τα καυσαέρια των οχημάτων, κατά την αποτέφρωση των στερεών απορριμμάτων, από την τριβή των λάστιχων των οχημάτων, από τη διάβρωση γαλβανισμένων μετάλλων, από τους μεταλλικούς πυλώνες και τα καλώδια που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Σημαντικές ποσότητες μετάλλων αποτίθενται στο έδαφος και κατά τις αγροτικές δραστηριότητες είτε κατά τη χρήση λιπασμάτων και ιδιαίτερα των φωσφορικών λιπασμάτων ή εδαφοβελτιωτικών, είτε κατά τη χρήση λύματολάσπης ως λίπασμα, κατά τη χρήση του νερού άρδευσης όταν αυτό περιέχει βαρέα μέταλλα, ή την χρήση των εντομοκτόνων και των μυκητοκτόνων (Alloway 1995, Orcutt & Nilsen 2000, Kirkham 2006). Έχει υπολογιστεί ότι περίπου 660 τόνοι καδμίου τον χρόνο αποτίθενται στο έδαφος, σε όλο τον κόσμο, μέσω της χρήσης φωσφορικών λιπασμάτων (Orcutt & Nilsen 2000).

2.1.2. Κάδμιο και μόλυβδος στον ελληνικό χώρο

Σύμφωνα με την ΚΥΑ 80568/4225/1991 (ΦΕΚ 641Β/7-8-1991) έχουν καθοριστεί οι οριακές ανώτερες τιμές συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων στο έδαφος, μετρούμενες σε mg/kg ξηράς ουσίας εδάφους, στην Ελλάδα, ώστε το έδαφος να μην θεωρείται ρυπασμένο (Πίνακας 1) και οι οριακές τιμές για τις ποσότητες βαρέων μετάλλων που μπορούν να εισάγονται κατ' έτος στα καλλιεργημένα εδάφη με βάση έναν μέσο όρο 10 ετών (Πίνακας 2)

Πίνακας 1. Οριακές επιτρεπτές τιμές συγκεντρώσεων κάποιων βαρέων μετάλλων στο έδαφος, στην Ελλάδα (αφορούν έδαφος με pH=6 έως 7)*.

Παράμετροι	Οριακές τιμές (mg/kg ξηράς ουσίας εδάφους με pH = 6 – 7)
Cd	1-3
Cu	50-140
Ni	30-75
Pb	50-300
Zn	150-300
Hg	1-1.5
Cr	-

* Πηγή: Μιχαλοπούλου Χ. (2004)

Για σταθερές τιμές του PH ανώτερες του 7 οι αρχές επιτρέπουν την υπέρβαση των παραπάνω οριακών τιμών για τις παραμέτρους αυτές, όμως σε καμία περίπτωση οι ανώτατες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν κατά ποσοστό ανώτερο του 50% τις παραπάνω τιμές.

Πίνακας 2. Οριακές τιμές ποσοτήτων βαρέων μετάλλων που μπορούν να εισάγονται κατ' έτος στα καλλιεργημένα εδάφη με βάση ένα μέσο όρο 10 ετών (σε mg/ εκτάριο/ έτος).

Παράμετροι	Οριακές τιμές
Cd	0.15
Cu	12
Ni	3
Pb	15
Zn	30
Hg	0.1
Cr	-

Σύμφωνα πάλι με τον Alloway (1995) έδαφος με συγκέντρωση καδμίου από 0-1 μg/g θεωρείται μη ρυπασμένο έδαφος, εάν η συγκέντρωση του καδμίου είναι μεταξύ 1-3 μg/g τότε το έδαφος χαρακτηρίζεται μετρίως ρυπασμένο ενώ αν η συγκέντρωση του καδμίου είναι από 3-10 μg /g τότε το έδαφος υπολογίζεται ως ρυπασμένο.

Η μελέτη των βαρέων μετάλλων στον αέρα, το έδαφος και το νερό, στον ελληνικό χώρο, φαίνεται να έλκει όλο και περισσότερο το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας την τελευταία δεκαετία, αν και έχουν γίνει κάποιες μελέτες υπολογισμού της ρύπανσης με βαρέα μέταλλα και τις παλιότερες δεκαετίες. Στην Ελλάδα, όπως και αλλού, ρύπανση με βαρέα μέταλλα εμφανίζεται κυρίως στις αστικές περιοχές, λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων όπως η συχνή κυκλοφορία οχημάτων, οι βιομηχανικές δραστηριότητες, η διάθεση των στερεών και υγρών αποβλήτων, η παραγωγή ενέργειας, οι κατασκευές κ.τ.λ. Εμφανίζεται όμως και σε αγροτικές περιοχές λόγω της χρήσης διάφορων αγροχημικών (εντομοκτόνων και λιπασμάτων) (Farmaki & Thomaidis 2008). Οι Kassasi et al. (2008) σε έναν εγκαταλειμμένο χώρο απόθεσης στερεών αποβλήτων, στη Θεσσαλονίκη, μέτρησαν στο έδαφος, σε διάφορα βάθη, συγκεντρώσεις Καδμίου από: 0.50 - 18.75 mg/kg και Pb από 2.50–92.50 mg/kg. Ο Papastergios και οι συνεργάτες του (2010), αφού μελέτησαν την ευρύτερη περιοχή της Καβάλας (αστική ζώνη, περίχωρα και βιομηχανική ζώνη), παρατήρησαν αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων μέσα στην πόλη και στην βιομηχανική περιοχή, τις οποίες και απέδωσαν στις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Στο Θριάσειο πεδίο, μία βιομηχανική περιοχή κοντά στην Αθήνα, η ολική συγκέντρωση του μολύβδου και του καδμίου στο έδαφος υπολογίστηκε μεγαλύτερη από το έδαφος άλλων μη βιομηχανικών περιοχών της Ελλάδας. Στην ίδια περιοχή οι συγκεντρώσεις Pb, Cd, Zn, Cr, S, σε δείγματα φύλλων ελιάς βρέθηκαν αρκετά μεγαλύτερες από δείγματα φύλλων από άλλες αγροτικές περιοχές (Nakos 1982). Στην περιοχή Αλικαρνασσού, κοντά στο αεροδρόμιο του Ηρακλείου Κρήτης, σε μία βιομηχανική περιοχή, από μετρήσεις που έγιναν στο επιφανειακό έδαφος βρέθηκε συγκέντρωση καδμίου: 1,65 – 3,0 mg/kg και μολύβδου: 33,05 – 136,7 mg/kg επομένως τα εδάφη εκεί μπορούν να χαρακτηριστούν ως μετρίως ρυπασμένα (Papafilipaki et al. 2008).

Οι Yassoglou et al. (1987) υπολόγισαν αυξημένες συγκεντρώσεις Pb, Cd, Zn στο έδαφος κοντά σε πολυσύχναστους δρόμους της Αθήνας, ενώ και οι Riga-Karandinos et al. 2006 στο: Farmaki & Thomaidis 2008) παρατήρησαν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις μετάλλων, όπως τα Pt, Pd, Pb, Cu, Zn, Fe, στους δρόμους της Αθήνας και στις μεγάλες κυκλοφοριακές αρτηρίες απ' ότι στους δρόμους στα περίχωρα της πόλης ή στις αγροτικές περιοχές. Ακόμα και σε μικρότερες πόλεις το έδαφος εμφανίζεται να έχει αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, όπως στην περίπτωση δειγμάτων εδάφους από πάρκα εντός της πόλης των Χανίων, όπου η Papafilipaki και οι συνεργάτες της (2008) τα κατατάσσουν σε μετρίως ρυπασμένα εδάφη με μόλυβδο και κάδμιο.

Επιπλέον σε εδάφη και στο νερό περιοχών όπου λειτουργούν ή λειτουργούσαν ορυχεία και έχουν μελετηθεί, έχουν βρεθεί εξαιρετικά μεγάλες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων και καδμίου. Τέτοια περίπτωση αποτελούν τα ορυχεία “Αγ. Φίλιππος” στην Κίρκη, στην Βόρεια Ελλάδα, στο έδαφος των οποίων η συγκέντρωση του Καδμίου έφτανε τα 174 mg/kg και στο νερό από κοντινούς εποχικούς χείμαρρους τα 11.2 µg/L (Nicolaidis et al. 2010). Ανάλογη περίπτωση αποτελούν και τα ορυχεία στην περιοχή του Λαυρίου, όπου η μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο νερό των υπόγειων υδροφορέων της ευρύτερης περιοχής από τον Stamatis και τους συνεργάτες του (2001), έδειξε αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων. Η συγκέντρωση του καδμίου, στο 75% των δειγμάτων που αναλύθηκαν, ξεπερνούσε τα 5 ppb, δηλαδή μεγαλύτερη από την ανώτατη τιμή που ορίζει η ΚΥΑ Υ2/2600/2001, σε συμμόρφωση προς την κοινοτική οδηγία 98/83/EK, για την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης (5 µg/L). Επίσης στη Θάσο, στο επιφανειακό έδαφος περιοχών πρώην μεταλλείων, βρέθηκαν εξαιρετικά υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων. Συγκεκριμένα, η μέση συγκέντρωση του Cd στα δείγματα που αναλύθηκαν κυμαινόταν από 11-249 mg/kg, του Pb από 1.442-29.447 mg/kg και του As από: 446-1.620 mg/kg (Kelepertsis & Bibou 1991).

2.1.3. Επιπτώσεις του Cd και του Pb στον άνθρωπο

Το κάδμιο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την ανθρώπινη υγεία γιατί συσσωρεύεται σε πολλά σιτηρά, πατάτες, λαχανικά και φρούτα (Prasad 1995, Wahid et al. 2009) και οι άνθρωποι λαμβάνουν το 70% της συνολικής ποσότητας καδμίου, μέσω της τροφής τους (Wahid et al. 2009). Το κάδμιο συσσωρεύεται, στους οργανισμούς, κυρίως στα νεφρά, στο συκώτι και στα αναπαραγωγικά όργανα. Σε υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει νεφρική ανεπάρκεια ενώ σε χαμηλά επίπεδα συνδέεται με νεφρική δυσλειτουργία. Άλλες ασθένειες που συνδέονται με το κάδμιο είναι το πνευμονικό εμφύσημα και η γνωστή ασθένεια Itai – itai. Το κάδμιο αντικαθιστά το Ca στα οστά και έτσι προκαλεί οστεοπόρωση. Περιστατικά δηλητηρίασης από κάδμιο έχουν αναφερθεί σε παγκόσμια κλίμακα. Για παράδειγμα, η συσσώρευση καδμίου στο ανθρώπινο σώμα, προκάλεσε περισσότερους από 100 θανάτους στην Ιαπωνία από το 1922 έως το 1965 (Kirkham 2006). Το 1993, το Διεθνές Γραφείο Έρευνας για τον Καρκίνο (International Agency for Research on Cancer), του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας, κατέταξε το κάδμιο και τις ενώσεις του ως ομάδα καρκινογόνων ουσιών προσθέτοντας ότι υπάρχουν

σημαντικές αποδείξεις ότι το κάδμιο είναι καρκινογόνο στον άνθρωπο και στα ζώα, οι οποίες προέκυψαν κυρίως από παρατηρήσεις υπερβολικής θνησιμότητας από καρκίνο των πνευμόνων μεταξύ εργατών από εργοστάσια που επεξεργαζόταν κάδμιο στις Η.Π.Α. και στο Ηνωμένο Βασίλειο (WHO Regional Office for Europe 2000).

Ο μόλυβδος έχει επίσης χαρακτηριστεί από την EPA ως καρκινογόνος ουσία. Οι άνθρωποι έρχονται κυρίως σε επαφή μέσω της αναπνοής και της τροφής. Ο Pb συσσωρεύεται στα όργανα (π.χ. στον εγκέφαλο) και μπορεί να οδηγήσει ακόμα και στον θάνατο. Επηρεάζει το γαστρεντερικό σύστημα, τα νεφρά και το κεντρικό νευρικό σύστημα. Η έκθεση στις μικρότερες ηλικίες οδηγεί σε μη φυσιολογική ανάπτυξη, έλλειψη συγκέντρωσης, υπερκινητικότητα κ.τ.λ. με τα παιδιά κάτω από 6 χρονών να απειλούνται περισσότερο. Στους ενήλικες προκαλεί έλλειψη μνήμης, ναυτία, αμνησία, ανορεξία, αδυναμία των αρθρώσεων κτλ (Henry 2000).

2.1.4. Μορφές του Cd και του Pb στο έδαφος

Τα μέταλλα στο έδαφος βρίσκονται με διάφορες μορφές: (1) στο εδαφικό διάλυμα ως ελεύθερα μεταλλικά ιόντα ή συμπλοκοποιημένα μεταλλικά ιόντα (2) ενωμένα στα ανόργανα συστατικά του εδάφους, στις θέσεις ανταλλαγής ιόντων, (3) συμπλοκοποιημένα στην οργανική ουσία, (4) εγκλεισμένα στα οξείδια και υδροξείδια του Fe, Al, Mn και (5) παγιδευμένα στα πρωτογενή και δευτερογενή ορυκτά (Lasat 2000, Weis & Weis 2004, Nascimento & Xing 2006, Wei et al. 2008). Μόνο τα μέταλλα με τη μορφή (1) και (2), όπως ορίζονται πιο πάνω, είναι άμεσα διαθέσιμα στα φυτά. Αυτά που είναι εγκλεισμένα σε οξείδια και υδροξείδια ή δεσμευμένα στην οργανική ουσία είναι λιγότερο διαθέσιμα ενώ αυτά που υπάρχουν ως αδιάλυτα σουλφίδια ή είναι παγιδευμένα στην κρυσταλλική δομή των ορυκτών είναι μη διαθέσιμα στα φυτά (Lasat 2000, Adriano et al. 2004, Weis & Weis 2004, Fedotov & Spivakov 2008, Wei et al. 2008). Μεταξύ του άμεσα διαθέσιμου και του μη διαθέσιμου κλάσματος υπάρχει το ανταλλάξιμο κλάσμα των βαρέων μετάλλων και όλα τα κλάσματα βρίσκονται μεταξύ τους σε ισορροπία στο έδαφος. Αν μειωθεί, για παράδειγμα, η συγκέντρωση των μετάλλων στο εδαφικό διάλυμα λόγω απορρόφησης από τα φυτά, θα απελευθερωθούν σε αυτό μέταλλα από τα άλλα κλάσματα. Αν αυξηθεί η συγκέντρωση των μετάλλων, λόγω π.χ. εισροής από το εξωτερικό περιβάλλον ή αλλαγής στη θερμοκρασία και υγρασία του περιβάλλοντος, κάποια ποσότητα μετάλλων θα μετακινηθεί από το ανταλλάξιμο κλάσμα στο μη άμεσα διαθέσιμο κλάσμα (Wei et al. 2008). Κάποια μέταλλα όπως ο Zn και το Cd υπάρχουν κυρίως με ανταλλάξιμη μορφή και

άρα είναι βιοδιαθέσιμα. Άλλα πάλι, όπως ο Pb, υπάρχουν σε λιγότερο διαθέσιμες μορφές (Lasat 2000, Ghosh & Singh 2005). Ο Pb είναι γνωστό ότι σχηματίζει αδιάλυτα άλατα με τον P με αποτέλεσμα να χάνεται ένα μεγάλο μέρος του P και του Pb από το εδαφικό διάλυμα (Korittke et al. 2007).

Ο όρος βιοδιαθεσιμότητα λοιπόν, αναφέρεται στο κλάσμα της ολικής μάζας του μετάλλου στο έδαφος το οποίο μπορεί να είναι πραγματικά διαθέσιμο στους οργανισμούς (πχ. σε μορφή διαθέσιμη για απορρόφηση από τα φυτά) ή αναφέρεται στη δυνατότητα των οργανισμών να λαμβάνουν αυτά τα χημικά από την τροφή τους ή από το αβιοτικό τους περιβάλλον σε τέτοιο βαθμό ώστε αυτά να εμπλέκονται στον μεταβολισμό των οργανισμών (Adriano et al. 2004).

2.1.5. Παράγοντες που επηρεάζουν την πρόσληψη του Cd και του Pb από τα φυτά

2.1.5.1. Εδαφικοί Παράγοντες (αβιοτικοί)

Η ολική συγκέντρωση του μετάλλου στο έδαφος είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζει την πρόσληψη από τα φυτά. Ο Alloway (1995) αναφέρει ότι ο ίδιος, το 1986, παρατήρησε ότι το ολικό κάδμιο στο έδαφος συσχετιζόταν στενά με τη συγκέντρωση του καδμίου στα βρώσιμα μέρη διάφορων λαχανικών και ότι και οι Lund et al. (1981) βρήκαν σημαντική θετική συσχέτιση μεταξύ του ολικού καδμίου στο έδαφος και στην συγκέντρωσή του στα φύλλα από διάφορα είδη καλλιεργήσιμων φυτών. Επίσης αναφέρει ότι σε γενικές γραμμές, υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης του Pb στο έδαφος και αυτής στα φυτά αν και γενικά μόνο ένα μικρό μέρος του Pb του εδάφους είναι βιοδιαθέσιμο στα φυτά. Η πηγή από την οποία προέρχεται το μέταλλο φαίνεται να επηρεάζει επίσης τη βιοδιαθεσιμότητα του. Το Cd π.χ. που προέρχεται από εκμεταλλεύσεις μεταλλείων τείνει να συσσωρεύεται περισσότερο στα βρώσιμα λαχανικά από αυτό που βρίσκεται σε εδάφη λιπασμένα με λυματολάσπη (Alloway 1995).

Το εδαφικό pH είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη βιοδιαθεσιμότητα του Cd επειδή επιδρά σε όλους του μηχανισμούς προσρόφησης του μετάλλου στο έδαφος. Η απορρόφηση του Cd από τα φυτά συσχετίζεται αρνητικά με το pH του εδάφους και πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι χαμηλές τιμές του pH αυξάνουν, ενώ υψηλές τιμές μειώνουν την φυτοδιαθεσιμότητα του καδμίου (Alloway 1995, Prasad 1995, Das et al. 1997, Lasat 2000, Adriano et al. 2004, Ghosh & Singh 2005, Kirkham et al. 2006, Chaney et al. 2007, Wahid et al. 2009). Η εκρόφιση του καδμίου στο εδαφικό

διάλυμα και επομένως η αύξηση της βιοδιαθεσιμότητας του οφείλεται στον ανταγωνισμό μεταξύ των H^+ για τις θέσεις ανταλλαγής κατιόντων (Lasat 2000). Για τη βιοδιαθεσιμότητα του Pb πάλι, από πολλές μελέτες που έχουν γίνει, έχει βρεθεί μικρή συσχέτιση της απορρόφησης του μολύβδου με το pH του εδάφους (Alloway 1995).

Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων των εδαφών συσχετίζεται αρνητικά με την ποσότητα του καδμίου και του μολύβδου που απορροφούν τα φυτά. Όταν αυξάνει η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων του εδάφους αυξάνονται οι δυνάμεις συγκράτησης των κατιόντων στα σωματίδια του εδάφους και επομένως μειώνεται η βιοδιαθεσιμότητα τους. (Alloway 1995, Das et al. 1997, Lasat 2000, Wahid et al. 2009).

Η οργανική ουσία του εδάφους. Το περιεχόμενο του εδάφους σε οργανική ουσία και συνεισφέρει στην ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων του εδάφους και δημιουργεί σύμπλοκα με τα μέταλλα, συνεισφέροντας έτσι στη μείωση της βιοδιαθεσιμότητας τους (Alloway 1995, Adriano et al. 2004, Kirkham et al. 2006). Κάποια μέταλλα όπως τα Pb, Cu, Hg, Fe, Al, τείνουν να συνδέονται ισχυρά με την οργανική ουσία του εδάφους. Παρόλο που το κάδμιο δεν συνδέεται τόσο ισχυρά με τη διαλυμένη οργανική ουσία η βιοδιαθεσιμότητα του τείνει να μειώνεται με την παρουσία της οργανικής ουσίας (Prasad 1995). Η αύξηση του pH οδηγεί σε διάσπαση των καρβοξυλικών, φαινολικών, αλκοολών και καρβονυλικών ομάδων της οργανικής ουσίας ευνοώντας έτσι τη δέσμευση των μεταλλικών κατιόντων. Γενικά η σειρά έλξης των μετάλλων από την οργανική ουσία είναι η εξής: $Cu^{2+} > Cd^{2+} > Fe^{2+} > Pb^{2+} > Ni^{2+} > Co^{2+} > Mn^{2+} > Zn^{2+}$ (Adriano et al. 2004).

Το οξειδοαναγωγικό δυναμικό του εδάφους επηρεάζει την ισορροπία μεταξύ των διάφορων κλασμάτων του καδμίου στο έδαφος (Alloway 1995, Prasad 1995, Ghosh & Singh 2005). Μία αύξηση στο οξειδοαναγωγικό δυναμικό από -150 σε 500 mV έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ανταλλάξιμου καδμίου και την αύξηση της ανηγμένης μορφής του (Prasad 1995). Για παράδειγμα ο Alloway (1995) αναφέρει ότι το ρύζι που αναπτύσσεται σε πλημμυρισμένες συνθήκες (συνθήκες αναγωγής) φαίνεται να συσσωρεύει λιγότερο κάδμιο και να αναπτύσσεται καλύτερα απ' ό,τι εκείνο που αναπτύσσεται σε συνθήκες οξείδωσης και αυτό οφείλεται στον σχηματισμό στερεού CdS στις ανοξικές συνθήκες των ορυζώνων. Όταν οξειδωθεί το σουλφίδιο προκαλείται οξίνιση του εδάφους η οποία οδηγεί σε αύξηση της βιοδιαθεσιμότητας του μετάλλου. Στην κοιλάδα Jintsu της Ιαπωνίας όπου εμφανίστηκε πρώτη φορά η ασθένεια itai-itai η περιεκτικότητα του ρυζιού σε κάδμιο βρέθηκε να συσχετίζεται με τον αριθμό των ημερών που οι ορυζώνες ήταν στεγνοί και αερίστηκαν πριν την συγκομιδή (Alloway 1995).

Η παρουσία άλλων κατιόντων. Τα στοιχεία που έχουν παρόμοιες ιδιότητες μπορεί να δρουν ανταγωνιστικά μεταξύ τους ενώ κάποια δρουν και συνεργιστικά. Σύμφωνα με τον Alloway (1995), η παρουσία στο έδαφος στοιχείων όπως τα Cu, Ni, Se, Mn, P, μπορούν να μειώσουν την πρόσληψη του καδμίου από τα φυτά και ο Zn για παράδειγμα, φαίνεται να ανταγωνίζεται στην πρόσληψη το Cd, σε χαμηλές συγκεντρώσεις Cd. Οι Suntornvongsagul et al. (2007) επίσης αναφέρουν ότι η πρόσληψη καδμίου από τα φυτά του είδους *Spartina patens* μειωνόταν με την προσθήκη χαμηλών ή μέτριων συγκεντρώσεων Zn στο έδαφος. Ο Pb επίσης παρουσιάζει συχνά συνεργιστική δράση στην πρόσληψη του Cd μιας και δεσμεύεται πιο εύκολα στις θέσεις ανταλλαγής και απελευθερώνει έτσι κάδμιο στο εδαφικό διάλυμα, όπως αναφέρει ο Alloway (1995). Ο ίδιος πάλι αναφέρει ότι ο Villarroel et al. (1993) απέδειξε ότι η εφαρμογή λιπάσματος N σε φυτά *Beta vulgaris* αύξησε την πρόσληψη του Cd από τα φυτά. Η Μανουσάκη (2008) συγκρίνοντας τη συγκέντρωση του Cd σε φυτά του *A. halimus* και του *T. smyrnensis* διαπίστωσε ότι η ταυτόχρονη παρουσία του Pb, στο έδαφος, είχε θετική επίδραση στη συσσώρευση του καδμίου στους ιστούς των φυτών. Όσον αφορά τον Pb και την επίδραση του Cd τα αποτελέσματα δεν ήταν τόσο ξεκάθαρα. Σε σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις μολύβδου, το κάδμιο δεν είχε σημαντική επίδραση στη συσσώρευση του Pb στις ρίζες του *A. halimus* ενώ φάνηκε να μειώνει τη μετακίνηση του Pb στα υπέργεια τμήματα των φυτών. Σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Pb (3200 ppm) το κάδμιο οδήγησε σε μείωση του μολύβδου στις ρίζες του *A. halimus* κατά 73% ενώ οδήγησε σε αύξηση της συσσώρευσής του μολύβδου στα υπέργεια τμήματα του κατά 100%. Στην καλλιέργεια του *T. smyrnensis*, η ίδια, παρατήρησε ότι η παρουσία του Cd οδήγησε σε μεγαλύτερη συσσώρευση Pb και στις ρίζες και στα υπέργεια τμήματα των φυτών σε σχέση με αυτή που είχε παρατηρηθεί σε ανάλογο πείραμα από τους Kadukova και Kalogerakis (2007). Οι Carlson & Bazzaz (1977) παρατήρησαν ότι η παρουσία και των δύο μετάλλων (Cd & Pb) αύξησε την πρόσληψή και των δύο από το φυτό *Platanus occidentalis* L. σε σχέση με αυτή που παρατηρούνταν όταν στο έδαφος υπήρχε το ένα από τα δύο μέταλλα. Επίσης οι Weis & Weis (2004) σε μία μελέτη που έκαναν με φυτά του είδους *Phragmites australis* στα οποία προσέθεταν στο έδαφος 1000 μg/g Cu, Pb και Zn ή συνδυασμούς 2 ή 3 μετάλλων από αυτά, παρατήρησαν ότι η συγκέντρωση κάθε μετάλλου στους διάφορους ιστούς του φυτού επηρεαζόταν από την παρουσία των άλλων μετάλλων.

Η αλατότητα του εδάφους έχει βρεθεί ότι επηρεάζει τη βιοδιαθεσιμότητα των μετάλλων και επομένως και την πρόσληψη τους από τα φυτά. Πολλές μελέτες αναφέρουν ότι η αύξηση της αλατότητας οδηγεί σε αύξηση της διαλυτότητας των μετάλλων και του

καδμίου στο εδαφικό διάλυμα λόγω 1) αντικατάστασης των μετάλλων από το Na^+ στις θέσεις ανταλλαγής με συνέπεια την απελευθέρωσή τους στο εδαφικό διάλυμα (Bingham et al. 1983, Greger et al. 1995, Wahla & Kirkham 2009), 2) της διαλυτοποίησης της οργανικής ουσίας στην οποία είναι προσροφημένα τα μέταλλα (Wahla & Kirkham 2009) και 3) του σχηματισμού διαλυτών συμπλόκων CdCl_2 , όσον αφορά στο Cd (Bingham et al. 1983, Kirkham 2006, Ghnaya et al. 2007, Wahla & Kirkham 2009). Η αύξηση της αλατότητας παρατηρήθηκε να έχει θετική επίδραση στην απορρόφηση του καδμίου από το *Atriplex halimus* (Manousaki & Kalogerakis 2009) και από το φυτό *Tamarix smyrnensis* (Manousaki et al. 2008, Manousaki et al. 2009). Επίσης το NaCl φαίνεται να αποτελεί “κλειδί” στη μεταφορά των μετάλλων από τις ρίζες στα υπέργεια μέρη των φυτών. Οι Kadukova και Kalogerakis (2007) που μελέτησαν το *Tamarix smyrnensis* παρατήρησαν ότι σε υψηλή αλατότητα (3 % NaCl στο ποτιστικό νερό) αυξήθηκε η συσσώρευση του Pb στα φύλλα των φυτών ενώ μειώθηκε στις ρίζες τους σε σχέση με τα φυτά που ποτίζονταν με νερό άρδευσης. Με την αύξηση της αλατότητας φαίνεται να υπάρχει αύξηση της μεταφοράς και του Cd από τις ρίζες του *T. smyrnensis* προς τα υπέργεια μέρη του φυτού (Manousaki et al. 2008). Επίσης η αλατότητα φαίνεται να αυξάνει τη μετακίνηση του καδμίου από τις ρίζες στους βλαστούς, όπως επίσης και τη συσσώρευση του συνολικά, σε φυτά *Potamogeton pectinatus* (Greger et al. 1995).

Ποσότητα και είδος αργίλου του εδάφους. Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων των εδαφών και επομένως η βιοδιαθεσιμότητα των μετάλλων εξαρτάται από το ποσοστό και το είδος της αργίλου που υπάρχει στο έδαφος (Bingham et al. 1983, Παπαμύχος 1996). Τα ανόργανα κολλοειδή του εδάφους (άργιλος) είναι συνήθως αρνητικά φορτισμένα και έλκουν και συγκρατούν τα κατιόντα που υπάρχουν στο εδαφικό διάλυμα. Όσο πιο αργιλώδες είναι ένα έδαφος τόσο πιο μεγάλη θα είναι η ικανότητα εναλλαγής (ή ανταλλαγής) κατιόντων (CEC). Επίσης η εναλλακτική ικανότητα εξαρτάται και από τον τύπο της αργίλου του εδάφους. Τα τρία κύρια είδη αργίλου: καολινίτης, ιλλίτης και μοντμοριλλονίτης, έχουν ικανότητες προσρόφησης κατιόντων περίπου 5-10, 20-40 και 80-110 meq/100g ξηρού εδάφους αντίστοιχα, ενώ η άργιλος των ένυδρων οξειδίων έχει κατά μέσο όρο εναλλακτική ικανότητα 4 meq/100g (Παπαμύχος 1996).

2.1.5.2. Παράγοντες που σχετίζονται με το φυτό (Βιοτικοί παράγοντες)

Τα είδη των φυτών αλλά και οι διάφορες ποικιλίες διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους ως προς την ικανότητά τους να συσσωρεύουν βαρέα μέταλλα και στην αντοχή τους

σε αυτά. Για παράδειγμα, οι τομάτες παρατηρήθηκαν από τον Turner (1977) να συσσωρεύουν στα φύλλα τους 70 φορές περισσότερο Cd απ' ό τι τα καρότα, ενώ είχε χρησιμοποιηθεί το ίδιο διάλυμα για την καλλιέργεια τους (Alloway 1995). Γενικά, μικρή συσσώρευση Cd παρατηρείται στις οικογένειες Leguminosae, μέτρια συσσώρευση στις οικογένειες Gramineae, Liliaceae, Cucurbitaceae και Umpelliferaceae, ενώ υψηλή στις Chenopodiaceae, Cruciferae, Solanaceae και Compositae. Επίσης, από μακροχρόνιες μελέτες σε καλλιέργειες που λιπαίνονταν με λυματολάσπη φάνηκε ότι τα δικοτυλήδονα όπως το σπανάκι ή το μαρούλι προσλάμβαναν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων απ' ό τι τα μονοκοτυλήδονα, όπως η βρώμη ή το σιτάρι (Orcutt & Nilsen 2000).

Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι τα μέταλλα δεν συσσωρεύονται το ίδιο σε όλα τα μέρη των φυτών αλλά ότι η ηλικία και το είδος των διάφορων φυτικών ιστών παίζει σημαντικό ρόλο (Orcutt & Nilsen 2000, Wahid et al. 2009). Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε πεύκα βρέθηκε ότι οι παλιότερες πευκοβελόνες συσσωρεύαν υψηλότερες συγκεντρώσεις μετάλλων σε σχέση με τις νεότερες εκτός από το Al και ίσως Cu και Ni και επίσης ότι τα κλαδιά συσσωρεύαν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε σχέση με τον κορμό. Οι νεότερες ρίζες συσσωρεύαν περισσότερα μέταλλα σε σύγκριση με τις παλιότερες ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις οι ρίζες είχαν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις κάποιων μετάλλων από όλους τους άλλους φυτικούς ιστούς (Orcutt & Nilsen 2000).

Οι εκκρίσεις των ριζών των φυτών παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην πρόσληψη των μετάλλων από το έδαφος. Η έκκριση κυρίως χαμηλού μοριακού βάρους οργανικών οξέων απελευθερώνει τα μέταλλα και συντελεί στην πρόσληψή τους, είτε με τον σχηματισμό συμπλόκων με τα μεταλλικά ιόντα είτε μειώνοντας το pH γύρω από τις ρίζες και αλλάζοντας τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Οι εκκρίσεις αυτές πιθανόν να έχουν και έμμεση επίδραση στη μικροβιακή δραστηριότητα της ριζόσφαιρας επηρεάζοντας τη διαλυτότητα των μετάλλων και την πρόσληψή τους. Για παράδειγμα, κάποια φυτά απελευθερώνουν συγκεκριμένες ουσίες στην ριζόσφαιρα για να βελτιώσουν την απορρόφηση του Fe και του Zn όταν η διαθεσιμότητά τους είναι μικρή (Raskin et al. 1994, Γαλάτης και λοιποί 2003, Nascimento & Xing 2006, Chaney et al. 2007).

Οι μικροοργανισμοί του εδάφους συντελούν στην πρόσληψη των μετάλλων από τα φυτά καθιστώντας τα βιο-διαθέσιμα. Τα μυκόρριζα για παράδειγμα βρέθηκε ότι αυξάνουν την πρόσληψη του Cd από τα φασόλια και το καλαμπόκι έως και κατά 41% αλλά αυτό εξαρτάται και από το εδαφικό pH και τη συγκέντρωση του καδμίου (Wahid et al. 2009). Γενικά, οι μικροοργανισμοί της ριζόσφαιρας φαίνεται να αυξάνουν την υπερσυσσώρευση Ni και Zn από το έδαφος αν και μεγάλη συσσώρευση παρατηρείται και σε αποστειρωμένα

εδάφη. Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι ο εμβολιασμός ενός σερπεντινικού εδάφους με έναν οργανισμό από τη ριζόσφαιρα ενός φυτού- υπερσυσσωρευτή μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη συσσώρευση των μετάλλων από φυτά, όπως το *Alyssum murale* και το *Thlaspi caerulescens*, αλλά ο μηχανισμός με τον οποίο γίνεται αυτό παραμένει άγνωστος (Chaney et al. 2007).

2.2. Αβιοτικές καταπονήσεις των φυτών

Οι αβιοτικές καταπονήσεις των φυτών προκαλούνται από ένα πλεόνασμα ή μια έλλειψη στο φυσικό ή χημικό περιβάλλον. Οι περιβαλλοντικές καταπονήσεις δημιουργήσαν συνθήκες ισχυρής επιλεκτικής πίεσης, προκαλώντας μοριακές, βιοχημικές, φυσιολογικές και μορφολογικές αντιδράσεις, που συνετέλεσαν στην προσαρμογή και επιβίωση των φυτών στις δυσμενείς συνθήκες. Οι σημαντικότερες αβιοτικές καταπονήσεις είναι:

- Η παρουσία βαρέων μετάλλων
- Η οξειδωτική καταπόνηση
- Η έλλειψη νερού που προκαλείται από ξηρασία, αλατότητα, υψηλή θερμοκρασία ή παγετό
- Η περίσσεια νερού, που μπορεί να προκαλέσει ανοξία ή υποξία (Γαλάτης και λοιποί 2009).

2.2.1. Καταπόνηση από βαρέα μέταλλα

Τα μέταλλα τα οποία απορροφώνται από τα φυτά φαίνεται ότι μεταφέρονται, διαμέσου της πλασματικής μεμβράνης των κυττάρων μέσω δευτερογενών μεταφορέων, όπως οι “πρωτεΐνες κανάλια” (channel proteins) και οι “πρωτεΐνες μεταφορείς” (carrier proteins). Το αρνητικό φορτίο στο εσωτερικό της πλασματικής μεμβράνης, το οποίο μπορεί να ξεπερνάει τα -200 mV στα επιδερμικά κύτταρα των ριζών, αποτελεί ισχυρή ελκτική δύναμη για την πρόσληψη των κατιόντων μέσω των δευτερογενών μεταφορέων (Clemens et al. 2002, Gosh & Singh 2005). Το κυτταρόπλασμα των φυτικών κυττάρων έχει αρνητικό φορτίο λόγω της παρουσίας πρωτεϊνών που στο ουδέτερο pH του κυτταροπλάσματος είναι αρνητικά φορτισμένες, με αποτέλεσμα να έλκει τα κατιόντα και να απωθεί τα ανιόντα (Γαλάτης και λοιποί 2009). Ο μηχανισμός με τον οποίο τα φυτά

προσλαμβάνουν για παράδειγμα το Cd δεν έχει ακόμα διευκρινιστεί. Είναι πιθανό ότι η πρόσληψη του από τις ρίζες εμπλέκεται στον μηχανισμό πρόσληψης ενός άλλου κατιόντος, πιθανόν του Zn^{2+} , επειδή τα φυτά δεν είναι ικανά να διαχωρίσουν τα δύο ιόντα (Lasat 2000).

2.2.1.1. Επιπτώσεις καταπόνησης από βαρέα μέταλλα στα φυτά

Η παρουσία βαρέων μετάλλων σε τοξικά επίπεδα έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση της ανάπτυξης των ευαίσθητων ειδών, η οποία αποτελεί το ορατό αποτέλεσμα μιας σειράς μεταβολικών δυσλειτουργιών. Τα συμπτώματα παρουσιάζονται μέσα σε λίγα λεπτά αφότου το φυτό εκτεθεί σε υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων και περιλαμβάνουν εν ολίγοις:

- Δυσλειτουργίες στην είσοδο και έξοδο ιόντων όπως Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- και K^+ μέσω των μεμβρανών.
- Παρεμπόδιση της λειτουργίας της αλυσίδας μεταφοράς ηλεκτρονίων τόσο στην αναπνοή όσο και στη φωτοσύνθεση,
- Μη αντιστρεπτή παρεμπόδιση της δραστηριότητας των ενζύμων κυρίως λόγω της δέσμευσης των ιόντων των βαρέων μετάλλων σε θέσεις οι οποίες διαθέτουν σουλφυδρυλομάδες (-SH)
- Σημαντική πτώση της παραγωγής ενέργειας (Καραμπουρνιώτης 2003).

Πιο συγκεκριμένα, το κάδμιο αποτελεί ένα από τα πιο τοξικά μέταλλα στο έδαφος γιατί τα άλατά του είναι εύκολα υδατοδιαλυτά, είναι πολύ ευκίνητο μέσα στο φλοιώμα και επομένως μεταφέρεται εύκολα στα διάφορα μέρη των φυτών (Wahid et al. 2009). Το τοξικό επίπεδο του Cd στα φύλλα των φυτών κυμαίνεται από 5 – 30 mg/kg ξηρής ουσίας και του Pb από 30 – 300 mg/kg ενώ το τοξικό επίπεδο στο έδαφος είναι 3-8 mg/kg και 100-400 mg/kg αντίστοιχα (Orcutt & Nilsen 2000).

Αναλυτικότερα, τα πιο συχνά παρατηρούμενα συμπτώματα τοξικότητας του καδμίου στα φυτά είναι: αναστολή της ανάπτυξης των ριζών, μείωση της βιομάζας και τελικά θανάτωση του φυτού. Όλα αυτά τα συμπτώματα εξαρτώνται σημαντικά από την ηλικία του φυτού, τα επίπεδα του καδμίου και τις φυσικοχημικές ιδιότητες του μέσου στο οποίο αναπτύσσονται τα φυτά (Wahid et al. 2009). Όταν η συγκέντρωση του καδμίου φτάσει σε τοξικά επίπεδα, τα πρώτα οπτικά συμπτώματα είναι: χλώρωση των φύλλων και μείωση της αύξησης του φυτού (Das et al. 1997, Wahid et al. 2009) καθώς και στρίψιμο των φύλλων (leaf rolling), κάψιμο των άκρων τους και χλώρωση του βλαστού (Wahid et

al. 2009). Η χλώρωση πιθανόν οφείλεται στην έλλειψη Fe, που προκαλεί το κάδμιο, ή κατά άλλους ερευνητές στην έλλειψη P και στη μείωση απορρόφησης του μαγγανίου (Das et al. 1997). Γενικά, έχει παρατηρηθεί ότι το κάδμιο εμπλέκεται στην απορρόφηση και στην μεταφορά, από τα φυτά, άλλων στοιχείων, όπως τα: Ca, Mg, P, K, καθώς και του νερού. (Prasad 1995, Das et al. 1997, Wahid et al. 2009). Το Cd εμποδίζει τη λειτουργία των ενζύμων (Prasad 1995, Das et al. 1997, Wahid et al. 2009) ενώ έχει παρατηρηθεί ότι προκαλεί και αλλοιώσεις στα χρωμοσώματα και εμποδίζει την κυτταρική διαίρεση (Das et al. 1997, Wahid et al. 2009). Επηρεάζει σημαντικά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης (Prasad 1995, Ewais 1997, Wahid et al. 2009). Είτε εμποδίζει τη βιοσύνθεση της χλωροφύλλης στους χλωροπλάστες προκαλώντας τη διάσπασή της, είτε εμποδίζει τις φωτοχημικές και καρβοξυλικές αντιδράσεις επηρεάζοντας τα ένζυμα των χλωροπλαστών. Προσβάλλει όλα τα επίπεδα της φωτοσύνθεσης, τις φωτεινές αντιδράσεις της φωτοσύνθεσης και ιδιαίτερα την φωτοσύνθεση II και τα ένζυμα των σκοτεινών αντιδράσεων (Wahid et al. 2009). Ο Prasad (1995) αναφέρει ότι: χαμηλές συγκεντρώσεις καδμίου (1-5 μM) σε μικρή χρονική έκθεση (μέχρι 72 ώρες) επιβραδύνουν την ανάπτυξη των ριζών χωρίς να εμφανίζονται τοξικά συμπτώματα στα φύλλα, έχοντας ως αποτέλεσμα μικρότερη ικανότητα απορρόφησης από τα φυτά και αυξημένη φωτοσύνθεση. Άλλα συμπτώματα που περιλαμβάνουν αύξηση της συγκέντρωσης της σουκρόζης, μείωση του οσμωτικού δυναμικού και αυξημένη σπαργή, προκαλούν άνοιγμα των στομάτων. Μέτριες συγκεντρώσεις καδμίου (5-50 μM) και χρονική έκθεση μέχρι 3 εβδομάδες εμποδίζουν σημαντικά την ανάπτυξη των ριζών και οδηγούν σε συσσώρευση του καδμίου στα φύλλα. Εμποδίζεται η απορρόφηση του νερού και οι μηχανισμοί μεταφοράς του ενώ αυξάνονται τα επίπεδα αμπισικού οξέος με αποτέλεσμα το κλείσιμο των στομάτων. Υψηλές συγκεντρώσεις καδμίου (πάνω από 50 μM) και έκθεση για μεγάλα χρονικά διαστήματα (3-5 εβδομάδες), του ριζικού συστήματος και του βλαστού, οδηγούν σε απώλεια σπαργής και κλείσιμο των στομάτων ενώ και στα φύλλα αρχίζουν να φαίνονται συμπτώματα τοξικότητας και γήρανσης.

Ο Pb επίσης έχει παρόμοια επίδραση με αυτή του καδμίου στα φυτά. Πιο αναλυτικά προκαλεί μείωση της φωτοσύνθεσης, ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις στο εδαφικό διάλυμα (Bazzaz et al. 1974, Gardea-Torresdey 2005), και του ρυθμού αναπνοής και εμποδίζει τη λειτουργία των στομάτων (Bazzaz et al. 1974, Breckle & Kahle 1992). Προκαλεί μείωση της ανάπτυξης των ριζών και των βλαστών άρα και μείωση της παραγωγής βιομάζας (Breckle & Kahle 1992, Liu et al. 1994, Kopittke et al. 2007, Liu et al. 2009, Islam et al. 2010), εμποδίζει την απορρόφηση από τα φυτά θρεπτικών στοιχείων,

όπως τα K, Ca, Mg, Mn (Breckle & Kahle 1992), προκαλεί αλλοιώσεις στα χρωμοσώματα και δυσλειτουργίες στις κυτταρικές διαιρέσεις (Liu et al. 1994), εμποδίζει τη λειτουργία των ενζύμων (Verma & Dubey 2003, Gardea-Torresdey 2005), προκαλεί αύξηση της σουπεροξειδικής δυσμουτάσης (SOD), της υπεροξειδάσης της γουαϊακόλλης, της ασκορβικής υπεροξειδάσης, της ρεδοκτάσης της γλουταθειόνης και της καταλάσης (Verma & Dubey 2003, Liu et al. 2009) ενώ με την επίδρασή του παράγονται και ενεργές μορφές οξυγόνου (ROS) (Liu et al. 2009). Συμπτώματα τοξικότητας που παρατηρούνται οπτικά στα αρχικά στάδια είναι η χλώρωση των φύλλων (Korittke et al. 2007) καθώς και η αλλαγή στη δομή των ριζών οι οποίες παρουσιάζουν περισσότερες διακλαδώσεις και είναι πιο πυκνές ενώ εμποδίζεται και η δημιουργία των ριζικών τριχιδίων (Breckle & Kahle 1992).

2.2.1.2. Μηχανισμοί αντιμετώπισης της καταπόνησης από βαρέα μέταλλα

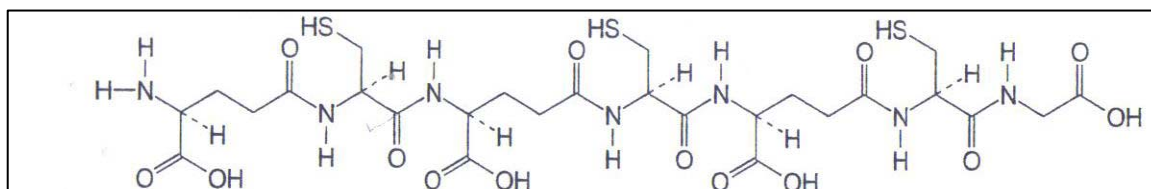
Τα φυτά προκειμένου να αντιμετωπίσουν την καταπόνηση από τα βαρέα μέταλλα έχουν αναπτύξει διάφορους μηχανισμούς άμυνας στις υψηλές συγκεντρώσεις των τοξικών μετάλλων. Οι πιο σημαντικοί από αυτούς είναι:

1. **Η καθήλωση των μετάλλων στο κυτταρικό τοίχωμα.** Ένα σημαντικό μέρος των μετάλλων προσροφάται στις εξωκυτταρικές αρνητικά φορτισμένες θέσεις (COO^-) του τοιχώματος των ριζικών κυττάρων (Prasad 1995, Lasat 2000, Orcutt & Nilsen 2000, Choi et al 2001, Hall 2002, Καραμπουρνιώτης 2003, Gosh & Singh 2005, Peer et al. 2005, Vázquez et. al. 2006, Wahid et al. 2009).
2. **Η έκκριση από τις ρίζες ενώσεων** (π.χ. οργανικών οξέων), με σκοπό είτε τη δημιουργία χηλικών συμπλόκων με τα μέταλλα και την αποτοξίνωσή τους (Orcutt & Nilsen 2000, Hall 2002, Καραμπουρνιώτης 2003, Γαλάτης και λοιποί 2009), ή την αλλαγή του pH και τη μείωση της πρόσληψής των μετάλλων (Orcutt & Nilsen 2000). Η σίκαλη, για παράδειγμα, σε υψηλές συγκεντρώσεις Al, εκκρίνει οξαλικό οξύ από τις ρίζες και συσσωρεύει μη τοξικό οξαλικό - Al στα φύλλα (Hall 2002).
3. Η ανθεκτικότητα που μπορεί να παρουσιάζει η **πλασματική μεμβράνη** στη δράση των τοξικών μετάλλων, οι μηχανισμοί επιδιόρθωσής της και ο ρόλος της στην ομοίωση, είτε εμποδίζοντας την είσοδο των μετάλλων (Alloway 1995, Prasad 1995, Orcutt & Nilsen 2000, Hall 2002, Gosh & Singh 2005, Peer et al. 2005, Wahid et al. 2009), είτε με την ενεργό μεταφορά τους από το κυτταρόπλασμα προς τον αποπλάστη (Alloway 1995, Prasad 1995, Hall 2002, Καραμπουρνιώτης 2003, Peer et al. 2005). Η επανόρθωση της μεμβράνης φαίνεται να συνδέεται με τις θερμοεπαγόμενες πρωτεΐνες

(Heat Shock Proteins) (Hall 2002) και με τη δράση των μεταλλοθειονίνων MTs (Salt et al. 1998, Hall 2002). Στις MTs -πολυπεπίδια πλούσια σε κυστεΐνη- αποδίδεται προστατευτικός ρόλος στην οξειδωτική βλάβη που προκαλούν τα διάφορα μέταλλα αλλά ο ακριβής τους ρόλος στην αντοχή και στην ομοιόσταση παραμένει αδιευκρίνιστος (Γαλάτης και λοιποί 2009), Επίσης και ο ρόλος των HSP χρήζει επιπλέον έρευνας (Hall 2002).

4. **Η συμπλοκοποίηση των μετάλλων** στο κυτόπλασμα από υψηλής συγγένειας υποκαταστάτες (high-affinity ligands) είναι πιθανόν ένας πολύ σημαντικός μηχανισμός αποτοξίνωσης και ανθεκτικότητας των φυτών στα βαρέα μέταλλα. Πιθανοί τέτοιοι υποκαταστάτες είναι τα αμινοξέα και τα οργανικά οξέα, όπως το κιτρικό και το μηλικό οξύ και η Ιστιδίνη (Prasad 1995, Salt et al. 1998, Lasat 2000, Orcutt & Nilsen 2000, Hall 2002, Καραμπουρνιώτης 2003, Sharma & Dietz 2006, Γαλάτης και λοιποί 2009, Wahid et al. 2009). Συμπλοκοποίηση των μετάλλων στο κυτόπλασμα γίνεται και από τις φυτοχηλατίνες ή φυτοχελαιτίνες (phytochelatins, PCs) (Raskin et al. 1994, Prasad 1995, Salt et al. 1998, Lasat 2000, Orcutt & Nilsen 2000, Choi et al. 2001, Hall 2002, Καραμπουρνιώτης 2003, Gosh & Singh 2005, Peer et al. 2005, Nascimento & Xing 2006, Sharma & Dietz 2006, Vázquez et. al. 2006, Γαλάτης και λοιποί 2009, Wahid et al. 2009). Οι φυτοχηλατίνες είναι πεπτίδια πλούσια σε θείο τα οποία παρουσιάζουν τον γενικό τύπο $[\gamma\text{-γλουταμινικό-κυστεΐνη}]_n - \text{γλυκίνη}$, όπου $n=2-11$ (Hall 2002) ο οποίος φαίνεται και ακολούθως στο Σχήμα 2.2.1.

Οι φυτοχηλατίνες δεν συντίθεται στα ριβοσώματα αλλά αποτελούν τα προϊόντα μιας συγκεκριμένης βιοσυνθετικής οδού. Υπάρχουν πλέον ενδείξεις ότι το πρόδρομο μόριο των ουσιών αυτών είναι η γλουταθειόνη [GSH, $\gamma\text{-γλουταμινικό-κυστεΐνη-γλυκίνη}$], ο πλέον διαδεδομένος φορέας σουλφυδρυλομάδων στους φυτικούς ιστούς.



Σχήμα 2.2.1. Η δομή της $[\gamma\text{-γλουταμυλκυστεϊνύλ}]_3\text{-γλυκίνης}$, μιας φυτοχηλατίνης (Καραμπουρνιώτης 2003).

Η γλουταθειόνη λαμβάνει μέρος σε μια σειρά μεταβολικών διαδικασιών μέσω της αναγωγής/οξείδωσης του S [$-\text{SH}$, ανηγμένη μορφή, $-\text{S-S-}$, οξειδωμένη μορφή]

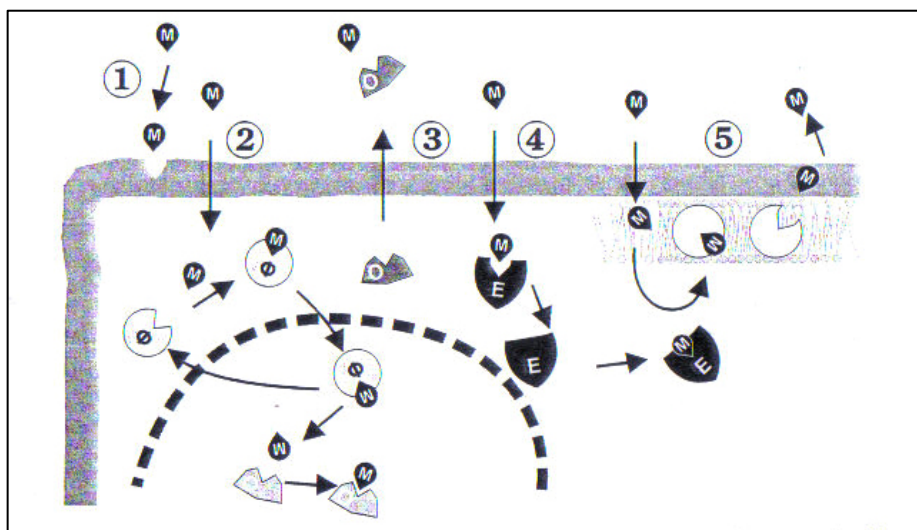
παίζοντας επίσης ρόλους αποθήκευσης θείου και αποτοξίνωσης ελεύθερων ριζών οξυγόνου (Καραμπουρνιώτης 2003). Παρόλο που ο μηχανισμός αποτοξίνωσης μέσω των φυτοχηλατινών δεν είναι πλήρως γνωστός είναι πιθανόν να δεσμεύουν τα μέταλλα στο κυτταρόπλασμα και να τα μεταφέρουν στο χυμοτόπιο (Raskin et al. 1994, Lasat 2000, Choi et al. 2001, Hall 2002, Καραμπουρνιώτης 2003, Peer et al. 2005, Nascimento & Xing 2006, Sharma & Dietz 2006, Vázquez et. al. 2006, Γαλάτης και λοιποί 2009, Wahid et al. 2009). Εκεί λόγω του όξινου pH τα μέταλλα απελευθερώνονται επιτρέποντας στο πεπτίδιο να επιστρέψει στο κυτταρόπλασμα. Τα μεταλλικά ιόντα στο χυμοτόπιο, έπειτα, δεσμεύονται και καθιζάνουν από τα υπάρχοντα οργανικά οξέα (Καραμπουρνιώτης 2003). Πολλές έρευνες έχουν δείξει ότι οι φυτοχηλατίνες συντελούν πολύ σημαντικό ρόλο στην αποτοξίνωση από το Cd και στην αντοχή των φυτών στο κάδμιο. Από την άλλη, έρευνες έδειξαν ότι η ανθεκτικότητα στο Cd που παρουσιάζουν τα φυτά *Silene vulgaris* και *Thlaspi caerulescens* δεν οφείλεται στις φυτοχηλατίνες (Vázquez et. al. 2006). Ανάλογο ρόλο με αυτόν των φυτοχηλατινών παίζουν και οι μεταλλοθειονίνες (MT) (Καραμπουρνιώτης 2003).

5. **Η ενεργός μεταφορά και η απομόνωσή τους στο χυμοτόπιο**, αποτελεί σημαντικό μηχανισμό αποτοξίνωσης (Raskin et al. 1994, Prasad 1995, Salt et al. 1998, Lasat 2000, Choi et al. 2001, Orcutt & Nilsen 2000, Hall 2002, Nascimento & Xing 2006, Sharma & Dietz 2006, Γαλάτης και λοιποί 2009, Wahid et al. 2009). Έχει παρατηρηθεί ότι όχι μόνο το συμπλοκοποιημένο Cd αλλά και το ελεύθερο μεταφέρεται και απομονώνεται στο χυμοτόπιο και η μεταφορά αυτή φαίνεται ότι πραγματοποιείται μέσω ενός Cd/H^+ αντιμεταφορέα. (Raskin et al. 1994, Wahid et al. 2009). Η απομόνωση των μετάλλων στα φυτικά τριχώματα (trichomes)-επιδερμικούς ιστούς με ποικίλη λειτουργία- φαίνεται να αποτελεί επίσης μηχανισμό αποτοξίνωσης για το Cd, το Mn και τον Pb (Salt et al. 1998, Choi et al. 2001). Στο φυτό *Eichhornia crassipes* παρατηρείται ενσωμάτωση του Cd στους κρυστάλλους οξαλικού ασβεστίου στα ιδιόβλαστα κύτταρα (Mazen & El Maghraby 1997 στο: Choi et al. 2001) ενώ και στο φυτό *Armeria maritima* τα μέταλλα συσσωρεύονται στα χυμοτόπια των ιδιόβλαστων κυττάρων και εκκρίνονται μέσω των αλαταδένων των φύλλων (Neumann et al. 1995 στο: Choi et al. 2001). Η έκκριση των μετάλλων, όμως, από τους αλαταδένες θα παρουσιαστεί πιο εκτεταμένα παρακάτω.
6. **Τα μυκόρριζα** και ιδιαίτερα τα εκτομυκόρριζα στα φυτά, μπορεί να συμβάλλουν σημαντικά στην αντιμετώπιση της τοξικότητας των μετάλλων αποκλείοντας και

περιορίζοντας τη μετακίνηση των μετάλλων στις ρίζες του φυτού-ξενιστή. Αυτοί οι μηχανισμοί περιλαμβάνουν την απορρόφηση των μετάλλων από τις υφές των μυκόρριζων, μείωση της πρόσβασης στον αποπλάστη λόγω της υδροφοβικότητας που παρουσιάζουν οι υφές, χηλίωση των μετάλλων από τις εκκρίσεις τους και προσρόφηση στο εξωτερικό μηκύλιο. Για παράδειγμα, οι Colpaert & Van Assche παρατήρησαν ότι η εκτομυκόρριζα *Paxillus involutus* κατακρατούσε τον Zn και έτσι μειωνόταν η συγκέντρωση του στο *Pinus sylvestris*. Οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούν τα μυκόρριζα για την αντιμετώπιση της τοξικότητας των μετάλλων είναι πιθανόν όμοιοι με αυτούς που χρησιμοποιούν τα ανώτερα φυτά (Orcutt & Nilsen 2000, Hall 2002).

7. **Η απομάκρυνση των μετάλλων** μέσω της έκπλυσης με τη βροχή ή μέσω της απόρριψης των φύλλων ή των τριχωμάτων στα οποία είχαν συσσωρευτεί επίσης αναφέρεται από κάποιους ερευνητές ως μηχανισμός αποτοξίνωσης των φυτών (Alloway 1995, Orcutt & Nilsen 2000).
8. **Η έκλυση στην ατμόσφαιρα.** Για μερικά μέταλλα (πχ. Hg, Se) η εξάχνωσή τους στην ατμόσφαιρα μέσω των στομάτων των φύλλων, είναι δυνητικά ένας μηχανισμός αντοχής (Salt et al. 1998, Orcutt & Nilsen 2000, Peer et al. 2005, Γαλάτης και λοιποί 2009). Η λεύκη, για παράδειγμα, μπορεί να εκλύει Hg από τα φύλλα της στον αέρα και μάλιστα έχει δημιουργηθεί διαγονιδιακή λεύκη με ικανότητα να εκλύει από το φύλλο 10 φορές περισσότερο Hg απ' ό,τι το άγριο φυτό (Peer et al. 2005, Γαλάτης και λοιποί 2009).
9. **Ανθεκτικά στα μέταλλα ένζυμα** (Orcutt & Nilsen 2000, Καραμπουρνιώτης 2003, Wahid et al. 2009) και αλλαγές στη σύσταση των μεμβρανών των οργανιδίων μέσα στο κύτταρο ώστε να εμποδίζεται η είσοδος των μετάλλων (Orcutt & Nilsen 2000).

Μερικοί πιθανοί μηχανισμοί αποφυγής ή ανθεκτικότητας στα βαρέα μέταλλα παρουσιάζονται στην Εικόνα 1 παρακάτω.



Εικόνα 1. Πιθανοί μηχανισμοί αποφυγής ή ανθεκτικότητας σε βαρέα μέταλλα. 1) καθήλωση των μεταλλικών ιόντων στο κυτταρικό τοίχωμα, 2) είσοδος και δέσμευση των ιόντων υπό μορφή χηλικών συμπλόκων (Φ: φυτοχηλατίνη, Ο: οργανικό οξύ) και μεταφορά τους στο χυμοτόπιο, 3) απέκκριση οργανικών οξέων και δημιουργία χηλικών συμπλόκων με τα μεταλλικά ιόντα στη ριζόσφαιρα 4) σύνδεση ανθεκτικών ενζυμικών μορίων (E), 5) ενεργός μεταφορά στον αποπλάστη (Καραμπουρνιώτης 2003).

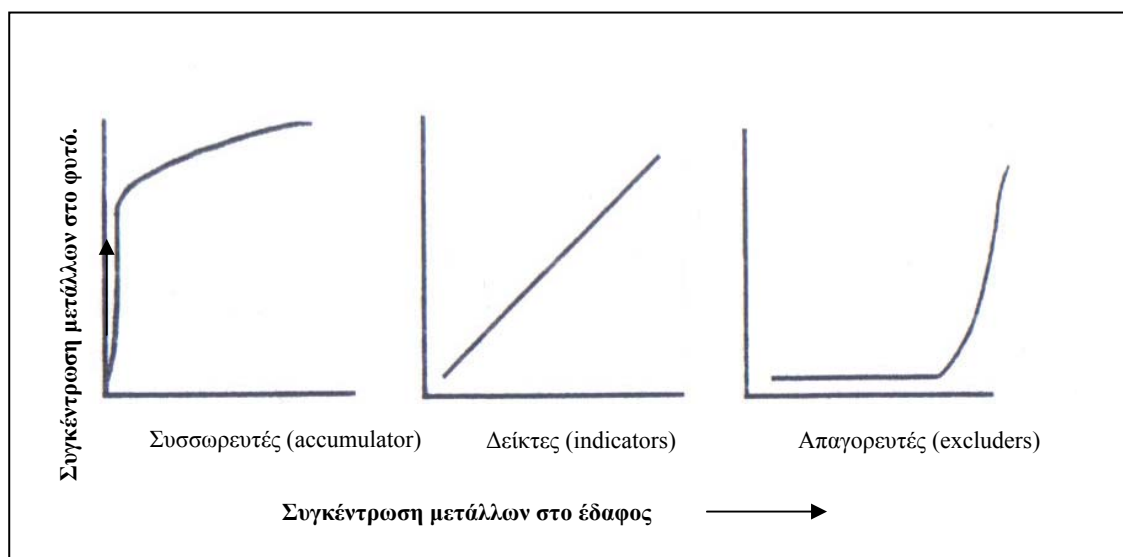
Οι μηχανισμοί αυτοί που αναπτύσσουν τα φυτά για την αντιμετώπιση της καταπόνησης από βαρέα μέταλλα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε μηχανισμούς: **αποφυγής** (avoidance) και μηχανισμούς **ανθεκτικότητας** (tolerance) (Prasad 1995, Καραμπουρνιώτης 2003, Γαλάτης και λοιποί 2009).

Στρατηγική αποφυγής. Τα φυτά τα οποία έχουν επιλέξει τη στρατηγική της αποφυγής αποκλείουν τα βαρέα μέταλλα στο εξωτερικό τους περιβάλλον. Τα τοξικά μεταλλικά ιόντα είτε δεσμεύονται και εξουδετερώνονται στο περιβάλλον της ριζόσφαιρας από χηλικές ενώσεις (πχ οργανικά οξέα όπως το μηλικό) οι οποίες εκκρίνονται από τα κύτταρα της ρίζας, είτε αποκλείονται στο εξωτερικό περιβάλλον λόγω της υψηλής εκλεκτικότητας που παρουσιάζουν οι μεμβράνες των κυττάρων της ρίζας. Σε ορισμένα είδη υπάρχει και η δυνατότητα καθήλωσης των μεταλλικών ιόντων στα κυτταρικά τοιχώματα των κυττάρων της ρίζας (π.χ. στις καρβοξυλικές ομάδες των συστατικών της πηκτίνης) πριν αυτά εισέλθουν στο κυτταρόπλασμα (Καραμπουρνιώτης 2003).

Στρατηγική ανθεκτικότητας. Τα φυτά της κατηγορίας αυτής προσλαμβάνουν τα τοξικά μέταλλα και έχουν την ικανότητα να τα συσσωρεύουν στους ιστούς τους σε υψηλές συγκεντρώσεις οι οποίες θα προκαλούσαν τον κυτταρικό θάνατο στα ευαίσθητα είδη. Η λειτουργία των μηχανισμών ανθεκτικότητας καθορίζεται γενετικά, ωστόσο μπορεί να

διαφοροποιηθεί μέσω εγκλιματισμού. Στους μηχανισμούς ανθεκτικότητας κατατάσσεται και η δέσμευση των μετάλλων με την μορφή χηλικών συμπλόκων και η μεταφορά τους στο χυμοτόπιο που αναφέρθηκε πιο πάνω (Καραμπουρνιώτης 2003).

Τα φυτά που αναπτύσσονται σε εδάφη με υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων ονομάζονται **μεταλλόφυτα**. Τα μεταλλόφυτα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε *απαγορευτές* (excluders), *δείκτες* (indicators) και *συσσωρευτές* (accumulators) αν λάβουμε υπόψη τη συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων στο υπέργειο τμήμα τους σε σχέση με τη συγκέντρωση των μετάλλων στο έδαφος (Εικόνα 2). Οι *απαγορευτές* αποτρέπουν την είσοδο των μετάλλων στα υπέργεια τμήματά τους παρόλο που μπορούν να συσσωρεύουν υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων στις ρίζες τους. Αυτό συμβαίνει έως ένα σημείο από το οποίο και έπειτα η συγκέντρωση των μετάλλων στα υπέργεια τμήματά τους αρχίζει να αυξάνει. Η συγκέντρωση των μετάλλων στους ιστούς των φυτών - *δεικτών* απεικονίζει τη συγκέντρωση των μετάλλων στο έδαφος, αφού αυτά προσλαμβάνουν τα μέταλλα σε γραμμικό ποσοστό σε σχέση με τη συγκέντρωσή τους στο έδαφος. Οι *συσσωρευτές* μετάλλων μπορούν να συσσωρεύουν μέταλλα στα υπέργεια τμήματά τους σε πολύ μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από αυτές του εδάφους ή των υπέργειων τμημάτων φυτών μη-συσσωρευτών (Raskin et al. 1994, Prasad 1995, Lasat 2000, Orcutt & Nilsen 2000, Καραμπουρνιώτης 2003, Gosh & Singh 2005, Peer et al. 2005, Γαλάτης και λοιποί 2009, Jadia & Fulekar 2009).



Εικόνα 2. Στρατηγικές των φυτών για την αντιμετώπιση των υψηλών συγκεντρώσεων μετάλλων στο έδαφος. Ανατύπωση από τον Baker 1981 στο: Orcutt & Nilsen 2000)

2.2.2. Καταπόνηση αλατότητας στα φυτά

Ο όρος αλατότητα (salinity) αναφέρεται στην ύπαρξη υψηλών συγκεντρώσεων ιόντων (κατά κανόνα Na^+ και Cl^-), κυρίως στο περιβάλλον της ρίζας. Η αλατότητα του εδάφους μετράται ως ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) σε μονάδες deciSiemens ανά μέτρο (dS m^{-1}) ή millimhos ανά εκατοστόμετρο (mmhos cm^{-1}). Ως αλατούχα εδάφη θεωρούνται εκείνα των οποίων η EC είναι υψηλότερη των 4 dS m^{-1} , που ισοδυναμεί με μία συγκέντρωση περίπου 40 mM NaCl (Καραμπουρνιώτης 2003).

Η αλάτωση του εδάφους ως παράγοντας καταπόνησης παρουσιάζεται σε εκτεταμένες περιοχές του πλανήτη: **i.** Περιοχές οι οποίες συνήθως διαβρέχονται από θαλασσίνο νερό (αλίπεδα ή υφάλμυρα έλη), **ii.** Ερημικές περιοχές στα εδάφη των οποίων συσσωρεύονται άλατα επειδή ο ρυθμός εξάτμισης του νερού είναι κατά πολύ υψηλότερος του ρυθμού βροχόπτωσης και **iii.** Υπερβολικά αρδευόμενες γεωργικές εκτάσεις, στις οποίες παρατηρείται συσσώρευση ιόντων στο έδαφος λόγω έντονης εξατμισοδιαπνοής (Καραμπουρνιώτης, 2003). Υπολογίζεται ότι η υψηλή αλατότητα έχει επηρεάσει περίπου 1 δισεκατομμύριο εκτάρια γης, κυρίως σε ερημικές και ημιερημικές περιοχές, και ότι κάθε χρόνο προστίθεται σε αυτές 20 εκατομμύρια εκτάρια επιπλέον με μηδενική παραγωγικότητα. Αλατούχα εδάφη διάφορων βαθμών αλατότητας εκτείνονται σε 80 εκατομμύρια εκτάρια στην Μεσογειακή λεκάνη ενώ η αύξηση του πληθυσμού μαζί με την αυξανόμενη υποβάθμιση των εδαφών από την εντατική γεωργία επιδεινώνουν την κατάσταση (Choukr-Allah 1997).

Η καταπόνηση λόγω αλατότητας επιδρά δυσμενώς σε τρία διαφορετικά επίπεδα:

- Αλλοιώνονται τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Επηρεάζεται δυσμενώς το πορώδες και κατά συνέπεια ο αερισμός και η ηλεκτρική αγωγιμότητα.
- Εμφανίζεται οσμωτική καταπόνηση λόγω της υψηλής συγκέντρωσης ιόντων στο έδαφος και ως εκ τούτου τη δημιουργία χαμηλού υδατικού δυναμικού στο έδαφος.
- Τα ιόντα Na^+ και Cl^- , αυτά καθαυτά, παρουσιάζουν τοξικότητα για τα φυτά (Καραμπουρνιώτης 2003).

2.2.2.1. Επιπτώσεις υψηλής αλατότητας στα φυτά

Η άμεση επίδραση της υψηλής συγκέντρωσης ιόντων στα φυτά διαφέρει για κάθε ιόν, έτσι τα ιόντα Na^+ είναι πιο τοξικά από αυτά του Ca^{+2} και τα ιόντα του S^- είναι πιο τοξικά από αυτά του Cl^- (Orcutt & Nilsen 2000). Οι επιπτώσεις παρατηρούνται στην ενζυμική δραστηριότητα, στη λειτουργία των μεμβρανών και σε διάφορες σημαντικές

μεταβολικές διεργασίες των φυτών, εμποδίζοντας την ανάπτυξή τους. Γενικότερα προκαλείται:

- i. Παρεμπόδιση της λειτουργίας των ενζύμων (Orcutt & Nilsen 2000, Καραμπουρνιώτης 2003, Jithesh et al. 2006).
- ii. Ανισορροπία στην πρόσληψη και μεταφορά των θρεπτικών στοιχείων. Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι η υψηλή αλατότητα επιφέρει έλλειψη θρεπτικών όπως τα: K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , P και N (Orcutt & Nilsen 2000, Καραμπουρνιώτης 2003). Επίσης προκαλείται μείωση της βιοδιαθεσιμότητας του Cu, Fe, Mn, Zn λόγω της μικρής διαλυτότητάς τους στα αλατούχα ή αλκαλικά εδάφη με αποτέλεσμα την έλλειψή τους, ενώ προκαλείται διαλυτοποίηση του B, Mo, Se, σε αλατούχα εδάφη, με αποτέλεσμα τη συσσώρευσή τους στους φυτικούς ιστούς σε περίσσειες ποσότητες που μπορούν να οδηγήσουν σε τοξικότητα (Orcutt & Nilsen 2000).
- iii. Δυσλειτουργία των κυτταρικών μεμβρανών (Orcutt & Nilsen 2000, Καραμπουρνιώτης 2003, Jithesh et al. 2006, Γαλάτης και λοιποί 2009). Το Na^+ αντικαθιστά το Ca^{+2} στις μεμβράνες αλλάζοντας την περατότητα τους και προκαλώντας διαρροή χρησίμων ιόντων στο περιβάλλον μέσο (Orcutt & Nilsen 2000, Γαλάτης και λοιποί 2009).
- iv. Δυσλειτουργία στις διαδικασίες της αναπνοής και της φωτοσύνθεσης (Orcutt & Nilsen 2000, Καραμπουρνιώτης 2003, Jithesh et al. 2006). Η αναστολή της αναπνοής συνδέεται πρωτογενώς με την επίδραση των αλάτων στη λειτουργία των ενζύμων. Η υψηλή συγκέντρωση αλάτων στους ιστούς επηρεάζει άμεσα τα φωτοσυνθετικά ένζυμα και έμμεσα την ανταλλαγή των αερίων και τις φωτεινές αντιδράσεις. Επίσης έχει αναφερθεί ότι επιδρά στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης μέσω της επίδρασης στη λειτουργία των στομάτων των φυτών (Orcutt & Nilsen 2000).
- v. Επηρεάζει το οσμωτικό δυναμικό και προκαλεί οσμωτική καταπόνηση. Τα χαμηλά οσμωτικά δυναμικά που δημιουργούνται στο έδαφος, λόγω της συγκέντρωσης των ιόντων, παρακρατούν το διαθέσιμο νερό, συνεπώς τα φύλλα πρέπει να αποκτήσουν ακόμα χαμηλότερο οσμωτικό δυναμικό για να διατηρήσουν τη διαβάθμιση υδατικού δυναμικού στο σύστημα έδαφος-ρίζα-φυτό και ως εκ τούτου η αντοχή στην ξηρασία και στην αλατότητα συσχετίζονται άμεσα (Bajji et al. 1998, Orcutt & Nilsen 2000, Καραμπουρνιώτης 2003, Jithesh et al. 2006, Γαλάτης και λοιποί 2009).
- vi. Η δημιουργία ενεργών μορφών οξυγόνου (ROS) με αποτέλεσμα την εμφάνιση οξειδωτικής καταπόνησης (Orcutt & Nilsen 2000, Καραμπουρνιώτης 2003, Jithesh et al. 2006).

2.2.2.2. Προσαρμογή των φυτών στην καταπόνηση από αλατότητα και μηχανισμοί αντιμετώπισης

Η ανθεκτικότητα των φυτών στην υψηλή συγκέντρωση των αλάτων αναπτύχθηκε σε πολλές τάξεις των αγγειόσπερμων καθώς επιπλέον φαίνεται να αναπτύχθηκε και πολλές φορές στην ιστορία τους. Ο Aronson (1990) υπολόγισε περισσότερες από 100 οικογένειες που περιλαμβάνουν ανθεκτικά στην αλατότητα φυτά και ενώ στις περισσότερες οικογένειες υπάρχουν λιγότερα από 10 ανθεκτικά φυτά, στην οικογένεια Chenopodiaceae καταγράφονται πάνω από 350 είδη (Orcutt & Nilsen 2000). Ο Le Houerou (1993 στο: Glenn et al. 1999) υπολόγισε τον αριθμό τους σε 5000-6000 παγκοσμίως. Στον Πίνακα 3 φαίνονται οι σημαντικότερες οικογένειες που περιλαμβάνουν περισσότερα από 10 ανθεκτικά στην αλατότητα είδη (Orcutt & Nilsen 2000).

Πίνακας 3. Οι σημαντικότερες οικογένειες φυτών με περισσότερα από 10 ανθεκτικά στην υψηλή αλατότητα είδη (τροποποιημένος από Orcutt & Nilsen, 2000).

Οικογένεια	Παράδειγμα γένους	Αριθμός ειδών
Aizoaceae	<i>Mesembreanthemum</i>	52
Apiaceae	<i>Crithmum</i>	18
Arecaceae	<i>Cocos, Phoenix</i>	28
Asteraceae	<i>Aster, Parthenium</i>	67
Avicenniaceae	<i>Avicennia</i>	12
Boraginaceae	<i>Cortesia</i>	10
Brassicaceae	<i>Cakile, Lepidium</i>	30
Caesalpinaceae	<i>Caesalpinia, Intsia</i>	12
Caryophyllaceae	<i>Honkenya, Spergularia</i>	18
Chenopodiaceae	<i>Salicornia, Atriplex, Sueda</i>	368
Combretaceae	<i>Lumnitzera</i>	12
Convolvulaceae	<i>Cressa, Ipomoea</i>	15
Cymodoceaceae	<i>Cymbodocea, Halodule</i>	17
Cyperaceae	<i>Eleocharis, Scirpus</i>	49
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia, Exoecaria</i>	22
Frankeniaceae	<i>Frankenia</i>	15
Hydrocharitaceae	<i>Halophila</i>	10
Juncaceae	<i>Juncus</i>	14
Malvaceae	<i>Pavonia, Thespesia</i>	19

Mimosaceae	<i>Acacia, Prosopis</i>	20
Myoporaceae	<i>Eremophila, Myoporum</i>	12
Mytaceae	<i>Eucalyptus, Melaleuca</i>	22
Pandanaceae	<i>Pandanus</i>	12
Papiloneaceae	<i>Lotus, Dalbergia</i>	46
Plantaginaceae	<i>Plantago</i>	14
Plumbaginaceae	<i>Limonium, Aegialitis</i>	57
Poaceae	<i>Spartina, Leptochloa</i>	135
Polygonaceae	<i>Coccoloba, Polygonum</i>	11
Potamogetonaceae	<i>Cymadocea, Potamogeton</i>	10
Rhizophoraceae	<i>Bruguiera, Rhizophora</i>	26
Scrophulariaceae	<i>Bacopa, Gerardia</i>	22
Solanaceae	<i>Lycium</i>	24
Tamaricaceae	<i>Tamarix</i>	39
Zosteraceae	<i>Phyllospadix, Zostera</i>	18
Zygophyllaceae	<i>Nitraria, Zygophyllum</i>	27

Σύμφωνα με πολλούς ερευνητές (Orcutt & Nilsen 2000, Jithesh et al. 2006, Hameed et al. 2010, Manousaki & Kalogerakis 2010) τα φυτά που παρουσιάζουν αντοχή σε υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων ονομάζονται **Αλόφυτα** (Halophytes) ενώ αυτά που είναι ευαίσθητα στην αυξημένη συγκέντρωση αλάτων ονομάζονται **Γλυκόφυτα** (Glycophytes). Ωστόσο, αυτός ο όρος δεν είναι γενικά αποδεκτός. Για παράδειγμα, κάποιοι ορίζουν ως αλόφυτα τα φυτά που είναι ανθεκτικά σε υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων και επιπλέον είναι ικανά να συσσωρεύουν σχετικά υψηλές ποσότητες από Na^+ και Cl^- στους ιστούς τους ενώ γλυκόφυτα αυτά που έχουν μικρή αντοχή σε αυξημένη αλατότητα και δεν συσσωρεύουν άλατα στους ιστούς τους. Επίσης κατηγοριοποιούνται σε **υποχρεωτικά αλόφυτα** (obligate halophytes) τα οποία αναπτύσσονται καλά σε υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων ενώ έχουν μειωμένη ανάπτυξη σε χαμηλές συγκεντρώσεις αλάτων και τα **δυσνητικά αλόφυτα** (facultative halophytes), όπως το *Mesembrythemum crystallinum*, στο οποίο οι μεταβολικές διεργασίες των αλόφυτων λαμβάνουν μέρος αφού εκτεθεί σε μέτριες συγκεντρώσεις αλάτων (Orcutt & Nilsen 2000).

Ο Glenn και οι συνεργάτες του, στην ανασκόπησή τους το 1999, αναφέρουν ότι δεν είναι δυνατό να υπολογιστεί ο ακριβής αριθμός των Αλόφυτων διότι, εν μέρει, υπάρχει πρόβλημα στον καθορισμό του χαμηλότερου ορίου ανθεκτικότητας όπου ένα φυτό θεωρείται αλόφυτο.

Τα Αλόφυτα έχουν αναπτύξει δύο κύριους μηχανισμούς για την αντιμετώπιση της υψηλής αλατότητας: την *Ανθεκτικότητα* (salt tolerance) δηλαδή την ικανότητα να διατηρούν φυσιολογικούς μεταβολικούς ρυθμούς ακόμα και με την παρουσία, ενδοκυτταρικά, υψηλών επιπέδων αλάτων και την *Αποφυγή* (salt avoidance) κατά την οποία τα φυτά δεν επιτρέπουν την είσοδο των ιόντων μέσα στα κύτταρά τους (Καραμπουρνιώτης 2003, Manousaki & Kalogerakis 2010). Η αντοχή των φυτών στην υψηλή αλατότητα δεν καθορίζεται από συγκεκριμένα γονίδια ή από μία συγκεκριμένη μεταβολική διαδικασία αλλά από την απόκριση του φυτού συνολικά, όπου πολλές και σύνθετες διεργασίες λαμβάνουν μέρος (Breckle 2002).

Μηχανισμός Ανθεκτικότητας

Τα φυτά που έχουν επιλέξει τη στρατηγική της *ανθεκτικότητας* στηρίζονται στην πρόσληψη και συσσώρευση αλάτων εντός των κυττάρων τους, ώστε να αντισταθμιστεί το χαμηλό δυναμικό νερού του εδάφους και να επιτυγχάνονται ικανοποιητικές πιέσεις σπαργής (Orcutt & Nilsen 2000, Καραμπουρνιώτης 2003, Dajic 2006, Γαλάτης και λοιποί 2009, Hameed et al. 2010). Τα φυτά αυτά αντιμετωπίζουν την τοξικότητα των υψηλών συγκεντρώσεων των ιόντων μέσα στα κύτταρά τους είτε προσλαμβάνοντας μεγαλύτερη αναλογία νερού ως προς την ξηρή τους βιομάζα (succulence) (Orcutt & Nilsen 2000, Breckle 2002, Dajic 2006), είτε μεταφέροντας τα ιόντα Na^+ και Cl^- στα χυμοτόπια (salt compartmentation) (Glenn et al. 1999, Orcutt & Nilsen 2000, Καραμπουρνιώτης 2003, Dajic 2006, Γαλάτης και λοιποί 2009, Hameed et al. 2010, Manousaki & Kalogerakis, 2010). Η *Salicornia europaea* έχει παρατηρηθεί να συσσωρεύει άλατα στο κεντρικό χυμοτόπιο, στο μεσόφυλλο, ακόμα και σε συγκεντρώσεις που φτάνουν τα 1000 mM (Orcutt & Nilsen 2000). Η μεταφορά των ιόντων στο χυμοτόπιο γίνεται μέσω του αντιμεταφορέα Na^+/H^+ που εδράζεται στον τονοπλάστη. Η λειτουργία αυτού του αντιμεταφορέα προϋποθέτει μια διαβάθμιση ηλεκτροχημικού δυναμικού κατά μήκος του τονοπλάστη, η οποία προέρχεται κυρίως από διαβαθμίσεις του pH, που δημιουργούνται από τη δράση αντλιών H^+ . Ανάμεσα στις αντλίες που ενεργοποιούν τους αντιμεταφορείς Na^+/H^+ είναι η H^+ -ΑΤΡάση της πλασματικής μεμβράνης, η H^+ -ΑΤΡάση του χυμοτοπίου και η H^+ - πυροφωσφατάση (H^+ -PPάση) του τονοπλάστη (Γαλάτης και λοιποί 2009). Τα φυτά θα πρέπει να έχουν και πρόσθετους μηχανισμούς άντλησης άλλων ιόντων, κυρίως K^+ το οποίο είναι συνήθως σε έλλειψη, σε αλατούχα εδάφη. Έχει παρατηρηθεί ότι ο μεταφορέας υψηλής συγγένειας K^+ , ο HKT1, δρα επίσης ως ισχυρός συμμεταφορέας K^+/Na^+ . Σε υψηλές συγκεντρώσεις εξωγενούς Na^+ , όμως, η μεταφορά K^+ σταματά και ο

ΗΚΤ1 συμπεριφέρεται ως χαμηλής συγγένειας σύστημα πρόσληψης Na^+ . Εφόσον όμως υπάρχει στο έδαφος αρκετό Ca^{2+} , αυτό ενεργοποιεί έναν υψηλής συγγένειας μηχανισμό για το K^+ , οπότε τα φυτά προσλαμβάνουν K^+ παρά Na^+ (Γαλάτης και λοιποί 2009).

Έπειτα, το δυναμικό του νερού του κυτοπλάσματος με αυτό του χυμοτοπίου εξισορροπείται με μηχανισμούς οσμωρύθμισης ή οσμωτικής εξισορρόπησης. Η οσμωρύθμιση στο κυτόπλασμα επιτυγχάνεται με τη σύνθεση συμβατών οσμωλυτών χαμηλού μοριακού βάρους (Orcutt & Nilsen 2000, Rhodes et al. 2002, Καραμπουρνιώτης 2003, Dajic 2006, Jithesh et al. 2006, Ben Hassine et al. 2009, Γαλάτης και λοιποί 2009, Hameed et al. 2010, Manousaki & Kalogerakis 2010). Οι συχνότεροι είναι σάκχαρα, πολυαμίνες, μεθυλιωμένες ινοσιτόλες, πολυόλες-πολυυδατωμένες αλκοόλες, όπως η σορβιτόλη, ή φορτισμένοι μεταβολίτες όπως η βεταΐνη της γλυκίνης (glycinebetaine) και η προλίνη (proline). Σε μία σχετικά πρόσφατη μελέτη (Lefèvre et al. 2009) πρώτη φορά παρουσιάζεται ότι η παρουσία καδμίου μπορεί να διεγείρει τη σύνθεση της βεταΐνης της γλυκίνης η οποία είναι και ο πιο σημαντικός οσμωλύτης στην οικογένεια Chenopodiaceae. Σημαντικότατο ποσοστό άνθρακα δαπανάται από το φυτό για τη σύνθεση των οσμωλυτών οι οποίοι διαμερισματοποιούνται στο κυτταρόπλασμα και στις κοιλότητες των οργανιδίων προσφέροντας ζωτική οσμωτική εξισορρόπηση μεταξύ τους και με το χυμοτόπιο (Γαλάτης και λοιποί 2009). Όπως αναφέρεται στους Ben Hassine et al. (2009), η συσσώρευση προλίνης και βεταΐνης της γλυκίνης έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς αυτές οι ενώσεις είναι πιθανό να μειώνουν τις επιπτώσεις των ενεργών μορφών οξυγόνου (ROS), να προστατεύουν τα ένζυμα ή να εμπλέκονται στην μεταφορά του σήματος κάποιας καταπόνησης.

Εκτός από τη συμμετοχή τους στην οσμωτική εξισορρόπηση, πιθανολογείται ότι η συσσώρευση οσμωλυτών λειτουργεί επίσης προστατευτικά στην έλλειψη νερού. Επειδή οι οσμωλύτες είναι υδρόφιλοι μπορούν να υποκαταστήσουν το ελλείπον νερό στο πρωτεϊνικό κέλυφος ή στις μεμβράνες δρώντας, δηλαδή, ως οσμωπροστάτες (osmoprotectors) (Καραμπουρνιώτης 2003, Γαλάτης και λοιποί 2009).

Είναι επίσης γνωστό ότι κάποια Αλόφυτα μπορούν να αλλάζουν τη φωτοσύνθεσή τους από C_3 σε CAM (Crassulacean Acid Metabolism) φωτοσύνθεση, όταν αντιμετωπίσουν υψηλή αλατότητα ή έλλειψη νερού. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το *Mesembryanthemum crystallinum*, στο οποίο έπειτα από 10 μέρες στρες ενεργοποιείται η CAM φωτοσύνθεση, τα στόματα μένουν ανοιχτά μόνο το βράδυ και η σπαργή των κυττάρων επανέρχεται (Orcutt & Nilsen 2000, Lovelock & Ball, 2002).

Μηχανισμός Αποφυγής

Ο μηχανισμός της Αποφυγής πραγματοποιείται, είτε επειδή οι ρίζες του φυτού παρουσιάζουν χαμηλή περατότητα στα άλατα (salt exclusion) π.χ. όπως στο είδος *Rhizophora mangle*, είτε με την είσοδο των αλάτων και την έκκρισή τους (salt evasion) από εξειδικευμένους αλατώδεις αδένες ή κύστεις των φύλλων, π.χ. στο είδος *Tamarix* (Breckle 2002, Καραμπουρνιώτης 2003, Hameed et al. 2010, Manousaki & Kalogerakis 2010). Επιπροσθέτως, έχει παρατηρηθεί και η έκκριση των αλάτων από αδένες στον βλαστό, όπως στο φυτό *Melaleuca cuticularis* (Twomey et al. 2008).

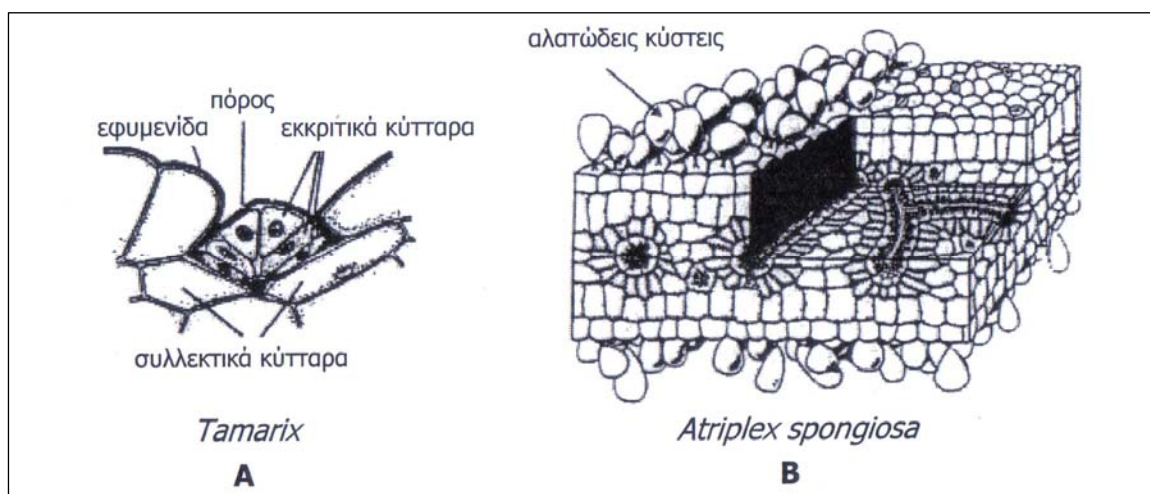
Η ικανότητα των φυτών να ρυθμίζουν την απορρόφηση και τη μεταφορά των αλάτων εξαρτάται από τους εξής μηχανισμούς: α) την επιλεκτικότητα των κυττάρων των ριζών, β) την τάση να προσλαμβάνουν K^+ παρά Na^+ μέσα στο ξύλωμα (xylem) από τα κύτταρα της στήλης (stele), γ) την απομάκρυνση των αλάτων, διαμέσου του ξυλώματος, από τα ανώτερα τμήματα των ριζών, τον βλαστό και τα φύλλα, μέσω της ανταλλαγής του Na^+ με το K^+ και δ) της επανα-μεταφοράς των ιόντων διαμέσου του φλοιώματος από τον βλαστό προς τις ρίζες. Η απομάκρυνση μέσω του φλοιώματος μπορεί να αποτελεί το 25 % του συνολικού Na^+ που έχει απορροφηθεί από τα φύλλα (Dajic 2006). Η αντοχή των φυτών που αποκλείουν τα άλατα επηρεάζεται και από τα ιόντα Ca^{+2} του εδάφους αφού η πρόσληψη Ca^{+2} από τα ριζικά κύτταρα οδηγεί σε μείωση της πρόσληψης άλλων μονοσθενών κατιόντων (Dajic 2006).

Πολλά από τα φυτά που έχουν επιλέξει τη στρατηγική της αποφυγής, έχουν αναπτύξει διάφορους εκκριτικούς μηχανισμούς (ή αδενικά τριχώματα, glandular trichomes) ώστε να απομακρύνουν τα άλατα από τα κύτταρά τους. Οι εκκριτικοί μηχανισμοί μπορεί να είναι ποικίλων μορφών (Fahn 1988, Toderich et al. 2002) αλλά σύμφωνα με τους Orcutt & Nilsen (2000) μπορούν να αναγνωριστούν 3 κύρια είδη εκκριτικών δομών: οι αλατώδεις αδένες (salt glands), οι κύστεις (salt bladders) και οι αλαταδένες των εντομοφάγων φυτών οι οποίοι χρησιμεύουν, εκτός από τη ρύθμιση της ομοιόστασης και στην έκκριση ενζύμων χώνεψης. Οι κύστεις και οι αλατώδεις αδένες προέρχονται από τον επιδερμικό ιστό και έχουν παρόμοια φυσιολογική λειτουργία αλλά είναι ανατομικά διαφορετικοί (Orcutt & Nilsen 2000).

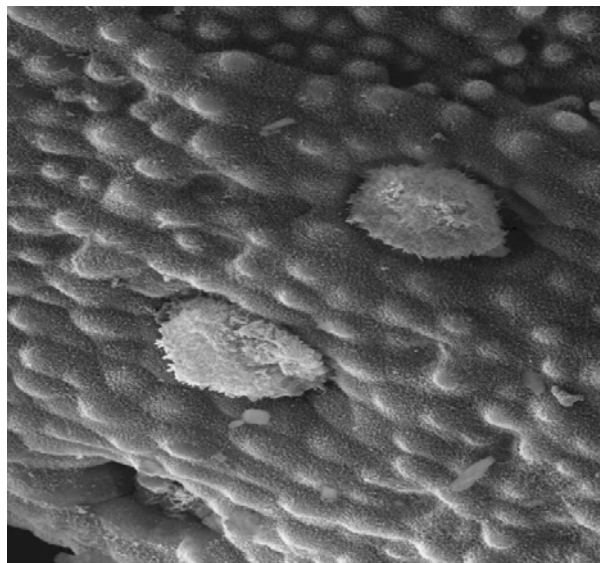
Οι αλατώδεις αδένες (Εικόνα 3 & 4) βρίσκονται στην επιφάνεια των φύλλων, έχουν περίπου το μέγεθος των στομάτων και μπορεί να είναι άφθονοι, φτάνοντας ακόμα και τους 1000 ανά cm^2 φυλλικής επιφανείας (Orcutt & Nilsen 2000). Υπάρχουν αλατώδεις αδένες που αποτελούνται από 2 κύτταρα, όπως στα *Spartina*, ή πολυκύτταροι, όπως στα *Tamarix*, *Frankenia*, *Limonium* (Fahn 1988, Orcutt & Nilsen 2000, Dajic 2006, Hameed et

al. 2010). Φυτά με αλατώδεις αδένες, εκτός από αυτά που αναφέρονται προηγουμένως, συναντάμε στα γένη: *Cressa*, *Limoniastrum*, *Plumbago*, *Reaumuria*, *Acanthus*, *Avicennia*, *Aegialitis*, *Ipomoea* κ.τ.λ. (Breckle 2002).

Οι αλατώδεις κύστεις (Εικόνα 3) αποτελούνται συνήθως από 2 κύτταρα, το μισχοειδές κύτταρο (stalk cell) και το κυστικό κύτταρο (Bladder cell). Μέσω του μισχοειδούς κυττάρου γίνεται η μεταφορά των ιόντων στο κυστικό κύτταρο, το οποίο έχει ένα μεγάλο κεντρικό χυμοτόπιο και στο οποίο συσσωρεύονται τα ιόντα (Fahn 1988, Orcutt & Nilsen 2000, Hameed et al. 2010). Αλατώδεις κύστεις είναι γνωστό ότι υπάρχουν σε πολλά είδη της οικογένειας *Chenopodiaceae* με χαρακτηριστικό παράδειγμα τα φυτά του γένους *Atriplex*. Για παράδειγμα, σε φυτά του γένους *Atriplex* περισσότερο από το 50% της συγκέντρωσης του Cl^- των φύλλων τους, απομακρύνεται μέσω των αλατωδών κύστεων (Breckle 2002). Οι κύστεις τελικά θραύονται και τα άλατα κρυσταλλώνονται στην επιφάνεια των φύλλων ή επιστρέφουν στο έδαφος (Orcutt & Nilsen 2000). Κύστεις συναντάμε σε φυτά του γένους *Atriplex*, *Chenopodium*, *Salsola*, *Halimione* κ.τ.λ. (Breckle 2002).



Εικόνα 3. Αλατώδης αδένας στα φύλλα του είδους *Tamarix* (A) και εγκάρσια τομή του φύλλου του είδους *Atriplex spongiosa* με τις αλατώδεις κύστεις (B) (Orcutt & Nilsen, 2000).



Εικόνα 4. Αλατούχοι αδένες του φυτού *Tamarix*, όπως εμφανίζονται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Τα άλατα απομακρύνονται με τη μορφή κόκκων. Φαίνονται επίσης τα επιδερμικά κύτταρα τα οποία παρουσιάζουν προεκβολές με τη μορφή θηλών. Μικροφωτογράφιση: Φασσέας, Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Οργάνων, Γ.Π.Α. (http://www.aua.gr/gr/dep/bio/lab/morfol/karabourniotis_res_files/stressphysiology1.pdf)

2.3. Έκκριση βαρέων μετάλλων από τους αλαταδένες και τις κύστεις των φυτών

Η μέχρι τώρα έρευνα έχει δείξει ότι η αντοχή στην υψηλή αλατότητα και στα βαρέα μέταλλα μπορεί, εν μέρει, να βασίζονται σε κοινούς φυσιολογικούς μηχανισμούς και ότι η συσσώρευση των μετάλλων στα φυτά, εξελικτικά, συνδέεται με την ανθεκτικότητα στην έλλειψη νερού (Manousaki & Kalogerakis 2010). Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι οι εκκριτικοί μηχανισμοί των φυτών δεν είναι πάντα επιλεκτικοί για τα ιόντα Na^+ και Cl^- αλλά και άλλα τοξικά ιόντα, όπως τα Zn, Cd, Pb, Cu που συσσωρεύονται στους αλατώδεις αδένες και κύστεις, ενώ και η έκκριση τους από αυτούς φαίνεται να είναι ένας σημαντικός μηχανισμός αντιμετώπισης των υψηλών συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων (Manousaki & Kalogerakis 2010).

Για παράδειγμα, τα φυτά του γένους *Atriplex* έχει παρατηρηθεί ότι συσσωρεύουν στις αλατώδεις κύστεις τους και εκκρίνουν ποσότητες βαρέων μετάλλων, όπως Cd, Zn, Se, B, Mo, Cu, Pb (Lutts et al. 2004, Reboreda & Caçador 2007, Lefèvre et al. 2009, Manousaki & Kalogerakis 2010). Σε φυτά του είδους *Atriplex halimus* που εκτέθηκαν σε κάδμιο παρατηρήθηκε ότι περισσότερο από το 30% του συσσωρευμένου μετάλλου

εκκρίνονταν από τις αλατώδεις κύστες (Lefèvre et al. 2009). Ο Reboredo (2001) μελέτησε φυτά του είδους *Halimione portulacoides* (ή *Atriplex portulacoides*) σε υδροπονική καλλιέργεια και τονίζει την μεγάλη ικανότητα του φυτού να συσσωρεύει κάδμιο στα φύλλα του και επιπλέον, από τις παρατηρήσεις του, υποθέτει ότι το φυτό αυτό εκκρίνει Cd από τους αλατώδεις αδένες του. Συγκεκριμένα, το επίπεδο του καδμίου στα φύλλα άρχισε να μειώνεται από την 15^η μέρα έως την 30^η μέρα του πειράματος. Το Cd εντοπιζόταν στο χλωρέγχυμα, στις ηθμαγγειώδεις δεσμίδες, μέσα στην επιδερμίδα και κυρίως πάνω στην επιδερμίδα των φύλλων, ειδικά για τα φυτά που εκτίθονταν στις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Cd (5 µg/ml) σε σχέση με αυτά που εκτίθονταν σε μικρότερες συγκεντρώσεις καδμίου (1 µg/ml) ή με τους μάρτυρες, υπονοώντας ενεργό απομάκρυνση του καδμίου μέσω των αλατωδών αδένων. Ο ίδιος τονίζει ότι αυτό μπορεί να σημαίνει ότι η έκκριση του Cd πιθανόν ξεκινάει όταν η συγκέντρωσή του στο μεσόφυλλο ξεπεράσει μία μέγιστη ποσότητα.

Μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί με το *Tamarix aphylla* έχουν δείξει ότι οι αλατώδεις αδένες του δεν είναι επιλεκτικοί μόνο για το Na⁺ και Cl⁻ αλλά εκκρίνουν επίσης και Cd και Li καθώς και μία ποικιλία άλλων ιόντων, ενώ και η σύσταση του προϊόντος που εκκρίνεται είναι ανάλογη της σύστασης του περιβάλλοντος στην ριζόσφαιρα (Hagemeyer & Waisel 1988, Manousaki & Kalogerakis 2010). Το φυτό *Tamarix smyrnensis* έχει διαπιστωθεί ότι εκκρίνει από τους αδένες του βαρέα μέταλλα, όπως Cd και Pb, υποδεικνύοντας ότι το φυτό χρησιμοποιεί την έκκριση των περισσίων μετάλλων από τους αλατώδεις αδένες του ως πιθανό μηχανισμό αποτοξίνωσης (Kadukova et al. 2008, Manousaki et al. 2008). Οι Fawzy et al. (2006), επίσης, παρατήρησαν την έκκριση μακροστοιχείων και μετάλλων από τους αλατώδεις αδένες του *Tamarix nilotica*, με τη μορφή κρυστάλλων αλατιού.

Τα αλόφυτα του γένους *Spartina* είναι γνωστό ότι συσσωρεύουν στους ιστούς τους μέταλλα όπως Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Ni, Pb, Cd, τα οποία και εκκρίνουν από τους αλατώδεις αδένες τους (Rozema et al. 1991, Burke et al. 2000, Weis & Weis 2004, Mahon & Carman 2008). Ο Kraus το 1988 υπολόγισε ότι το *S. alterniflora* μπορεί θεωρητικά να εκκρίνει 145 g Cd, 260 g Pb, 104 gr Cr, 260 g Cu και 988 g Ni ανά εκτάριο, ανά έτος, μέσω των αδένων του (Weis & Weis, 2004). Η Toderich και οι συνεργάτες της (2002) ανίχνευσαν ιόντα Na, K, Ca, Cl, SO₄, Mg, Si και Sr στις εκκρίσεις των αλατωδών αδένων των φυτών του γένους *Salsola* ενώ και οι Somaru et al. (2002) παρατήρησαν στις εκκρίσεις του αλόφυτου *Odysea paucinervis* εκτός από Na⁺ και Cl⁻, μικρότερες ποσότητες από K⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺.

Η παρουσία βαρέων μετάλλων έχει αναφερθεί και στις εκκρίσεις των τριχωμάτων φυτών που δεν ανήκουν στα Αλόφυτα, όπως για παράδειγμα η έκκριση Cd σε φυτά του είδους *Brassica juncea* (Salt et al. 1995 στο: Manousaki & Kalogerakis 2010) και η έκκριση Cd, Zn, Pb σε φυτά καπνού (*Nicotiana tabacum*) τα οποία εκκρίνουν κρυστάλλους από τα αδενικά τριχώματα στα φύλλα τους (Choi et al. 2001). Συγκεκριμένα, όπως αναφέρουν οι Choi et al. (2001), τα *Nicotiana tabacum* μπορούν να εκκρίνουν μέχρι και 16 µg Cd ανά g φρέσκιας φυτικής ουσίας, από τους αδένες τους.

2.4. ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗ (Phytoremediation)

Ο όρος Φυτοεξυγίανση αποδίδεται σε μία ομάδα τεχνολογιών οι οποίες χρησιμοποιούν τα φυτά (φυσικά ή και γενετικά τροποποιημένα) και τους σχετιζόμενους με αυτά μικροοργανισμούς, για να απομακρύνουν, μειώσουν, διασπάσουν ή ακινητοποιήσουν τις τοξικές ουσίες με στόχο την αποκατάσταση του εδάφους του νερού ή του αέρα μίας περιοχής σε επίπεδο ώστε να μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί (Salt et al. 1998, Henry 2000, Prasad & Freitas 2003, Gosh & Singh 2005, Peer et al. 2005, Khan 2006, Kirkham 2006, Mench et al. 2010). Οι τεχνικές που αφορούν στην αποκατάσταση του εδάφους από βαρέα μέταλλα είναι κυρίως οι (Salt et al. 1998, USEPA 1999, Gosh & Singh 2005, Peer et al. 2005, Jadia & Fulekar 2009, Mench et al. 2010):

-**Φυτοσυσσώρευση** (phytoaccumulation ή phytoextraction, πρόσληψη και συσσώρευση του ρύπου στις ρίζες ή τα υπέργεια τμήματα των φυτών).

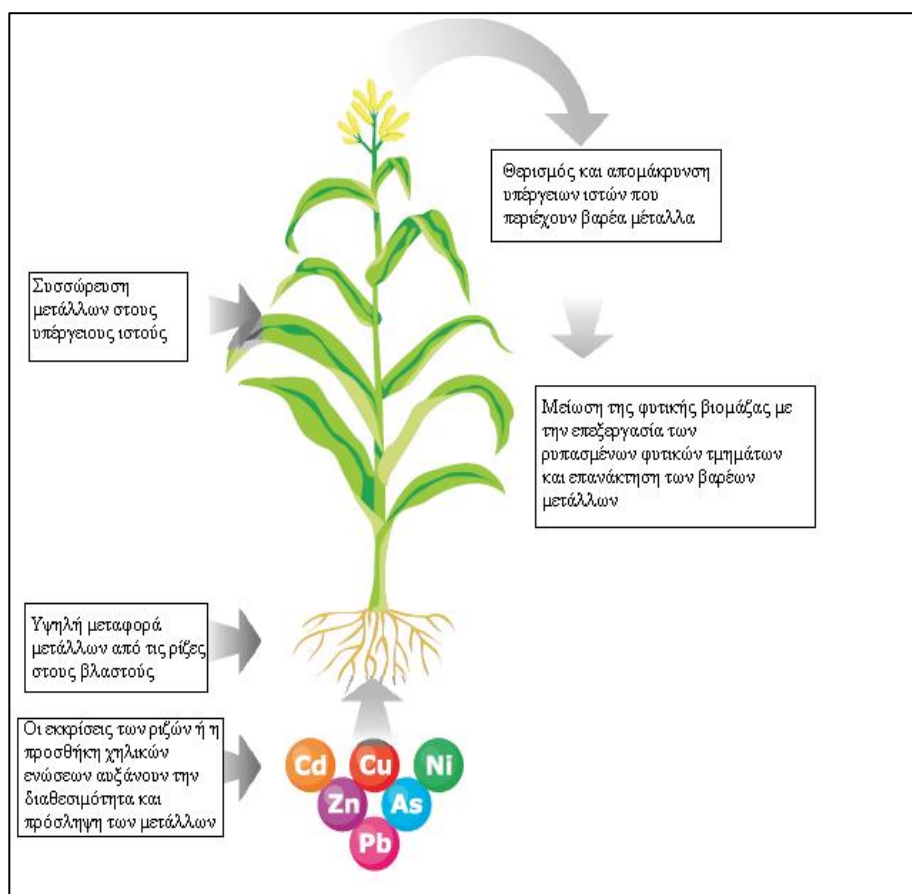
-**Φυτοσταθεροποίηση** (phytostabilization, σταθεροποίηση του ρύπου μέσω δέσμευσης, συγκράτησης του εδάφους και/ή μείωση της διήθησης με τη χρήση φυτών).

-**Φυτοεξάτμιση** (phytonovolatilization, πρόσληψη του ρύπου και εξάτμιση-απελευθέρωση στην ατμόσφαιρα από τα φυτά)

Η τεχνική της φυτοεξυγίανσης μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα μεγάλο εύρος οργανικών και ανόργανων ρύπων, συμπεριλαμβανομένων των βαρέων μετάλλων, ραδιονουκλεϊδίων, χλωριωμένων διαλυτών, φυτοφαρμάκων, πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (PAHs), πολυχλωριωμένων διφαινυλίων (PCBs), πυρομαχικών, στραγγισμάτων από χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων αλλά και θρεπτικών συστατικών σε περίσσεια (Jadia & Fulekar 2009, Manousaki & Kalogerakis 2010).

2.4.1. Φυτοσυσσώρευση (phytoextraction ή phytoaccumulation)

Η φυτοσυσσώρευση (Εικόνα 5) είναι η συνήθης μέθοδος που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων από το έδαφος (Prasad & Freitas 2003, Kirkham 2006). Στην πράξη, φυτά που συσσωρεύουν τα μέταλλα φυτεύονται στο ρυπασμένο έδαφος και καλλιεργούνται σύμφωνα με τις συμβατικές καλλιεργητικές τεχνικές. Οι ρίζες από τα φυτά αυτά απορροφούν τα μέταλλα από το έδαφος και τα μεταφέρουν στο υπέργειο τμήμα τους, όπου και συσσωρεύονται. Έπειτα όταν τα φυτά έχουν αναπτυχθεί επαρκώς κόβονται και απομακρύνονται τα υπέργεια μέρη τους συνεπάγοντας έτσι την μόνιμη απομάκρυνση και των βαρέων μετάλλων από το έδαφος (USEPA 1999, Prasad & Freitas 2003, Peer et al. 2005, Kirkham 2006, Chaney et al. 2007, Wei et al. 2008). Έπειτα, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για την επεξεργασία των ρυπασμένων φυτικών τμημάτων και την επανάκτηση των βαρέων μετάλλων όπως κάποιες που παρουσιάζονται στους Gosh & Singh (2005), Kirkham (2006), Chaney et al. (2007) και Mench et al. (2010).



Εικόνα 5. Σχηματική παράσταση των διαδικασιών που περιλαμβάνονται στην φυτοσυσσώρευση των μετάλλων από το έδαφος (τροποποιημένο από: Nascimento & Xing 2006).

Τα φυτά που είναι ικανά να συγκεντρώνουν μέταλλα σε πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις από τα υπόλοιπα φυτά, στις ρίζες, στον βλαστό και στα φύλλα τους ονομάζονται **υπερσυσσωρευτές** (hyperaccumulators). Είναι γενικά αποδεκτό ότι τα φυτά που συγκεντρώνουν, στην ξηρή υπέργεια βιομάζα τους, πάνω από 1000 µg/g (0,1%) As, Pb, Co, Cu, Cr και Ni, 10.000 µg/g (1%) Zn και Mg, 100 µg/g (0,01%) Cd, 1µg/g (0,0001%) Au και επιπλέον συσσωρεύουν μεγαλύτερες ποσότητες του μετάλλου στα υπέργεια τμήματά τους από ότι στις ρίζες τους, χαρακτηρίζονται ως “**υπερσυσσωρευτές**” (Henry 2000, Lasat 2000, Lasat 2002, Prasad and Freitas 2003, Lutts et al. 2004, Ghosh and Singh 2005, Peer et al., 2005, Raskin et al., 1994, Μανουσάκη 2008, Wei et al. 2008). Δεν είναι ακόμα γνωστοί οι ακριβείς μηχανισμοί με τους οποίους επιτυγχάνεται η υπερσυσσώρευση μετάλλων σε κάποια φυτά, ωστόσο το ενδιαφέρον για τη γενετική τροποποίηση φυτών μεγάλης βιομάζας σε υπερσυσσωρευτές μετάλλων συνεχώς αυξάνεται (Krämer & Chardonnens 2001, Chaney et al. 2007). Αυτό οφείλεται στο ότι τα φυτά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην “φυτοαποκατάσταση” του εδάφους. Ο Chaney (1983) ήταν ο πρώτος που πρότεινε τη χρήση αυτών των “υπερσυσσωρευτών” για τη φυτοεξυγίανση εδάφους ρυπασμένου με μέταλλα (Prasad and Freitas, 2003).

Τουλάχιστον 45 οικογένειες έχουν αναφερθεί να συσσωρεύουν μεγάλες ποσότητες βαρέων μετάλλων. Τέτοιες είναι οι Brassicaceae, Fabaceae, Euphorbiaceae, Asteraceae, Lamiaceae and Scrophulariaceae (Jadia & Fulekar, 2009). Επιπλέον οι οικογένειες: Caryophyllaceae, Flacourtiaceae, Poaceae, Cunouniaceae, Violaceae. Μόνο στην οικογένεια Brassicaceae υπάρχουν 87 είδη από 11 γένη, γνωστά, που συσσωρεύουν μέταλλα. Η υπερσυσσώρευση του Ni, για παράδειγμα, αναφέρεται σε 7 γένη και 72 είδη, ενώ του Zn σε 3 γένη και 20 είδη (Prasad & Freitas 2003, Jadia & Fulekar 2009).

Το *Thlaspi caerulescens* είναι ένας γνωστός μέχρι τώρα υπερσυσσωρευτής του Cd το οποίο έχει βρεθεί να συσσωρεύει το 22% του βιοδιαθέσιμου Cd του εδάφους και έως και 26.000 mg/kg Zn χωρίς να παρουσιάζει συμπτώματα τοξικότητας (Gosh & Singh 2005, Kirkham 2006). Οι Roosens et al. (2003) μελέτησαν 7 διαφορετικούς πληθυσμούς του είδους αυτού και βρήκαν ότι όλοι συσσωρεύαν κάδμιο σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του 0,01% της ξηρής υπέργειας βιομάζας ακόμα και μόλις μετά από 14 μέρες έκθεσης σε 3 µM Cd και ότι στον πιο ανθεκτικό πληθυσμό η συγκέντρωση του καδμίου έφτανε το 0,7% της ξηρής μάζας χωρίς να παρουσιαστούν συμπτώματα τοξικότητας. Ένα ακόμα υποψήφιο είδος ως υπερσυσσωρευτής του καδμίου είναι το *Arabidopsis halleri* (Dahmani- Muller et al. 2000, Küpper et al. 2000, Reeves et al. 2001, Bert et al. 2002 στο: Roosens et al. 2003). Έχει βρεθεί ότι δεν υπερσυσσωρεύουν κάδμιο όλοι οι οικότυποι του *Arabidopsis halleri*,

ενώ παραδόξως, φαίνεται ότι φυτά από μη μεταλλοφόρα εδάφη συσσωρεύουν περισσότερες ποσότητες μετάλλων, κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες, από αυτές που συσσωρεύουν φυτά από μεταλλοφόρα εδάφη (Bert et al. 2000, 2002, 2003 στο: Roosens et al. 2003). Οι Zhang et al. (2010) προτείνουν και το φυτό *Malva sinensis* Cavan. ως ένα μη τυπικό υπερσυσσωρευτή του καδμίου.

Ως υπερσυσσωρευτής του Pb έχει προταθεί το *Brassica juncea* το οποίο έχει παρατηρηθεί να συσσωρεύει 1.550 kg Pb σε περίπου 4 στρ. γης (Henry 2000, Gosh & Singh 2005). Οι Ha et al. (2011) προτείνουν και ως υπερσυσσωρευτή του Pb το φυτό *Ageratum houstonianum* Mill. το οποίο βρέθηκε να συσσωρεύει 1130 mg/kg ξηρής ουσίας από το έδαφος και με σχετικά καλή ικανότητα μεταφοράς του μετάλλου από τις ρίζες στους βλαστούς (Translocating factor = 0.95). Οι ίδιοι επίσης παρατήρησαν ότι τα φυτά *Potamogeton oxyphyllus* Miq. and *Pteris vittata* συγκέντρωσαν αντίστοιχα 4210 και 1020 mg Pb ανά kg ξηρής ουσίας από το νερό. Σε παγκόσμια κλίμακα, είναι γνωστό ότι περισσότερα από 320 είδη φυτών συγκεντρώνουν ποσότητες Ni μεγαλύτερες των 1000 mg/kg, όπως επίσης 30 είδη το Co, 20 είδη το Se, 34 είδη τον Cu και 14 είδη τον Pb. Συγκεντρώσεις Zn μεγαλύτερες των 10.000 mg/kg έχουν αναφερθεί σε 11 φυτικά είδη και του Mn σε 10 είδη (Gosh & Singh 2005).

Η επιτυχής εφαρμογή της φυτοσυσσώρευσης σημαίνει ότι το ρυπασμένο μέσο καθαρίζεται σε επίπεδο που συμμορφώνεται με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς και σε λογικό χρονικό διάστημα και επιπλέον η αποκατάσταση επιτυγχάνεται με χαμηλότερο κόστος από μία εναλλακτική τεχνολογία ή απραξία (Nascimento & Xing 2006, Μανουσάκη 2008).

Το ιδανικό φυτό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για φυτοσυσσώρευση πρέπει να διαθέτει τα εξής χαρακτηριστικά:

- να είναι ανθεκτικό σε υψηλά επίπεδα μετάλλων
- να συσσωρεύει μεγάλα ποσά μετάλλων στους υπέργειους ιστούς
- να συσσωρεύει πολλά διαφορετικά μέταλλα
- να αναπτύσσει εκτεταμένο ριζικό σύστημα,
- να έχει ταχύ ρυθμό αύξησης
- να παρουσιάζει μεγάλη παραγωγή βιομάζας
- να μπορεί να αποκομιστεί με τις συμβατικές γεωργικές μεθόδους
- να έχει μικρές θρεπτικές απαιτήσεις
- να είναι ανθεκτικό στις ασθένειες και τα παράσιτα

- να είναι ανθεκτικό σε διάφορες περιβαλλοντικές καταπονήσεις όπως η ξηρασία και ο παγετός
- να μην αποτελεί τροφή για τα φυτοφάγα ζώα

(Clemens et al. 2002, Peer et al. 2005, Kirkham 2006, Μανουσάκη 2008).

Βέβαια, μέχρι σήμερα, δεν έχει βρεθεί κανένα είδος που να ικανοποιεί όλα τα παραπάνω κριτήρια (Clemens et al. 2002). Τα περισσότερα φυτά υπερσυσσωρευτές είναι μικρόσωμα με μικρή παραγωγή βιομάζας, ρηχό ριζικό σύστημα και συσσωρεύουν συνήθως μεγάλες ποσότητες από ένα μόνο μέταλλο. Αντιθέτως, τα φυτά με μεγάλη ανάπτυξη συνήθως δεν συσσωρεύουν μεγάλες ποσότητες μετάλλων και δεν είναι ανθεκτικά στις υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων (Cunningham et al. 1995, Raskin et al. 1997, Salt et al. 1998, Lasat 2000, Gosh & Singh 2005, Kirkham 2006).

Η φυτοσυσσώρευση μπορεί να διακριθεί σε **φυσική ή συνεχή φυτοσυσσώρευση** (Continuous ή natural phytoextraction), κατά την οποία δεν γίνονται προσθήκες χημικών ενώσεων, όπως εδαφοβελτιωτικών ή χηλικών ενώσεων, και **παρακινούμενη ή χημικά υποβοηθούμενη φυτοσυσσώρευση** (induced ή chemical assisted phytoextraction) (Salt et al. 1998, Peer et al. 2005, Nascimento & Xing 2006), κατά την οποία γίνεται προσθήκη χημικών ενώσεων στο έδαφος. Η χημικά υποβοηθούμενη φυτοσυσσώρευση έχει ως στόχο πέρα από την αύξηση της βιοδιαθεσιμότητας των μετάλλων και την προαγωγή της μεταφοράς μετάλλων από τη ρίζα στο υπέργειο τμήμα των φυτών που δεν είναι συσσωρευτές αλλά “απαγορευτές” (excluders) των μετάλλων και τα οποία χαρακτηρίζονται από γρήγορους ρυθμούς αύξησης και μεγάλη παραγωγή βιομάζας (Salt et al. 1998, Ghosh and Singh 2005, Nascimento & Xing 2006). Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες πάνω στην χημικά υποβοηθούμενη φυτοσυσσώρευση. Το πιο συχνά μελετημένο χηλικό αντιδραστήριο είναι το EDTA (αιθυλενο-διαμινο-τετραοξικό-οξύ) το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί για την επιτυχή φυτοσυσσώρευση του Pb (Blaylock et al. 1997, Huang et al. 1997, Raskin et al. 1997, Salt et al. 1998, Henry 2000, Kos & Leštan 2003, Chen et al. 2004, Gosh & Singh 2005, Chaney et al. 2007) αλλά και άλλων μετάλλων (Raskin et al. 1997, Jiang et al. 2003, Schmidt 2003, Peer et al. 2005). Έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλα χημικά αντιδραστήρια, όπως τα EDDS, CDTA, DTPA, EGTA, EDDHA, NTA (Kos & Leštan 2003, Huang et al. 1997, Peer et al. 2005, Henry 2000). Επίσης έχουν γίνει μελέτες για την επίδραση κάποιων πρόσθετων στοιχείων στη συσσώρευση των μετάλλων, όπως για παράδειγμα τα N, P, Fe στη συσσώρευση των Cd, Pb, Cu, και Zn (Sun et al. 2007) ή η προσθήκη φυσικής σαπωνίνης του τσαγιού (tea saponin) στη συσσώρευση του Cd και των PCBs σε 2 είδη φυτών (Xia et al. 2009).

Ιδιαίτερη περίπτωση αποτελεί η προσθήκη NaCl στο έδαφος, όπου σε πολλές περιπτώσεις φαίνεται ότι συμβάλλει στην αύξηση της συσσώρευσης των βαρέων μετάλλων από τα φυτά και σε ορισμένες περιπτώσεις σε αύξηση της μεταφοράς τους από τις ρίζες στο υπέργειο τμήμα των φυτών. Για παράδειγμα, πολλές μελέτες αναφέρουν ότι το αλάτι στο εδαφικό διάλυμα αυξάνει τη βιοδιαθεσιμότητα του Cd^{2+} στο έδαφος και έτσι και την φυτοσυσσώρευση του (Kirkham 2006, Ghnaya et al. 2007). Ο Ghnaya και οι συνεργάτες του (2007) παρατήρησαν ότι η προσθήκη NaCl στο εδαφικό διάλυμα του φυτού *Sesuvium portulacastrum* μειώνει την τοξικότητα του καδμίου και αυξάνει τη συγκέντρωσή του στο υπέργειο μέρος του φυτού έναντι των ριζών. Οι Manousaki & Kalogerakis (2009) παρατήρησαν ότι η αύξηση της αλατότητας αυξάνει την απορρόφηση του καδμίου από τις ρίζες του *Atriplex halimus*, ενώ δεν μπόρεσαν να συμπεράνουν το ίδιο και για τον Pb. Η αύξηση της αλατότητας του εδάφους οδηγεί σε αύξηση της συσσώρευσης του Cd και του Pb από το φυτό *Tamarix smyrnensis* καθώς και σε αύξηση της έκκρισης του Cd από τις κύστες των φύλλων του (Manousaki et al. 2008, Manousaki et al. 2009).

2.4.1.1. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φυτοσυσσώρευσης

Η φυτοσυσσώρευση πλεονεκτεί έναντι άλλων τεχνικών αποκατάστασης ρυπασμένων εδαφών με βαρέα μέταλλα (Raskin et al. 1994, Cunningham et al. 1995, Henry 2000, Lasat 2000, Ghosh & Singh 2005, Μανουσάκη 2008, Wei et al. 2008, Jadia & Fulekar 2009) διότι:

- Είναι μία περιβαλλοντικά φιλική και εύκολα αποδεκτή από το ευρύ κοινό τεχνολογία.
- Δεν προκαλεί μείωση της γονιμότητας του εδάφους μετά το πέρας της αποκατάστασης, όπως άλλες *ex situ* τεχνικές, αλλά αντίθετα οδηγεί σε βελτίωση του.
- Είναι μία τεχνική *in situ* που δεν απαιτεί ακριβό εξοπλισμό και ιδιαίτερα εξειδικευμένο προσωπικό.
- Είναι εξαιρετικά χαμηλού κόστους (60-80% φθηνότερη σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους)
- Είναι οικονομικά αποδοτική για μεγάλες περιοχές με χαμηλό ή μέτριο επίπεδο ρύπανσης όπου άλλες τεχνολογίες είναι οικονομικά μη αποδεκτές.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα εύρος τοξικών μετάλλων και ραδιονουκλιδίων.

- Χαρακτηρίζεται από μειωμένες ποσότητες παραγόμενων αποβλήτων που απαιτούν διάθεση και επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα ανάκτησης των μετάλλων από τη ρυπασμένη βιομάζα.
- Η χρήση βλάστησης μειώνει τη διάβρωση του εδάφους και τη μεταφορά των ρύπων μέσω του αέρα σε άλλες περιοχές.

Πάραυτα η φυτοσυσσώρευση παρουσιάζει και κάποιους περιορισμούς (Cunningham et al. 1995, Henry 2000, Lasat 2000, Ghosh & Singh 2005, Peer et al. 2005, Μανουσάκη 2008, Mench et al. 2010):

- Απαιτείται μεγάλος χρόνος για τη φυτοαποκατάσταση του εδάφους. Για παράδειγμα, σύμφωνα με μία εκτίμηση αποκατάστασης μιας ρυπασμένης με βαρέα μέταλλα περιοχής με τη χρήση του υπερσυσσωρευτή *Thlaspi caerulescens*, θα χρειαστούν 13-14 χρόνια για να μειωθούν οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στις επιτρεπτές οριακές τιμές.
- Δεν μπορεί να εφαρμοστεί για πολύ υψηλά επίπεδα ρύπανσης τα οποία είναι φυτοτοξικά.
- Είναι μη αποτελεσματική για ρύπανση σε μεγάλο βάθος στο έδαφος κάτω από την ριζόσφαιρα.
- Απομακρύνεται μόνο το βιοδιαθέσιμο κλάσμα των βαρέων μετάλλων του εδάφους.
- Επηρεάζεται φυσικά από τις κλιματικές συνθήκες οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν την αύξηση και την παραγόμενη μάζα των φυτών.
- Μετά την αποκατάσταση απαιτείται ειδική επεξεργασία της παραγόμενης ρυπασμένης φυτικής βιομάζας.
- Υπάρχει κίνδυνος της εισαγωγής των μετάλλων στην τροφική αλυσίδα μέσω των φυτοφάγων ζώων και μεταφοράς των ρύπων σε άλλο μέσο μέσω της πτώσης των φύλλων που περιέχουν τα μέταλλα.
- Υπάρχει η πιθανότητα να μεταφερθούν στα υπόγεια και επιφανειακά νερά οι ρύποι μέσω της χρήσης βελτιωτικών και της αύξησης της βιοδιαθεσιμότητας των μετάλλων.

2.4.2. Φυτοέκκριση (Phytoexcretion)

Όπως αναφέρεται και προηγουμένως στην παράγραφο 2.3., ορισμένα φυτικά είδη, ανθεκτικά στην υψηλή αλατότητα, εκκρίνουν από τους αλαταδένες και τις αλατώδεις κύστες τους, εκτός από τα ιόντα Cl^- και Na^+ , και μέταλλα. Αυτός ο μηχανισμός πιθανόν αποτελεί έναν μηχανισμό αποτοξίνωσης από τις υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων

(Manousaki & Kalogerakis 2010). Η χρήση αυτής της ικανότητας των αλόφυτων έχει προταθεί, πρόσφατα στην βιβλιογραφία, ως ένας πιθανός μηχανισμός για τη φυτοεξυγίανση ρυπασμένων εδαφών με τον όρο “**φυτοέκκριση**” (phytoexcretion) (Kadukova et al. 2008, Manousaki et al. 2008). Η φυτοέκκριση είναι μία πολλά υποσχόμενη μέθοδος φυτοεξυγίανσης που προσφέρει δυνατότητες για νέες τεχνολογικές προσεγγίσεις αφού τα μέταλλα μπορούν να συλλέγονται, με κάποιο τρόπο, μετά την έκκρισή τους και πριν επιστρέψουν ξανά στο έδαφος. Τα φυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως “βιολογικές αντλίες” που θα εκκρίνουν τα μέταλλα στην επιφάνεια και τα οποία θα συγκεντρώνονται για παράδειγμα σε ειδικά “υφάσματα” που θα τα απορροφούν με στόχο την μετέπειτα επεξεργασία τους ή την ανάκτησή τους. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα αφού μπορεί να συνδυαστεί με τη μέθοδο της φυτοσυσσώρευσης, μειώνει τη συχνότητα κοπής και απομάκρυνσης των φυτών συνεπάγοντας έτσι χαμηλότερο κόστος και μικρότερο χρόνο αποκατάστασης του εδάφους (Kadukova et al. 2008, Manousaki et al. 2008, Manousaki & Kalogerakis 2010, Manousaki & Kalogerakis 2011).

Τα αλόφυτα, παρεμπιπτόντως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την απομάκρυνση των αλάτων από τα αλατούχα εδάφη με σκοπό την αποκατάστασή και την επαναχρησιμοποίησή τους. Έχει παρατηρηθεί ότι περισσότερο από το 50% των αλάτων που εισέρχονται στα φύλλα κάποιων φυτών όπως αυτά του γένους *Atriplex*, εκκρίνεται από τις αλατώδεις κύστες (Breckle 2002), και έτσι, προτείνεται ότι η μέθοδος της φυτοέκκρισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για την αποκατάσταση των αλατούχων εδαφών με τη συλλογή των αλάτων που εκκρίνονται πριν αυτά επιστρέψουν στο έδαφος (Manousaki & Kalogerakis 2011). Κάποιοι συγγραφείς προτείνουν τη χρήση αλόφυτων που υπερσυσσωρεύουν Na^+ και Cl^- για την αφαλάτωση του εδάφους. Είδη όπως τα *Suaeda maitima*, *Suaeda portulacastrum*, *Suaeda fruticosa*, *Suaeda salsa*, *Suaeda calceoliformis*, *Kalidium folium*, *Sesuvium portulacastrum*, *Arthrocnemum indicum*, *Atriplex nummularia* και *Atriplex prostrata* έχει αναφερθεί ότι συσσωρεύουν υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων στους υπέργειους ιστούς τους συνεπάγοντας την αναβάθμιση του εδάφους με την απομάκρυνσή της φυτικής τους βιομάζας. Για τη συγκεκριμένη μέθοδο έχει προταθεί ο όρος Phytodesalination (Glenn et al. 1999, Rabhi et al. 2010, Manousaki & Kalogerakis 2011). Οι Rabhi et al. (2010) μελέτησαν την “φυτο-αφαλάτωση” του εδάφους με την καλλιέργεια του φυτού *Sesuvium portulacastrum* και παρατήρησαν ότι το φυτό συσσωρεύει μέχρι 872 mg ιόντα Na^+ σε κάθε φυτό (περίπου 1 τόνο / εκτάριο) μειώνοντας την αλατότητα του εδάφους.

2.5. Χαρακτηριστικά των υπό εξέταση φυτών

2.5.1. *Tamarix parviflora* (De Candolle)

Το φυτό *Tamarix parviflora* (συνώνυμο: *Tamarix cretica*, Bunge) είναι ένα μικρό φυλλοβόλο δέντρο με μέγιστο ύψος τα 5 m που ανήκει στην οικογένεια Tamaricaceae. Έχει καφέ-ερυθροκύανο κορμό, φύλλα 3-5 mm μακριά, βελονοειδή. Τα άνθη είναι δίοικα με χρώμα άσπρο-ροζ και 4-μερή, δηλαδή έχουν 4 πέταλα και 4 σέπαλα. Αναπτύσσονται σε βοτρυοειδής ταξιανθίες στους βλαστούς του προηγούμενου έτους. Τα πέταλα δεν ξεπερνούν τα 2 mm και είναι οωειδή ή οωειδή – ελλειπτικά και τα σέπαλα είναι ελαφρώς οδοντωτά. Ανθίζει από Απρίλιο έως Ιούνιο (Tutin et al. 1981, Turland et al. 1993, Blamey & Grey-Wilson 1998). Η επικονίαση γίνεται από έντομα και πιθανό και από τον άνεμο, πράγμα που όμως είναι υπό αμφισβήτηση. Αναπαράγεται με σπέρματα αλλά και με βλαστούς που αποκόπτονται από το φυτό, μεταφέρονται και θάβονται στο έδαφος (USDA Forest Service). Φύεται συνήθως σε όχθες ποταμών, σε όρια δρόμων, σε αμμώδη υφάλμυρα ή και πολύ αλμυρά εδάφη κοντά στην θάλασσα αλλά συναντάται και σε μεγαλύτερα υψόμετρα, μέχρι τα 800 m. Απαντάται σε όλη την Βαλκανική χερσόνησο και στο Αιγαίο ενώ έχει ευρέως καλλιεργηθεί ως καλλωπιστικό στην κεντρική και νότια Ευρώπη και πιθανόν έχει εγκλιματιστεί (Tutin et al. 1981, Turland et al. 1993, Blamey & Grey-Wilson, 1998).



Εικόνα 6. Φυτό του *Tamarix parviflora* (από: Steve Dewey για το: <http://www.invasive.org/browse/>), και τα φύλλα από φυτό του πειράματος, μετά την

έκθεση στο αλάτι, όπου διακρίνονται οι κρύσταλλοι αλάτων που εκκρίνονται από τους αλαταδένες.

Το Αρμυρίκι, όπως ονομάζεται στην κοινή ελληνική, έχει εκτεταμένο ριζικό σύστημα που φτάνει μέχρι και τον υδροφόρο ορίζοντα. Είναι ιδιαίτερα ικανό στη ρύθμιση των στομάτων των φύλλων του, της φωτοσύνθεσης και στην μείωση της απώλειας υγρασίας κάτω από ξηρές συνθήκες, διατηρώντας σχετικά υψηλό ρυθμό διαπνοής και κατώτερα όρια απώλειας σπαργής από άλλα παρόχθια είδη.

Είναι γνωστό ότι συσσωρεύει τα άλατα σε αλατώδεις αδένες στα φύλλα του και τα εκκρίνει στην επιφάνειά τους. Αυτά τα άλατα έπειτα συσσωρεύονται στην επιφάνεια του εδάφους όταν τα φυτά ρίχνουν τα φύλλα τους (USDA Forest Service).

2.5.2. *Halimione portulacoides* (L.) Aellen

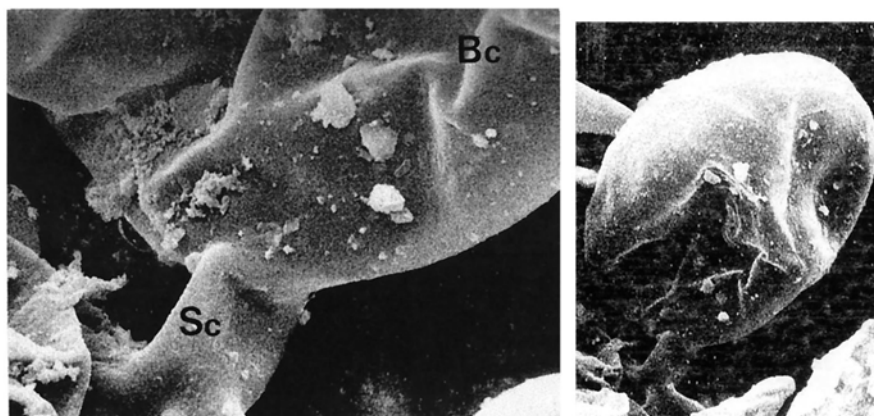
Το είδος *H. portulacoides* (Εικόνα 7) με συνώνυμα τα: *Atriplex portulacoides* (L.) και *Obione portulacoides* (L.) Moq. ή αλλιώς Sea Purslane στην κοινή αγγλική, είναι ένας μικρός, C₃, πολυετής θάμνος, που φτάνει το 1,5 m σε ύψος και ανήκει στην οικογένεια Chenopodiaceae. Συχνά οι βλαστοί του ριζώνουν στο έδαφος. Τα φύλλα του έχουν λευκο-ασημί χρώμα και είναι επιμήκη, ελλειπτικά ή οωειδή, σαρκώδη και δεν είναι οδοντωτά. Οι καρποί αναπτύσσονται χωρίς κοτσάνι. Τα άνθη είναι μικρά πράσινο-κίτρινα και αναπτύσσονται σε φόβες από Ιούλιο έως Οκτώβριο. Συναντάται σε ακτές και έλη που βρέχονται από τη θάλασσα της νότιας και δυτικής Ευρώπης, από τη Βουλγαρία έως τη Δανία, στη βόρεια Αφρική και τη νότιο-δυτική Ασία (Tutin et al. 1981, Blamey & Grey-Wilson, 1998, Redondo-Gómez et al. 2007). Στην Κρήτη η εξάπλωσή του είναι σποραδική (Turland et al. 1993).

Στην Ευρώπη χαρακτηρίζει συχνά περιοχές με καλά στραγγιζόμενα εδάφη και συχνά αναπτύσσεται σε περιοχές που πλημμυρίζουν με νερό με συνέπεια να υπόκειται σε αλατότητες που φτάνουν μέχρι και αυτή του θαλασσινού νερού (Stienstra 1977, Jensen 1985, Redondo-Gómez et al. 2007) αν και η παρατεταμένη ή η συχνότατη παραμονή κάτω από το νερό εμποδίζει την ανάπτυξή του (Stienstra 1977, Jensen 1985). Είναι επίσης γνωστό ότι συσσωρεύει υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων στους ιστούς του και έχει την ικανότητα να τα απομακρύνει μέσω των αλατωδών κύστεων (salt bladders, Εικόνα 8) που έχει στην επιφάνεια των φύλλων του (Stienstra 1977, Reboredo 2001, Dajic 2006, Redondo-Gómez et al. 2007). Ο Neves και οι συνεργάτες του (2007), σε μελέτη που έκαναν στην νότια Πορτογαλία, παρατήρησαν ότι η ανάπτυξη του φυτού αρχίζει το

φθινόπωρο με τις βροχές και διαρκεί μέχρι το καλοκαίρι όπου επιβραδύνεται από τις υψηλές θερμοκρασίες, την έλλειψη νερού και την υψηλή ακτινοβολία. Υπολόγισαν επίσης ότι η μέση ετήσια παραγωγή βιομάζας (νωπή) του υπέργειου τμήματος του *H. portulacoides* είναι 598 g ανά m² ενώ, η μέγιστη ετήσια παραγωγή βιομάζας (νωπή) του, φτάνει τα 1077 g / m², την άνοιξη. Οι ίδιοι αναφέρουν ότι η μέση ετήσια παραγόμενη βιομάζα των ριζών του φυτού υπολογίστηκε στα 1601 g/m² και η αναλογία βιομάζας ρίζες : βλαστούς ήταν μεγαλύτερη του 2 που δείχνει ότι το φυτό επενδύει στο υπόγειο τμήμα του περισσότερο απ' ό,τι στο υπέργειο. Αυτή η στρατηγική έχει παρατηρηθεί και από άλλους ερευνητές (Schubauer & Hopkinson 1984, Scarton et al. 1999, 2002, Pont et al. 2002 στο: Neves et al. 2007) σε αλόφυτα που υπόκεινται σε συχνή κατάκλιση του βιότοπού τους από το νερό. Οι Reboreda & Caçador (2007) παρατήρησαν ότι το μεγαλύτερο μέρος των ριζών του είδους αυτού βρίσκεται στα πρώτα 15 cm του εδάφους και ότι το φυτό μπορεί να επηρεάζει την κατανομή των Cu, Pb και Zn στα διάφορα κλάσματα του εδάφους. Από μελέτες που έχουν γίνει, έχει παρατηρηθεί ότι το φυτό συσσωρεύει μέταλλα στους υπέργειους ιστούς του και πιθανόν τα απομακρύνει από τους αλατώδεις αδένες μαζί με τα άλατα που εκκρίνει. Ο Reboreda (2001) μελέτησε φυτά του είδους αυτού σε υδροπονική καλλιέργεια και παρατήρησε ότι συσσωρεύαν κάδμιο στα υπέργεια μέρη τους και επιπλέον από τις παρατηρήσεις του υποστηρίζει ότι το φυτό αυτό πολύ πιθανόν εκκρίνει Cd από τις αλατώδεις κύστες του.



Εικόνα 7. Το *Halimione portulacoides* στον υγροβιότοπο του κόλπου της Σούδας στα Χανιά.



Εικόνα 8. Αλατώδης κύστη του *Halimione portulacoides*. Φαίνεται το μισχοειδές κύτταρο (Sc) και το κυστικό κύτταρο (Bc) σε μεγέθυνση 3000x και 1000x. (Reboredo, 2001).

2.5.3. *Limoniastrum monopetalum* (L.) Boiss

Το είδος αυτό (Εικόνα 9) ανήκει στην οικογένεια Plumbaginaceae, είναι ένας μικρός πολυετής θάμνος με πολλούς διακλαδισμένους βλαστούς. Φτάνει το 1,2 m σε ύψος και το διπλάσιο σε πλάτος. Τα φύλλα του είναι ελαφρώς σαρκώδη με ασημί-κυανοπράσινο χρώμα, επιμήκη-σπατουλοειδή, 2-3 (-8) cm μήκος και 0,5-1,5 cm φάρδος και αγκαλιάζουν το βλαστό στην βάση τους. Τα άνθη είναι έντονα ροζ-μωβ 14-16 mm με 5 οωειδή πέταλα και αναπτύσσονται από Ιούνιο έως Αύγουστο. Απαντάται σε αμμώδεις παραλίες και αλατούχα έλη από την Ιβηρική χερσόνησο και την Βόρεια Αφρική μέχρι ανατολικά την Ιταλία, τη Σικελία και την Κρήτη. Στην Κρήτη συναντάται αυτοφυές μόνο στη νήσο Χρυσή (Tutin et al. 1981, Turland et al. 1993, Blamey & Grey-Wilson 1998), τα τελευταία χρόνια όμως χρησιμοποιείται ως καλλωπιστικό και απαντάται και σε άλλες περιοχές.

Οι Neves et al. (2007) αναφέρουν ότι η μέση ετήσια παραγόμενη νωπή βιομάζα, του υπέργειου τμήματός του, υπολογίστηκε σε 2516 g/m² ενώ η μέγιστη παραγόμενη βιομάζα του υπέργειου τμήματός του, που παρατηρείται και σε αυτό το είδος την άνοιξη, είναι 3502 g/m² (Neves et al. 2007). Η μέση ετήσια παραγόμενη νωπή βιομάζα των ριζών του υπολογίστηκε στα 2752 g/m². Η αναλογία παραγωγής βιομάζας *ρίζες* : *βλαστούς* υπολογίστηκε κάτω του 1 εκτός από την περίοδο του χειμώνα και του φθινοπώρου που είναι κοντά στο 1, δείχνοντας ότι αυτό το είδος επενδύει περισσότερο στους βλαστούς και τα φύλλα απ' ότι στις ρίζες. Όπως και άλλα μέλη της οικογένειας Plumbaginaceae έχει στα φύλλα του πολυκύτταρους αδένες από τους οποίους εκκρίνει τα περίσσεια άλατα (Wahid 2003, Σπέντζα 2010). Έχει βρεθεί να συσσωρεύει Al, Ni, Pb and V στους βλαστούς του

και να αναπτύσσεται καλά σε έδαφος ρυπασμένο με κατάλοιπα αργού πετρελαίου, όταν όλα τα υπόλοιπα, αυτοφυή της περιοχής φυτά, είχαν εξαφανιστεί (Hussein et al. 2002).



Εικόνα 9. *Limoniastrum monopetalum* σε άνθιση στο φυσικό περιβάλλον και σε γλάστρα του πειράματος.



Εικόνα 10. Φύλλο του *Limoniastrum monopetalum* από φυτό του πειράματος, στο οποίο διακρίνεται το αλάτι που εκκρίνεται από τους αλατώδεις αδένες.

2.6. Επιλογή των συγκεκριμένων φυτών

Καταρχήν, η επιλογή των φυτών για το πείραμα έγινε ανάμεσα σε αυτοφυή είδη της Κρήτης έτσι ώστε να αποκτηθούν τα φυτά με χαμηλό κόστος και να είναι εγκλιματισμένα στις τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Έπειτα, η έρευνα για την επιλογή των φυτών βασίστηκε σε προηγούμενες μελέτες που έχουν δείξει ότι η αντοχή στην υψηλή

αλατότητα, στην έλλειψη νερού και στα βαρέα μέταλλα, βασίζονται, εν μέρει, σε κοινούς φυσιολογικούς μηχανισμούς (Manousaki & Kalogerakis 2010). Γι' αυτόν το λόγο επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν αλόφυτα τα οποία παρουσιάζουν ανθεκτικότητα σε υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων και βαρέων μετάλλων και επίσης συσσωρεύουν βαρέα μέταλλα στους ιστούς τους, γεγονός που αναλύεται σε προηγούμενες παραγράφους. Τέλος επιλέχθηκαν φυτά ανθεκτικά που δεν απαιτούν ιδιαίτερες καλλιεργητικές τεχνικές.

Επίσης για τις ανάγκες της έρευνας της μεθόδου της “φυτοέκκρισης”, που έχει προταθεί πρόσφατα στην βιβλιογραφία ως ένας πιθανός μηχανισμός για τη φυτοεξυγίανση ρυπασμένων εδαφών (Kadukova et al. 2008, Manousaki et al. 2008, Manousaki & Kalogerakis 2011), επιλέχθηκαν αλόφυτα που έχουν εκκριτικούς μηχανισμούς στην επιφάνεια των φύλλων και των βλαστών τους. Αυτό διότι πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι οι εκκριτικοί μηχανισμοί των φυτών δεν είναι πάντα επιλεκτικοί για τα ιόντα Na^+ και Cl^- αλλά εκκρίνουν και άλλα τοξικά ιόντα, όπως τα Zn, Cd, Pb, Cu που συσσωρεύονται στους αλατώδεις αδένες και κύστες, ενώ και η έκκριση τους, από αυτούς, φαίνεται να είναι ένας σημαντικός μηχανισμός αντιμετώπισης των υψηλών συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων (Manousaki & Kalogerakis 2010).

Το είδος *Tamarix parviflora* λοιπόν, επιλέχθηκε διότι είναι ένα αλόφυτο με αλαταδένες στα φύλλα του και επίσης γιατί: το είδος αυτό δεν έχει έως σήμερα μελετηθεί για τους σκοπούς της φυτοεξυγίανσης, ενώ έχουν μελετηθεί άλλα συγγενικά είδη, όπως το *Tamarix smyrnensis* (Kadukova et al. 2008, Manousaki et al. 2008), το *Tamarix aphylla* (Hagemeyer & Waisel 1988), το *Tamarix nilotica* (Fawzy et al. 2006) και έχει παρατηρηθεί συσσώρευση μετάλλων στους ιστούς τους και έκκριση αυτών από τους αλατώδεις αδένες τους. Είναι ένα μικρό δέντρο που σημαίνει ότι μπορεί να εξισορροπείται η έλλειψη υψηλών συγκεντρώσεων μετάλλων στους ιστούς του με τη μεγάλη παραγωγή βιομάζας που παρουσιάζει. Επίσης, όπως και προαναφέρθηκε στην παράγραφο 2.5.1. έχει εκτεταμένο ριζικό σύστημα που φτάνει μέχρι και τον υδροφόρο ορίζοντα με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα χρήσης του για απορρύπανση των υπόγειων υδάτων.

Το είδος *Halimione portulacoides* (ή *Atriplex portulacoides*) είναι και αυτό ένα αυτοφυές φυτό της Κρήτης και είναι αλόφυτο που διαθέτει αλατώδεις κύστες στα φύλλα του (Stienstra 1977, Reboredo 2001, Dajic 2006, Redondo-Gómez et al. 2007) από τις οποίες απομακρύνει τα περίσσεια άλατα. Μέχρι στιγμής έχουν μελετηθεί πολλά είδη του ίδιου γένους και έχει παρατηρηθεί ότι τα φυτά του γένους *Atriplex* συσσωρεύουν στις αλατώδεις κύστες τους και εκκρίνουν ποσότητες βαρέων μετάλλων, όπως Cd, Zn, Se, B, Mo, Cu, Pb (Lutts et al. 2004, Reboredo & Caçador 2007, Lefèvre et al. 2009, Manousaki

& Kalogerakis 2009, Manousaki & Kalogerakis 2010). Ο Reboredo (2001) μελέτησε φυτά του είδους *Halimione portulacoides* και παρατήρησε τη μεγάλη ικανότητα τους να συσσωρεύουν κάδμιο στα φύλλα τους και επιπλέον υπέθεσε ότι το φυτό αυτό εκκρίνει Cd από τους αλατώδεις αδένες του. Η μελέτη όμως αυτή πραγματοποιήθηκε σε υδροπονική καλλιέργεια και όχι σε έδαφος όπως στην παρούσα μελέτη.

Το *Limoniastrum monopetalum* επιλέχθηκε διότι είναι ένα αυτοφυές αλοφυτικό είδος της νήσου Χρυσής της Κρήτης και έχει πολυκύτταρους αδένες από τους οποίους εκκρίνει τα περίσσεια άλατα (Wahid 2003, Σπέντζα 2010), οπότε και εξυπηρετεί τον στόχο μας για έρευνα της χρήσης του σε μεθόδους φυτοέκκρισης. Η επιλογή του βασίστηκε εκτός του ότι είναι ένα είδος που έχει μελετηθεί ελάχιστα και στην διαπίστωση ότι είναι ένα είδος που φαίνεται να επενδύει περισσότερο στους βλαστούς απ' ότι στις ρίζες σε βιομάζα (Neves et al., 2007), οπότε ενδεχομένως να συσσωρεύει και μεγαλύτερη ποσότητα βαρέων μετάλλων στα υπέργεια τμήματα του. Επίσης, διότι έχει βρεθεί να συσσωρεύει Al, Ni, Pb and V στους βλαστούς του (Hussein et al. 2002) και να φύεται σε ρυπασμένες περιοχές (Houssein et al. 2002, Σπέντζα 2010), γεγονός, που μαζί με την παρατήρηση ότι δεν έχει μελετηθεί έως τώρα ως προς την ικανότητα του να συσσωρεύει βαρέα μέταλλα και να τα εκκρίνει, καθιστά πολύ ενδιαφέρουσα τη μελέτη του για τη χρήση του σε μεθόδους φυτοεξυγίανσης.

3. Υλικά και Μέθοδοι

3.1. Επιλογή των συγκεκριμένων πειραματικών συνθηκών

Το έδαφος που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα συλλέχθηκε από ένα εγκαταλελειμμένο αγροτεμάχιο του Νομού Χανίων έτσι ώστε να μην περιέχει ήδη μέταλλα και ρύπους εξαιτίας των καλλιεργητικών μεθόδων και το οποίο επιλέχθηκε τυχαία έτσι ώστε τα αποτελέσματα του πειράματος να είναι πιο κοντά στα αποτελέσματα που θα είχαμε κατά την εφαρμογή κάποιας μεθόδου φυτοεξυγίανσης σε ένα οποιοδήποτε έδαφος της περιοχής. Επιλέχθηκε να μην χρησιμοποιηθεί φυτόχλωμα του εμπορίου διότι λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης οργανικής ουσίας που περιέχει είναι πολύ πιθανό να επηρεάζοταν η βιοδιαθεσιμότητα των μετάλλων και επομένως και η πρόσληψή τους από τα φυτά, όπως και αναλύθηκε στην παράγραφο 2.1.5.

Η εφαρμογή των δύο μετάλλων πραγματοποιήθηκε συγχρόνως στα φυτά και εξαιτίας της διαπίστωσης ότι σε ρυπασμένα εδάφη δεν υφίσταται μόνο ένα μέταλλο σε μεγάλες συγκεντρώσεις αλλά συνυπάρχουν διάφορα μέταλλα μαζί, τα οποία, όπως και έχει προαναφερθεί, αλληλεπιδρούν και επηρεάζουν την πρόσληψή τους από τα φυτά.

Επιλέχθηκε να μελετηθεί η επίδραση διαφορετικών συνθηκών εδαφικής αλατότητας στη συσσώρευση των μετάλλων στους φυτικούς ιστούς και στην έκκρισή τους από τους αλαταδένες και τις αλατώδεις κύστες διότι, όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 2.1.5., η αλατότητα του εδάφους έχει βρεθεί ότι επηρεάζει τη βιοδιαθεσιμότητα των μετάλλων και επομένως και την πρόσληψή τους από τα φυτά. Πολλές μελέτες αναφέρουν ότι η αύξηση της αλατότητας οδηγεί σε αύξηση της διαλυτότητας των μετάλλων στο εδαφικό διάλυμα (Bingham et al., 1983, Greger et al., 1995, Kirkham 2006, Ghnaya et al. 2007, Wahla & Kirkham 2009). Επίσης διότι, το NaCl φαίνεται να αποτελεί “κλειδί” στην αύξηση της μεταφοράς των μετάλλων από τις ρίζες στα υπέργεια μέρη των φυτών (Greger et al. 1995, Kadukova & Kalogerakis 2007, Manousaki et al. 2008, Manousaki & Kalogerakis 2009, Manousaki et al. 2009). Τέλος, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί επέμβαση αλατότητας με συγκέντρωση NaCl 0,5% γιατί αυτή η αλατότητα αντιπροσωπεύει τη συγκέντρωση άλατος που έχει πολλές φορές το νερό άρδευσης, και επέμβαση με συγκέντρωση NaCl 1% διότι αποτελεί τη συγκέντρωση στην οποία τα αλοφυτικά είδη παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη τους ανάπτυξη.

3.2. Προετοιμασία των φυτών

Τα φυτά του είδους *Tamarix parviflora* αγοράστηκαν από γεωπονικό κατάστημα των Χανίων και μεταφέρθηκαν στις γλάστρες του πειράματος. Τα εμφυτεύματα του φυτού

Halimione portulacoides συλλέχθηκαν από τον υγροβιότοπο του κόλπου της Σούδας Χανίων, όπου φύεται το φυτό, και στην συνέχεια μεταφέρθηκαν στο έδαφος για 2-3 εβδομάδες ώστε να ριζοβολήσουν και έπειτα στις γλάστρες του πειράματος. Τα εμφυτεύματα του είδους *Limoniastrum monopetalum* συλλέχθηκαν από τη νήσο Χρυσή της Κρήτης, όπου φύεται το είδος αυτό, και μεταφέρθηκαν στα Χανιά, μέσα σε περιβάλλον υγρασίας ώστε να αποτραπεί η ξήρανσή τους. Έπειτα τοποθετήθηκαν μέσα σε άμμο, σε θάλαμο υδρονέφωσης για περίπου 20 μέρες ώστε να ριζοβολήσουν. Όσα από αυτά ανέπτυξαν ρίζα φυτεύτηκαν στο χώμα και στις γλάστρες του πειράματος.

Το έδαφος που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα συλλέχθηκε από ένα εγκαταλελειμμένο αγροτεμάχιο του νομού Χανίων το οποίο επιλέχθηκε τυχαία. Αφού αφαιρέθηκαν χειρονακτικά όσες περισσότερες πέτρες ήταν εφικτό και αναμίχτηκε ώστε η σύστασή του να είναι ομοιόμορφη, τοποθετήθηκε σε γλάστρες ύψους 21,5 cm και διαμέτρου 24 cm έτσι ώστε κάθε γλάστρα να έχει περίπου την ίδια ποσότητα εδάφους. Σε κάθε γλάστρα του πειράματος τοποθετήθηκε χώμα συνολικού βάρους (ξηρού) κατά μέσο όρο ίσου με 5.208 g. Δύο διαφορετικά δείγματα του εδάφους αυτού αναλύθηκαν στο εργαστήριο εδαφολογίας και φυλλοδιαγνωστικής του Μεσογειακού Αγρονομικού Ινστιτούτου Χανίων. Τα χαρακτηριστικά του εδάφους φαίνονται στον Πίνακα 4 που ακολουθεί.

Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά του εδάφους που χρησιμοποιήθηκε στις γλάστρες του πειράματος. Φαίνονται τα αποτελέσματα για τα 2 διαφορετικά δείγματα.

	Δείγμα 1ο	Δείγμα 2ο
pH (1:2 H₂O)	6,13	6,45
CEC (NaAOC, pH 8,2) (me/100g)	2,52	2,51
Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (mS/cm)	0,51	0,8
Οργανική ουσία (%)	4,01	3,7
Ολικό CaCO₃ (%)	0	0
Άμμος (%)	50	52
Ιλύς (%)	32	32
Άργιλος (%)	18	16
Χαρακτηρισμός εδάφους	Πηλώδες / Αμμοπηλώδες	

Σε κάθε γλάστρα φυτεύτηκε ένα φυτό. Τα φυτά παρέμειναν σε εξωτερικό χώρο ώστε να προσαρμοστούν και να αναπτυχθούν, ενώ η άρδευση τους λάμβανε χώρα κάθε 2-5 μέρες όποτε ήταν απαραίτητο και ανάλογα με τις απαιτήσεις τους σε νερό. Η περίοδος

προσαρμογής διήρκησε 2 μήνες για το *T. parviflora*, 4 μήνες για το *H. portulacoides* και 8 μήνες για το *L. monopetalum*.

3.3. Κύριο Πειραματικό μέρος

3.3.1. Πειραματικός σχεδιασμός

Όταν τελείωσε η περίοδος προσαρμογής τα φυτά τοποθετήθηκαν μέσα σε γυάλινο θερμοκήπιο για 6 εβδομάδες (Μάρτιο-Απρίλιο). Κατά τη διάρκεια του πειράματος πραγματοποιούνταν μετρήσεις σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας μέσα στο θερμοκήπιο. Τις πρώτες 2 εβδομάδες λαμβάνονταν 2 φορές κατά τη διάρκεια της ημέρας, στις 09:30 και στις 15:00 ενώ λαμβάνονταν και μέτρηση της ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας της κάθε ημέρας. Έπειτα από τις 2 πρώτες πειραματικές εβδομάδες έγινε τοποθέτηση συσκευής data logger (Log32), μέσα στο θερμοκήπιο, με την οποία γινόταν καταγραφή των στοιχείων κάθε ώρα καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Η μέση θερμοκρασία, η σχετική υγρασία (%) και το εύρος των τιμών τους, για κάθε χρονική περίοδο της ημέρας (πρωί, μεσημέρι, απόγευμα και βράδυ) φαίνονται στον Πίνακα 5 που ακολουθεί.

Πίνακας 5. Οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας καθώς και οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές τους, που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος, για κάθε χρονική περίοδο της ημέρας.

	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)		Σχετική Υγρασία %	
	Εύρος	Μέση τιμή	Εύρος	Μέση τιμή
Πρωί	12,0 - 45,4	24,18	8,4 - 98,4	52,50
Μεσημέρι	13,6 - 53,80	32,48	7,20 - 87,30	36,99
Απόγευμα	12,0 - 45,4	26,23	9,80 - 82,4	41,10
Βράδυ	7,70 - 32,10	13,54	24,20 - 92,30	70,31

Επίσης πραγματοποιούνταν οπτική παρατήρηση και καταγραφή των μορφολογικών χαρακτηριστικών των φυτών έτσι ώστε να εντοπιστούν οποιαδήποτε συμπτώματα τοξικότητας από τα μέταλλα ή την αλατότητα. Η φωτοπερίοδος κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν από 11,5 ώρες έως 13 ώρες περίπου (U. S. Naval Observatory).

Τα φυτά του είδους *Tamarix parviflora* και *Halimione portulacoides* αριθμήθηκαν και χωρίστηκαν σε 6 ομάδες των 3 ατόμων (Group A,B,C,D,E,F και G,H,I,K,L,M αντίστοιχα), αφού μετρήθηκε το ύψος του κάθε φυτού και έτσι ώστε κάθε ομάδα να έχει περίπου την ίδια συνολική μέση βιομάζα με τις υπόλοιπες. Σε 3 ομάδες φυτών, του κάθε

είδους, πραγματοποιήθηκε προσθήκη Cd και Pb, ενώ οι υπόλοιπες 3 αποτέλεσαν τις επεμβάσεις ελέγχου (μάρτυρες). Κάθε μία από τις 3 ομάδες επέμβασης με βαρέα μέταλλα όπως και από τις 3 ομάδες ελέγχου, ποτίζονταν με νερό διαφορετικής αλατότητας, το οποίο παρασκευαζόταν επιτόπου με τη χρήση μαγειρικού αλατιού του εμπορίου. Στην μία ομάδα η άρδευση γινόταν με νερό από το δίκτυο, στην άλλη με προσθήκη νερού με 0,5% NaCl και η άλλη αρδευόταν με νερό 1% NaCl. Στους Πίνακες 6 & 7 παρακάτω φαίνονται οι ομάδες των φυτών και η επέμβαση που ακολουθήθηκε.

Τα φυτά του είδους *Limoniastrum monopetalum* χωρίστηκαν και αυτά σε ομάδες ανάλογα με το ύψος τους ώστε κάθε ομάδα να είναι περίπου της ίδιας συνολικής βιομάζας. Επειδή δεν υπήρχε μεγάλος αριθμός φυτών, λόγω αποτυχίας ριζοβολίας τους και δυσκολίας στην εύρεσή τους, επιλέχθηκε να χωριστούν σε 2 ομάδες των 3 ατόμων, στα οποία προστέθηκαν έπειτα τα μέταλλα και 2 ομάδες των 2 ατόμων ως μάρτυρες. Στον Πίνακα 8 ακολούθως φαίνονται οι ομάδες των φυτών του *Limoniastrum monopetalum* και οι επεμβάσεις σε κάθε ομάδα.

Πίνακας 6. Ομάδες των φυτών του *Tamarix parviflora* και οι επεμβάσεις που πραγματοποιήθηκαν.

<i>Tamarix parviflora</i>		
Ονομασία Ομάδας-επέμβασης	Συγκέντρωση Cd +Pb (ppm)	Συγκέντρωση NaCl (%)
A	0 + 0	0
B	0 + 0	0,5
C	0 + 0	1
D	20 + 800	0
E	20 + 800	0,5
F	20 + 800	1

Πίνακας 7. Ομάδες των φυτών του *Halimione portulacoides* και οι επεμβάσεις που πραγματοποιήθηκαν.

<i>Halimione portulacoides</i>		
Ονομασία Ομάδας-επέμβασης	Συγκέντρωση Cd +Pb (ppm)	Συγκέντρωση NaCl (%)
G	0 + 0	0
H	0 + 0	0,5
J	0 + 0	1
K	20 + 800	0
L	20 + 800	0,5
M	20 + 800	1

Πίνακας 8. Ομάδες των φυτών του *Limoniastrum monopetalum* και οι επεμβάσεις που έγιναν.

<i>Limoniastrum monopetalum</i>		
Ονομασία Ομάδας-επέμβασης	Συγκέντρωση Cd +Pb (ppm)	Συγκέντρωση NaCl (%)
S	0 + 0	0
T	0 + 0	1
X	20 + 800	0
W	20 + 800	1



Εικόνα 11. Τα φυτά του πειράματος στο θερμοκήπιο.

3.3.2. Έκθεση των φυτών στα μέταλλα

Έγινε τεχνητά προσθήκη υδατικού διαλύματος $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ και $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ στην ριζόσφαιρα, με μία δόση στην αρχή του πειράματος σύμφωνα με τον πειραματικό σχεδιασμό. Οι συγκεντρώσεις που επιλέχθηκαν ήταν 20 mg Cd / kg ξηρού βάρους εδάφους και 800 mg Pb / kg ξηρού βάρους εδάφους. Οι συγκεντρώσεις αυτές είναι 2,5 φορές μεγαλύτερες για το Cd και 2 φορές μεγαλύτερες για τον Pb, από τις ανώτερες οριακές τιμές, των μετάλλων αυτών για το έδαφος, που θεωρούνται τοξικές για τα φυτά (Orcutt & Nilsen 2000). Τα φυτά ποτίζονταν όλα με την ίδια ποσότητα νερού (περίπου 150-300 ml νερού), κάθε 2-3 μέρες και με τρόπο ώστε να αποφευχθεί η εκροή του νερού και η έκπλυση των μετάλλων από το χώμα, ενώ γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν και πλαστικά πιατάκια κάτω από τις γλάστρες.

3.3.3. Μετρήσεις στα Φυτά

3.3.3.1. Προσδιορισμός της ποσότητας Cd & Pb που εκκρίνεται στην επιφάνεια των φύλλων

Ο προσδιορισμός της ποσότητας των μετάλλων που εκκρίνεται στην επιφάνεια των φύλλων κάθε φυτού πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μέθοδο Hagemeyer & Waisel (1988). Με τη λήξη της πειραματικής περιόδου και την έκθεση των φυτών στα μέταλλα, τα υπέργεια τμήματα των φυτών αποκόπηκαν και εμβαπτίστηκαν σε 100 ml διαλύματος HNO_3 0,1% για 2 λεπτά έτσι ώστε να διαλυθούν όλες οι ενώσεις που βρίσκονταν στην επιφάνεια και μέσα στις κρύπτες των φύλλων. Στο διάλυμα που προέκυψε πραγματοποιήθηκε διήθηση και το διήθημα που προέκυψε αποθηκεύτηκε εν ψυχρώ έως τον προσδιορισμό του Cd και του Pb με τη χρήση φασματοσκοπίας ICP-MS (Agilent Technologies 7500 series CX). Τα πρότυπα διαλύματα (Cd και Pb σε 5% HNO_3) που χρησιμοποιήθηκαν για την καμπύλη αναφοράς του οργάνου παρασκευάστηκαν με αραίωση από εμπορικά πρότυπα συγκέντρωσης 1 mg/L.

3.3.3.2. Προσδιορισμός των παραμέτρων αύξησης

Με τη λήξη του πειράματος αποκόπηκαν όλα τα υπέργεια τμήματα των φυτών, πλύθηκαν με νερό βρύσης και εις διπλούν με απιονισμένο νερό ώστε να απομακρυνθούν όλα τα σωματίδια της σκόνης. Οι ρίζες απομακρύνθηκαν και αυτές με προσοχή από το έδαφος και πλύθηκαν εις διπλούν με νερό βρύσης και απιονισμένο νερό έως ότου απομακρυνθούν όλα τα σωματίδια του εδάφους. Στην συνέχεια έλαβε μέρος ο υπολογισμός του νωπού βάρους κάθε δείγματος αλλά και του ξηρού βάρους των διαφόρων φυτικών τμημάτων, μετά από ξήρανσή τους σε φούρνο στους 70 °C για 48 ώρες, για τον προσδιορισμό του περιεχομένου τους σε νερό και της βιομάζας. Ο υπολογισμός του περιεχομένου τους σε νερό γίνεται με την εξίσωση:

$$\text{Περιεχόμενο σε νερό (\%)} = [(\text{νωπό βάρος} - \text{ξηρό βάρος}) / \text{νωπό βάρος}] * 100$$

Στη συνέχεια τα ξηρά δείγματα αλέστηκαν σε μύλο και αποθηκεύτηκαν σε ξηρό περιβάλλον μέχρι τη μέτρηση του περιεχομένου τους σε μέταλλα με χρήση φασματοσκοπίας.

3.3.3.3. Προσδιορισμός της χλωροφύλλης

Ο προσδιορισμός της χλωροφύλλης πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μέθοδο του Harborne (1984). Την τελευταία μέρα του πειράματος δείγμα νωπών φύλλων βάρους 0,2g

για τα φυτά *Tamarix*, 0,4g για τα φυτά *Halimione* και βάρους 0,4g για τα φυτά *Limoniastrum*, λήφθηκε τυχαία από κάθε φυτό. Τα δείγματα πλύθηκαν με νερό βρύσης και απιονισμένο και αφέθηκαν να στεγνώσουν. Κατά τη μέθοδο αυτή το δείγμα του φυτικού ιστού τοποθετείται σε ιγδίο από πορσελάνη και ομογενοποιείται με 10 ml υδατικού διαλύματος ακετόνης 80% μέχρι πλήρους ομογενοποίησης των κυττάρων. Ακολουθώντας, πραγματοποιείται φυγοκέντριση στο εκχύλισμα 2 φορές από 1 λεπτό την κάθε φορά στις 16 000g και το καθαρό εκχύλισμα συμπληρώνεται με διάλυμα ακετόνης 80% έως τελικό όγκο 8 ml. Τέλος μετράται η απορρόφηση στα 663 και 646 nm σε φασματοφωτόμετρο UV (UV mini 1240 SHIMADZU) στις κατάλληλες αραιώσεις ώστε να βρίσκεται μέσα στο εύρος γραμμικότητας του οργάνου, ενώ ως τυφλό διάλυμα για τον μηδενισμό του οργάνου χρησιμοποιείται διάλυμα ακετόνης 80%. Η συγκέντρωση της a, b και ολικής χλωροφύλλης υπολογίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\text{Ολική χλωροφύλλη (mg/L)} = 17,3 A_{646} + 7,18 A_{663}$$

$$\text{Χλωροφύλλη a (mg/L)} = 12,21 A_{663} - 2,81 A_{646}$$

$$\text{Χλωροφύλλη b (mg/L)} = 20,13 A_{646} - 5,03 A_{663}$$

Όπου A_{663} και A_{646} η απορρόφηση στα 663 και 646 nm αντίστοιχα ενώ οι συγκεντρώσεις υπολογίστηκαν για 1g νωπού φύλλου.

3.3.3.4. Προσδιορισμός της συγκέντρωσης Cd & Pb στο φυτικό ιστό

Ο προσδιορισμός των συγκεντρώσεων των μετάλλων στο φυτικό ιστό πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με μία τροποποίηση της μεθόδου του Soon (1998). Σύμφωνα με αυτήν, 0,5g δείγματος ξηρού και κονιορτοποιημένου φυτικού ιστού τοποθετούνται σε πορσελάνινη κάψα και αποτεφρώνονται σε κλίβανο στους 480 °C για 16 ώρες. Στη συνέχεια τα δείγματα απομακρύνονται από τον κλίβανο και αφού κρυώσουν προστίθενται σε κάθε δείγμα 10 ml διαλύματος HCl 2N με ταυτόχρονη θέρμανση σε θερμαινόμενη πλάκα περίπου στους 100 °C ώστε να διαλυθεί η τέφρα. Στο διάλυμα που προκύπτει γίνεται διήθηση και αραιώση με καθαρό νερό έως τα 50 ml. Το τελικό διάλυμα αποθηκεύτηκε σε ψυγείο σε θερμοκρασία < 10 °C για χρονικό διάστημα όχι μεγαλύτερο από 1 εβδομάδα και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός των μετάλλων με χρήση φασματοσκοπίας ICP-MS (Agilent Technologies 7500 series cx). Τα πρότυπα διαλύματα που χρησιμοποιήθηκαν για την καμπύλη αναφοράς του οργάνου παρασκευάστηκαν με αραιώση από εμπορικά πρότυπα συγκέντρωσης 1 mg/L.

4. Αποτελέσματα και Συζήτηση

4.1. Υπό εξέταση φυτό: *Halimione portulacoides*

4.1.1. Συσσώρευση μετάλλων στον φυτικό ιστό

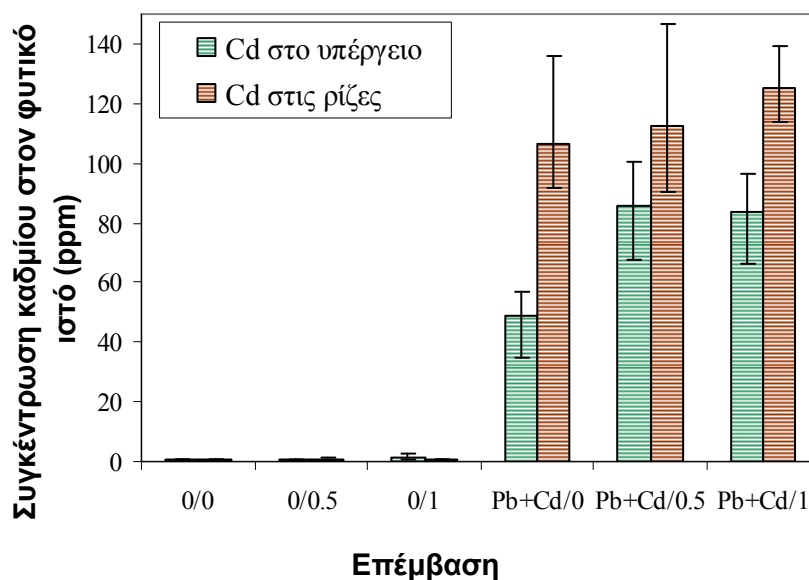
4.1.1.1. Κάδμιο

Οι συγκεντρώσεις του καδμίου στα υπέργεια τμήματα των φυτών, που καλλιεργήθηκαν σε ρυπασμένο έδαφος, υπολογίστηκαν να ξεπερνούν κατά πολύ το εύρος των συγκεντρώσεων του μετάλλου που θεωρούνται τοξικές για τα φυτά (5 – 30 ppm ξηρού βάρους σύμφωνα με τους: Orcutt & Nilsen 2000). Συγκεκριμένα, στα υπέργεια μέρη του φυτού η συγκέντρωση του καδμίου κυμαίνεται από 48,61 έως 85,50 ppm ξηρού βάρους ιστού, κατά μέσο όρο, ενώ η μέγιστη συγκέντρωση που μετρήθηκε ήταν 100,42 ppm. Στις ρίζες οι συγκεντρώσεις του καδμίου βρέθηκαν επίσης πολύ μεγάλες και συγκεκριμένα κυμαίνονταν από 106,75 ppm έως 124,95 ppm ξηρού βάρους ιστού με μέγιστη μέτρηση την 146,89 ppm. Πάραυτα, τα φυτά δεν παρουσίασαν συμπτώματα τοξικότητας κατά τη διάρκεια του πειράματος, γεγονός που θα συζητηθεί παρακάτω. Το φυτό αυτό φαίνεται ότι συγκεντρώνει μεγαλύτερες ποσότητες καδμίου στις ρίζες του σε σχέση με τα εναέρια τμήματα και ο λόγος της συγκέντρωσης υπέργειο: ρίζες υπολογίστηκε μεταξύ 0,45 – 0,76 παρατήρηση που συμφωνεί με τα αποτελέσματα προηγούμενων μελετών (Sousa et al. 2008).

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.1.1., η αύξηση της εδαφικής αλατότητας έχει θετική επίδραση στη συσσώρευση του καδμίου στα υπέργεια μέρη των φυτών. Η συγκέντρωση του καδμίου αυξάνει από 48,61 ppm που μετρήθηκε στα φυτά με μηδενική εδαφική αλατότητα, σε 85,50 ppm στα φυτά της επέμβασης με 0,5% αλατότητα, ενώ με την περαιτέρω αύξηση της εδαφικής αλατότητας στο 1%, η συγκέντρωση του καδμίου δεν φαίνεται να αυξάνει περισσότερο αλλά παραμένει στα ίδια επίπεδα. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνονται από προηγούμενες μελέτες οι οποίες υποστηρίζουν ότι η αύξηση της εδαφικής αλατότητας επιδρά θετικά στη συσσώρευση των μετάλλων στους φυτικούς ιστούς. Πολλές μελέτες αναφέρουν ότι η αύξηση της αλατότητας οδηγεί σε αύξηση της συσσώρευσης των μετάλλων στους φυτικούς ιστούς λόγω της αύξησης της διαλυτότητας των μετάλλων στο εδαφικό διάλυμα (Bingham et al. 1983, Greger et al. 1995, Kirkham 2006, Ghnaya et al. 2007, Wahla & Kirkham 2009) και λόγω της αυξημένης πρόσληψης νερού εξαιτίας της αυξημένης διαπνοής (Bingham et al. 1983, Wahla & Kirkham 2009). Επίσης, η αύξηση της αλατότητας παρατηρήθηκε να έχει θετική επίδραση στην απορρόφηση του καδμίου από το *Atriplex halimus* (Manousaki & Kalogerakis 2009),

συγγενικού είδους με το υπό εξέταση φυτό και από το *Tamarix smyrnensis* (Manousaki et al. 2008, Manousaki et al. 2009).

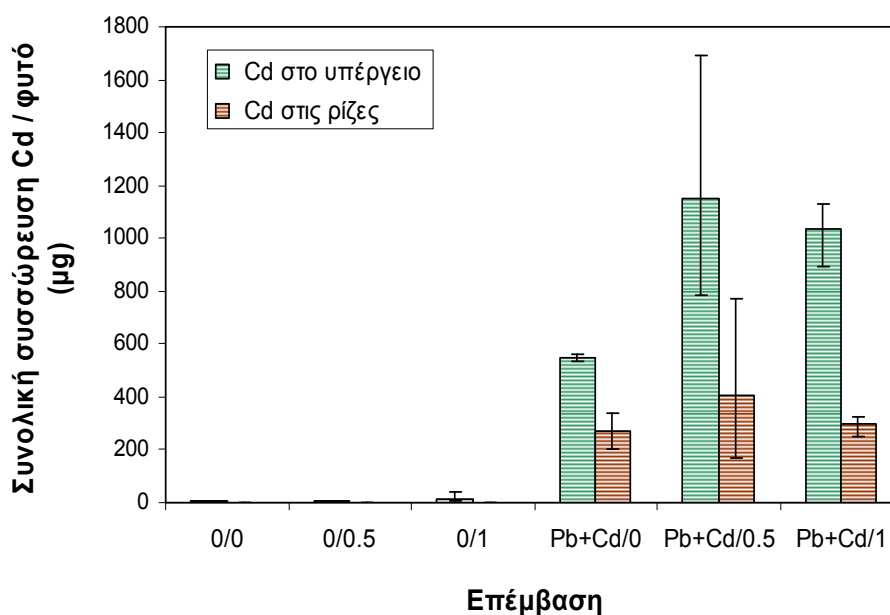
Η αύξηση της εδαφικής αλατότητας οδήγησε σε μικρή και όχι σημαντική αύξηση της συσσώρευσης του καδμίου στις ρίζες του *H. portulacoides*. Η συγκέντρωση του καδμίου είναι μεγαλύτερη, ουσιαστικά, στην επέμβαση με αλατότητα 1% ενώ παραμένει στα ίδια περίπου επίπεδα στις υπόλοιπες επεμβάσεις. Έχει προταθεί ότι το NaCl συμβάλει στη μεταφορά των μετάλλων από τις ρίζες στα υπέργεια μέρη των φυτών (Greger et al. 1995, Kadukova & Kalogerakis 2007, Manousaki et al. 2008). Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα είναι αναμενόμενο στην παρούσα μελέτη ο λόγος της συγκέντρωσης του καδμίου: υπέργειο/ρίζες να είναι μεγαλύτερος στις επεμβάσεις με την προσθήκη αλατιού σε σχέση με αυτές με τη μηδενική αλατότητα.



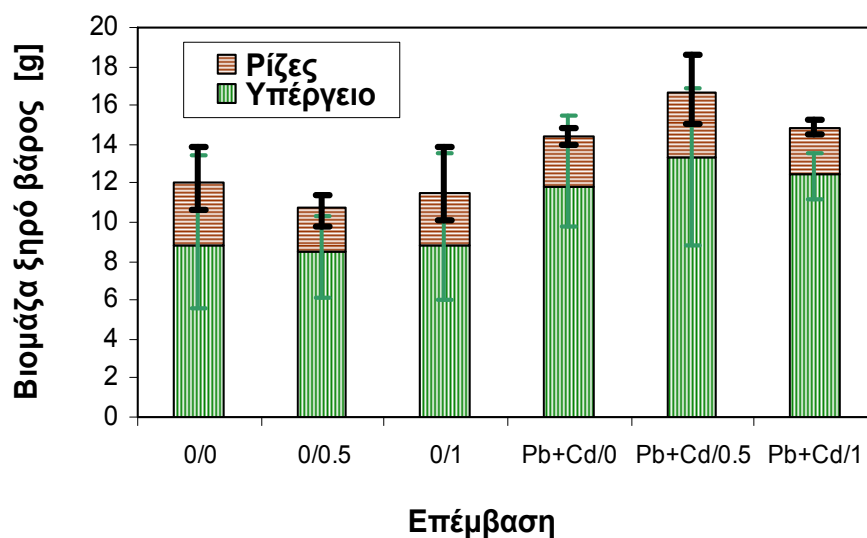
Σχήμα 4.1.1. Συγκέντρωση καδμίου (mg/kg ξηρού βάρους) στα υπέργεια μέρη και στις ρίζες του φυτού *H. portulacoides* που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσες τιμές (n=3) και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές.

Έτσι για τα φυτά που καλλιεργήθηκαν σε έδαφος χωρίς προσθήκη αλατιού ήταν 0,455 ενώ για τα φυτά σε έδαφος με 0,5 % και 1 % αλατότητα ήταν 0,76 και 0,67 αντίστοιχα, γεγονός που εξηγείται από τη σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης του καδμίου στα υπέργεια μέρη των φυτών και ταυτοχρόνως τη μικρή αύξηση της συγκέντρωσης του μετάλλου στις ρίζες.

Τα αποτελέσματα για τη συνολική απομάκρυνση του καδμίου από το έδαφος φαίνονται στο Σχήμα 4.1.2. και είναι ανάλογα με τα προηγούμενα. Το συνολικό κάδμιο που συσσωρεύτηκε στα υπέργεια μέρη του φυτού μετρήθηκε από: 549,38 – 1147,09 μg και η μέγιστη ποσότητα που συσσωρεύτηκε ήταν 1689,91 μg . Η συνολική συσσώρευση του καδμίου στα υπέργεια μέρη των φυτών είναι αυξημένη κατά το διπλάσιο στα φυτά με εδαφική αλατότητα 0,5% και 1% σε σχέση με αυτά με μηδενική αλατότητα λόγω της αύξησης της συγκέντρωσης του καδμίου κυρίως στα υπέργεια μέρη. Στις ρίζες παρουσιάζεται μία μικρή αύξηση μόνο στα φυτά με εδαφική αλατότητα 0,5 %. Σε αυτά με 1 % εδαφική αλατότητα η συνολική συσσώρευση του μετάλλου είναι στο ίδιο επίπεδο με αυτά με μηδενική εδαφική αλατότητα. Η μεγαλύτερη αύξηση της συνολικής συσσώρευσης του μετάλλου στις επεμβάσεις με προσθήκη των βαρέων μετάλλων οφείλεται και στην μεγαλύτερη παραγωγή βιομάζας των υπέργειων τμημάτων που παρουσίασαν τα φυτά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1.3. πιθανόν λόγω της προσθήκης των μετάλλων ως νιτρικά άλατα $\text{Cd}(\text{NO}_3)_4\text{H}_2\text{O}$ και $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ και της ωφέλειας που μπορεί να είχε το άζωτο στην ανάπτυξη των φυτών.



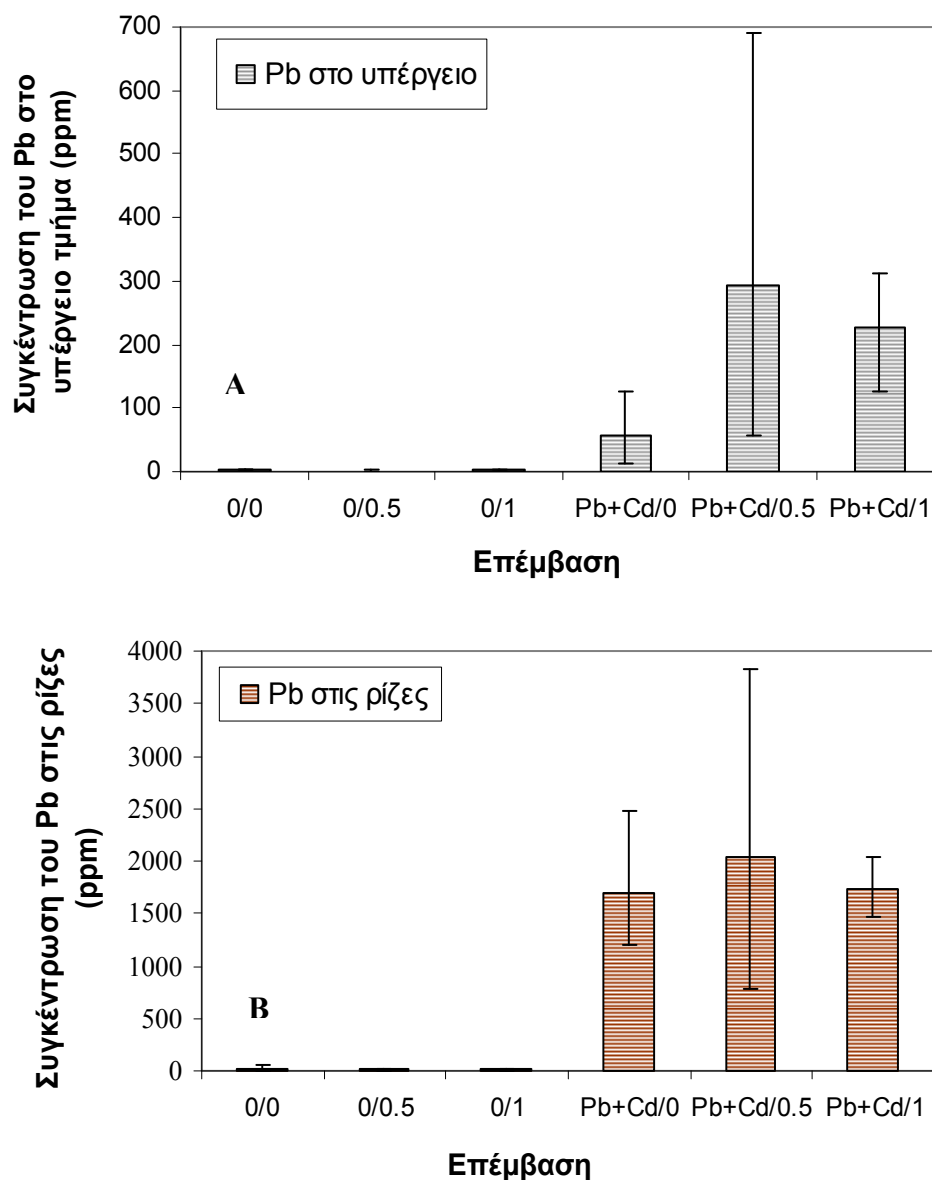
Σχήμα 4.1.2. Συνολική συσσώρευση καδμίου στους φυτικούς ιστούς (μg) του *H. portulacoides* που καλλιεργήθηκε σε μη ρυπασμένο έδαφος και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσες τιμές ($n=3$) και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές.



Σχήμα 4.1.3. Βιομάζα του *H. portulacoides* που καλλιεργήθηκε σε έδαφος μη ρυπασμένο και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσοι όροι των τιμών ($n=3$) και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές.

4.1.1.2. Μόλυβδος

Όσον αφορά στη συγκέντρωση του Pb στα υπέργεια τμήματα των φυτών, μετρήθηκε, κατά μέσο όρο, μέσα στα όρια των συγκεντρώσεων που θεωρούνται τοξικές για τα υπέργεια μέρη των φυτών και οι οποίες είναι από 30-300 ppm (Orcutt & Nilsen 2000). Οι συγκεντρώσεις στα υπέργεια μέρη κυμαίνονταν από 57,65 ppm έως 294,14 ppm και μόνο στην περίπτωση ενός φυτού από την επέμβαση με 0,5 % αλάτι μετρήθηκε κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτά τα όρια και συγκεκριμένα έφτανε τα 691,26 mg/kg αλλά το φυτό δεν παρουσίασε κανένα οπτικό σύμπτωμα τοξικότητας μέχρι και την 6^η εβδομάδα του πειράματος όπου τερματίστηκε το πείραμα και έγιναν οι μετρήσεις.

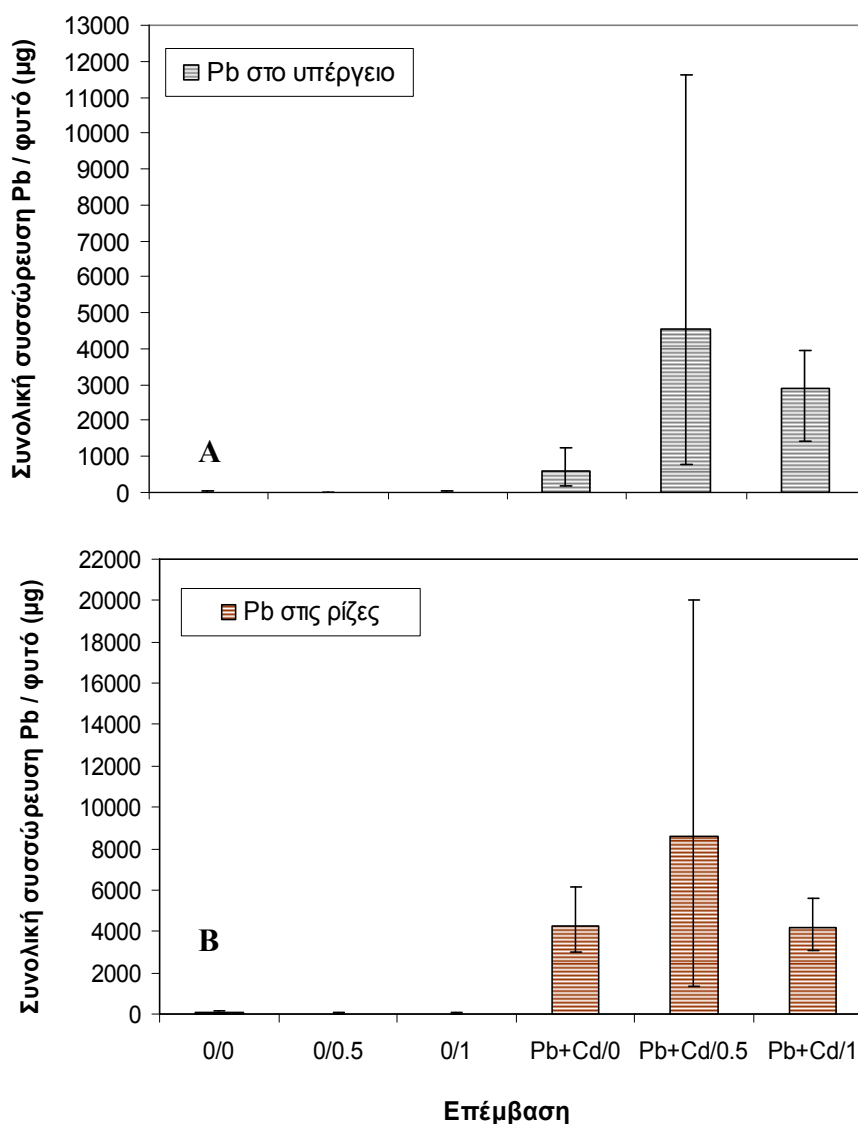


Σχήμα 4.1.4. Συγκέντρωση μολύβδου (mg/kg ξηρού βάρους) στα υπέργεια μέρη των φυτών (A) και στις ρίζες (B), του *Halimione portulacoides* που καλλιεργήθηκε σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσοι όροι των τιμών ($n=3$) και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές.

Στις ρίζες οι συγκεντρώσεις του μολύβδου μετρήθηκαν από 1688,04 ppm έως 2032,57 ppm και είναι πολύ μεγαλύτερες από τη συγκέντρωση του Pb στα υπέργεια μέρη πράγμα που συμφωνεί με προηγούμενες μελέτες κατά τις οποίες είχε παρατηρηθεί ότι η κύρια θέση συσσώρευσης του μολύβδου στο φυτό αυτό αλλά και στο συγγενικό του, *Atriplex halimus*, είναι οι ρίζες (Sousa et al. 2008, Manousaki & Kalogerakis 2009).

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1.4.A, η συγκέντρωση του μολύβδου στα υπέργεια φυτικά τμήματα αυξήθηκε με την προσθήκη και την αύξηση αλατιού στο έδαφος και η μέγιστη συγκέντρωση παρατηρήθηκε στην επέμβαση με 0,5% εδαφική αλατότητα. Παρόλα αυτά, η αύξηση της συγκέντρωσης του Pb δεν είναι ανάλογη της αύξησης της εδαφικής αλατότητας αφού μειώνεται στην επέμβαση με 1% εδαφική αλατότητα σε σχέση με αυτή με 0,5% εδαφική αλατότητα. Στις ρίζες (Σχήμα 4.1.4.B) δεν παρατηρείται σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης του μετάλλου με την αύξηση της εδαφικής αλατότητας. Ο λόγος συγκέντρωσης Pb: υπέργειο / ρίζες είναι 0.0034, 0.144, 0.131 αντίστοιχα για τις επεμβάσεις με εδαφική αλατότητα 0%, 0.5%, 1%. Είναι μεγαλύτερος στις επεμβάσεις με μεγαλύτερη εδαφική αλατότητα από τη μηδενική, που σημαίνει ότι η αύξηση της αλατότητας φαίνεται να συμβάλει στην μετακίνηση μολύβδου από τις ρίζες προς τα υπέργεια τμήματα. Παρατηρείται όμως και εδώ, όπως και στο πείραμα με το κάδμιο, ότι η συγκέντρωση του μολύβδου, στις ρίζες, αυξάνει ή παραμένει στα ίδια επίπεδα και δεν μειώνεται όσο αυξάνει η συγκέντρωσή του στα υπέργεια μέρη των φυτών (Σχήμα 4.1.4.B), επομένως δεν παρατηρείται απλά μεταφορά του μετάλλου από τις ρίζες προς τα υπέργεια μέρη των φυτών με την αύξηση της εδαφικής αλατότητας αλλά αύξηση της απορρόφησής του μετάλλου γενικά από τα φυτά.

Η συνολική ποσότητα του Pb που συσσωρεύτηκε στα υπέργεια μέρη των φυτών είναι και αυτή αναμενόμενα μεγαλύτερη στις επεμβάσεις με μεγαλύτερη εδαφική αλατότητα όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.1.5.A. Παρατηρήθηκε σχεδόν 8πλάσια συσσώρευση Pb στα φυτά της επέμβασης με 0,5% εδαφική αλατότητα και σχεδόν 5πλάσια συσσώρευση στα φυτά με 1% εδαφική αλατότητα σε σχέση με αυτά με την μηδενική εδαφική αλατότητα. Υπολογίστηκε ότι τα φυτά με εδαφική αλατότητα 0,5% συσσώρευσαν κατά μέσο όρο στα υπέργεια τμήματά τους, κατά τη διάρκεια του πειράματος, μέχρι και 4543,87 μg Pb ενώ η μέγιστη συσσώρευση έφτασε τα 11.632,80 μg Pb. Η συνολική συσσώρευση του μολύβδου δεν αυξάνει ανάλογα με την αύξηση της εδαφικής αλατότητας αλλά μετρήθηκε μικρότερη στα φυτά της επέμβασης με 1% αλατότητα σε σχέση με αυτά με 0,5% αλατότητα, όπως παρατηρήθηκε όμοια και για τη συγκέντρωση (ppm) του μολύβδου. Η αύξηση αυτή της συνολικής απομάκρυνσης του μολύβδου στις επεμβάσεις με μεγαλύτερη εδαφική αλατότητα παρατηρείται λόγω της αύξησης της υπέργειας βιομάζας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1.3., όπου παρατηρείται ιδιαίτερα στην επέμβαση με 0,5% εδαφική αλατότητα και συγχρόνως και αύξηση της συγκέντρωσης του μολύβδου στα υπέργεια μέρη των φυτών.



Σχήμα 4.1.5. Συνολική ποσότητα Pb (μg) στα υπέργεια μέρη (Α) και στις ρίζες (Β) του *H. portulacoides* που καλλιεργήθηκε σε έδαφος καθαρό και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσοι όροι των τιμών ($n=3$) και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές.

Η συνολική συσσώρευση του Pb στις ρίζες κυμαίνονταν από 4192,98 έως 8631,12 μg ενώ η μέγιστη ποσότητα που μετρήθηκε ήταν 20.034,97 μg στην επέμβαση με το 0,5% NaCl. Η συνολική συσσώρευση στις ρίζες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1.5.B, αυξομειώνεται ανάλογα με τις διακυμάνσεις της συγκέντρωσης του μολύβδου αφού η βιομάζα των ριζών δεν άλλαξε σημαντικά.

4.1.2. Έκκριση Cd και Pb από τον υπέργειο φυτικό ιστό

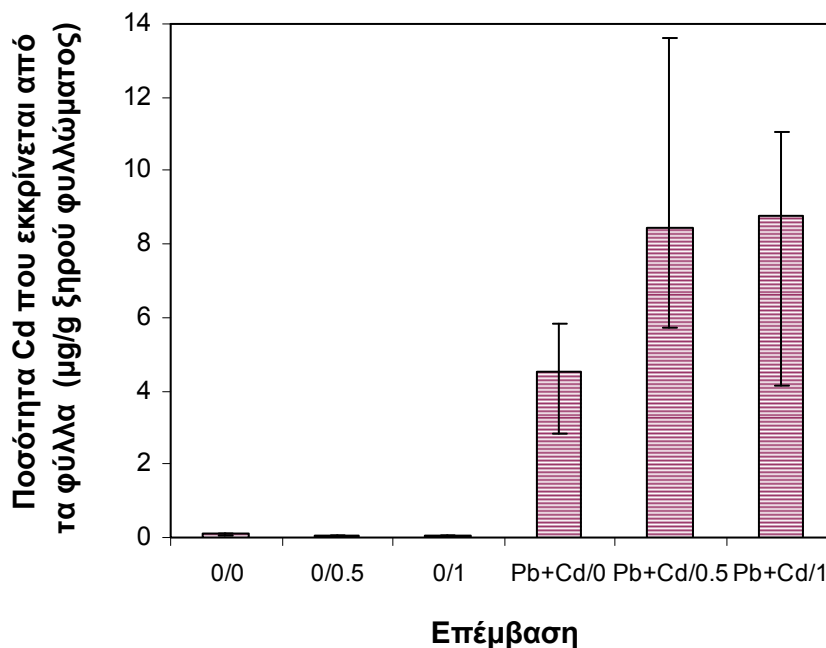
Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι πραγματοποιείται έκκριση καδμίου και μολύβδου, εκτός από τα περίσσεια άλατα, από τις αλατώδεις κύστες του *Halimione portulacoides*, επεκτείνοντας τις μέχρι τώρα παρατηρήσεις άλλων ερευνητών που μελέτησαν διαφορετικά φυτά του ίδιου γένους και παρατήρησαν ότι λαμβάνει χώρα έκκριση μετάλλων, όπως Cd, Zn, Se, B, Mo, Cu, Pb, από τα φύλλα τους (Lutts et al. 2004, Reboreda & Caçador 2007, Lefèvre et al. 2009, Manousaki & Kalogerakis 2010). Επίσης, οι παρατηρήσεις αυτές επιβεβαιώνουν την υπόθεση του Reboreda (2001) ο οποίος μελέτησε το *Halimione portulacoides* και υπέθεσε ότι εκκρίνει κάδμιο από τις αλατώδεις κύστες του. Στην Εικόνα 12 φαίνονται τα φύλλα του *H. portulacoides* από φυτό του πειράματος και οι εκκρίσεις.



Εικόνα 12. Φύλλο του *Halimione portulacoides* του πειράματος, στο οποίο φαίνονται οι ουσίες και τα άλατα που εκκρίνονται από τις αλατώδεις κύστες.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1.6. ενώ η έκκριση του καδμίου από τα φύλλα των φυτών του *H. portulacoides* που ήταν οι “μάρτυρες” είναι ελάχιστη, στα φυτά στα οποία έγινε προσθήκη καδμίου και μολύβδου η έκκριση του Cd είναι κατά πολύ μεγαλύτερη. Συγκεκριμένα στην επέμβαση με 0% εδαφική αλατότητα είναι 4,5 φορές μεγαλύτερη και στις επεμβάσεις με 0,5% και 1% αλατότητα είναι σχεδόν 8,5 φορές και σχεδόν 9 φορές μεγαλύτερη αντίστοιχα και φτάνει τα 8,75 ppm κατά μέσο όρο ενώ η μέγιστη τιμή που μετρήθηκε ήταν 13,61 ppm. Παρατηρείται επίσης ότι η έκκριση του καδμίου είναι διπλάσια στις επεμβάσεις με αυξημένη εδαφική αλατότητα (επεμβάσεις: “Pb+Cd/0.5”,

“Pb+Cd/1”) γεγονός που επιβεβαιώνει την υπόθεση ότι λαμβάνει χώρα μεγαλύτερη έκκριση μετάλλων στις υψηλότερες αλατότητες.

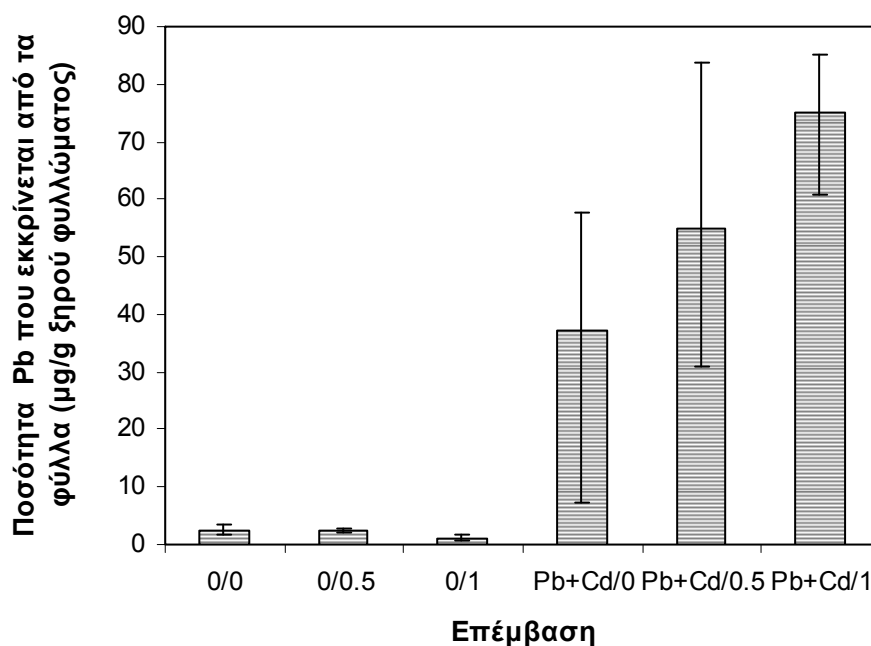


Σχήμα 4.1.6. Ποσό Cd (μg/g) που εκκρίνεται από τα φύλλα του *H. portulacoides* το οποίο καλλιεργήθηκε σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσοι όροι των τιμών (n=3) και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές.

Η μεγαλύτερη έκκριση με τη μεγαλύτερη εδαφική αλατότητα πιθανότατα οφείλεται στην αύξηση της απορρόφησης των μετάλλων από τα φυτά λόγω της αύξησης της διαλυτότητας τους στο εδαφικό διάλυμα (Bingham et al. 1983, Greger et al. 1995, Kirkham 2006, Ghnaya et al. 2007, Wahla & Kirkham 2009). Η αύξηση της αλατότητας παρατηρήθηκε να αυξάνει την απορρόφηση του καδμίου και από το συγγενικό είδος *Atriplex halimus* (Manousaki & Kalogerakis 2009). Επίσης, σε πολλές μελέτες έχει παρατηρηθεί η μεταφορά των μετάλλων από τις ρίζες προς τα υπέργεια μέρη των φυτών και συνεπώς και προς τους εκκριτικούς αδένες τους (Greger et al. 1995, Kadukova & Kalogerakis 2007, Manousaki et al. 2008). Αξιοσημείωτο είναι ότι η περαιτέρω αύξηση της εδαφικής αλατότητας από 0,5% σε 1% δεν προκάλεσε σημαντική αύξηση της έκκρισης του καδμίου.

Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 4.1.7. στα φυτά μάρτυρες εκκρίνεται κάποια μικρή ποσότητα μολύβδου στα φύλλα τους αλλά είναι ελάχιστη σε σχέση με αυτή που εκκρίνεται από τα φύλλα των φυτών στα οποία προσθέσαμε τα μέταλλα. Επιβεβαιώνεται επομένως

ξανά ότι οι εκκριτικοί αδένες του φυτού αυτού δεν είναι εκλεκτικοί και ότι η σύσταση των αλάτων που εκκρίνονται είναι ανάλογη με τη σύσταση του εδαφικού διαλύματος.



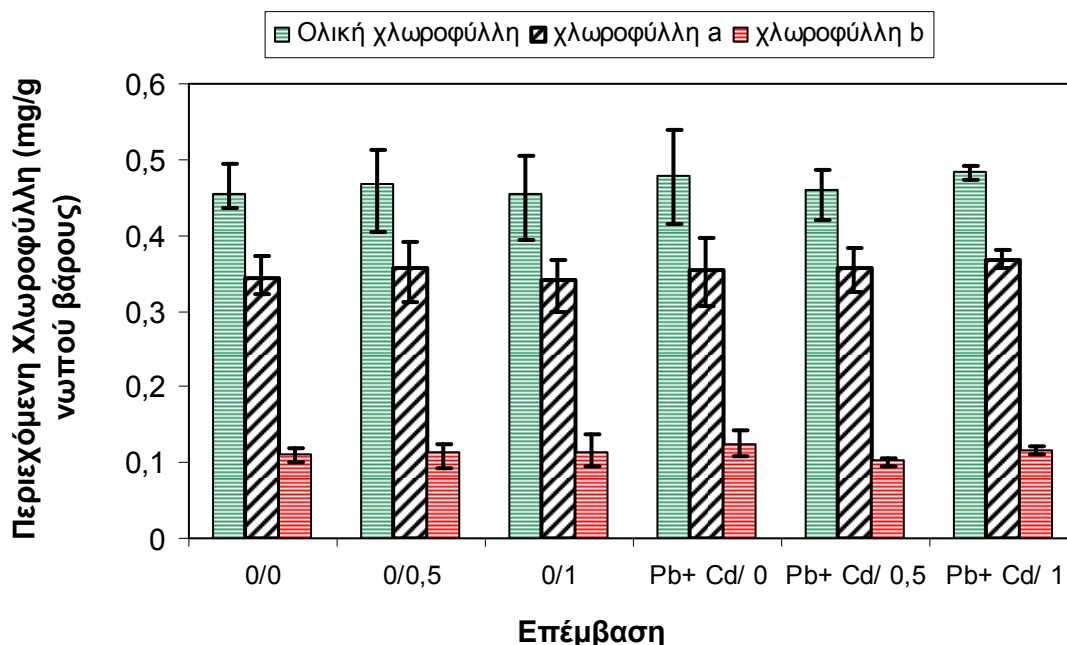
Σχήμα 4.1.7. Ποσό Pb ($\mu\text{g/g}$) που εκκρίνεται από τα φύλλα του *H. portulacoides* το οποίο καλλιεργήθηκε σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσοι όροι των τιμών ($n=3$) και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές

Όσον αφορά την επίδραση της αλατότητας στην έκκριση του Pb, αυτή επιδρά θετικά στην αύξηση της ποσότητας του Pb που εκκρίνεται από τις αλατώδεις κύστες του φυτού. Η έκκριση του μετάλλου στην επέμβαση με 0,5% και με 1% εδαφική αλατότητα είναι περίπου 1,5 και 2 φορές μεγαλύτερη από την έκκριση στην επέμβαση με μηδενική εδαφική αλατότητα αντιστοίχως, ενώ και η έκκριση στην επέμβαση με 1% αλατότητα εμφανίζεται περίπου 1,3 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή με 0,5% αλατότητα.

4.1.3. Επίδραση των μετάλλων και της εδαφικής αλατότητας στα παραγωγικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά του *Halimione portulacoides*

Κατά τη διάρκεια του πειράματος και μέχρι τη λήξη του φάνηκε ότι τα φυτά του *Halimione portulacoides* δεν παρουσίασαν κανένα οπτικό σύμπτωμα τοξικότητας από τα βαρέα μέταλλα ή την υψηλή εδαφική αλατότητα.

Όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 4.1.8. που ακολουθεί οι φωτοσυνθετικές χρωστικές του *H. portulacoides* δεν φαίνεται να επηρεάστηκαν από τα βαρέα μέταλλα ή από την υψηλότερη εδαφική αλατότητα ή ακόμα και από τη σύγχρονη επίδραση και των δύο καταπονήσεων.

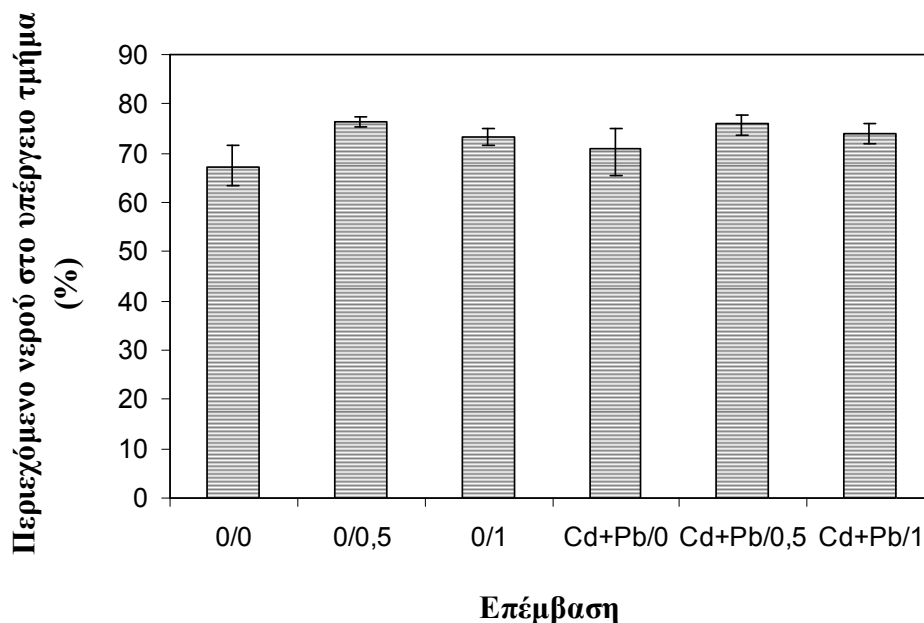


Σχήμα 4.1.8. Περιεχόμενη χλωροφύλλη (mg/g νωπού βάρους) στα φύλλα του *Halimione portulacoides* που καλλιεργήθηκε σε έδαφος καθαρό και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσοι όροι των τιμών ($n=3$) και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές

Το περιεχόμενο σε νερό (%) στο υπέργειο τμήμα των φυτών του *H. portulacoides*, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 4.1.9. παρακάτω, δεν φαίνεται να επηρεάζεται ούτε από την αύξηση της εδαφικής αλατότητας αλλά ούτε και από την προσθήκη των μετάλλων. Είναι γνωστό ότι η αλατότητα επηρεάζει το οσμωτικό δυναμικό και προκαλεί οσμωτική καταπόνηση. Τα χαμηλά οσμωτικά δυναμικά που δημιουργούνται στο έδαφος λόγω της συγκέντρωσης ιόντων παρακρατούν το νερό (Καραμπουρνιώτης 2003, Γαλάτης και λοιποί 2009) οπότε θα περίμενε κανείς το ποσοστό του νερού στα φύλλα να έχει μειωθεί λόγω της υδατικής καταπόνησης που προκαλεί η αυξημένη εδαφική αλατότητα. Εδώ όμως φαίνεται ότι η εδαφική αλατότητα του 0,5% ή του 1% δεν προκαλεί μείωση του

περιεχομένου σε νερό και άρα συμπεραίνουμε ότι δεν προκαλεί υδατική καταπόνηση στα φυτά επιβεβαιώνοντας την αλοφυτική τους φύση.

Το περιεχόμενο σε νερό στα υπέργεια τμήματα του *H. portulacoides* δεν βρέθηκε να μειώνεται από την παρουσία των μετάλλων, υποδεικνύοντας ότι τα μέταλλα δεν προκαλούν μία δευτερεύουσα υδατική καταπόνηση στο φυτό.



Σχήμα 4.1.9. Περιεχόμενο σε νερό (%) του *H. portulacoides* που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσοι όροι των τιμών ($v=3$) και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές

Η ξηρή βιομάζα του *H. portulacoides* αυξήθηκε στα φυτά των επεμβάσεων με τα βαρέα μέταλλα σε σχέση με αυτή των επεμβάσεων ελέγχου (Σχήμα 4.1.3.). Συγκεκριμένα η συνολική βιομάζα αυξήθηκε λόγω της αύξησης της βιομάζας των υπέργειων τμημάτων των φυτών και η πιο μεγάλη αύξηση παρατηρήθηκε στα φυτά της επέμβασης με την 0,5% εδαφική αλατότητα. Πιθανόν λοιπόν η αλατότητα του 0,5% να ευνοεί περισσότερο την ανάπτυξη των φυτών αυτού του είδους από την αλατότητα του 1 %. Η αύξηση της βιομάζας των υπέργειων τμημάτων μπορεί να εξηγηθεί, όπως προαναφέρθηκε, λόγω της προσθήκης των μετάλλων με τη μορφή νιτρικών αλάτων και άρα την προσθήκη αζώτου στο έδαφος, το οποίο είναι ένα απαραίτητο συστατικό για την ανάπτυξη των φυτών. Η βιομάζα των ριζών των φυτών δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των

επεμβάσεων και φαίνεται να μην επηρεάζεται ούτε από την υψηλότερη εδαφική αλατότητα ούτε από την προσθήκη των μετάλλων.

4.1.4. Συνοπτικά αποτελέσματα για το φυτό *Halimione portulacoides*

Στην παρούσα μελέτη το *Halimione portulacoides* βρέθηκε να συγκεντρώνει μεγάλες ποσότητες Cd και Pb στους ιστούς του, συγκεντρώσεις στα υπέργεια μέρη του πολύ μεγαλύτερες από αυτές που θεωρούνται τοξικές για τα φυτά και τέτοιες ώστε το φυτό αυτό να μπορεί να θεωρηθεί ένας πιθανός συσσωρευτής του Cd. Παρόλο που, έως τώρα, έχουν μελετηθεί αρκετά, διάφορα συγγενικά του είδη, η μέχρι τώρα έρευνα που είχε γίνει για το είδος αυτό ήταν ελλιπής και αφορούσε μόνο υδροπονικές καλλιέργειες και όχι σε έδαφος, με αποτέλεσμα να μην λαμβάνονται υπόψη όλοι οι περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως π.χ. η βιοδιαθεσιμότητα των μετάλλων στο έδαφος.

Το *Halimione portulacoides* συγκεντρώνει μεγαλύτερες ποσότητες καδμίου και μολύβδου στις ρίζες απ' ό τι στα υπέργεια μέρη του, παρατήρηση που συμφωνεί με τα αποτελέσματα προηγούμενων μελετών γι' αυτό το είδος (Sousa et al. 2008) και για το συγγενικό του *Atriplex halimus* (Manousaki & Kalogerakis 2009). Η συνολική ποσότητα καδμίου όμως που συσσωρεύτηκε στα υπέργεια μέρη των φυτών ήταν πολύ μεγαλύτερη (Σχήμα 4.1.2.) από αυτήν που συσσωρεύτηκε στις ρίζες λόγω της αύξησης της βιομάζας των υπέργειων τμημάτων που παρατηρήθηκε στα φυτά των επεμβάσεων με τα μέταλλα (Σχήμα 4.1.3.) και έφτανε μέχρι και τα 1147,09 μg/ φυτό. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για τις εφαρμογές της φυτοσυσσωρευσης όπου στόχος είναι ο θερισμός και η απομάκρυνση των υπέργειων τμημάτων των φυτών.

Η πρόσληψη του Cd από τα υπέργεια μέρη του φυτού αυξήθηκε με την αύξηση της εδαφικής αλατότητας από 0 σε 0,5% ενώ η παραπέρα αύξηση της αλατότητας δεν είχε κανένα σημαντικό αποτέλεσμα. Η πρόσληψη του Cd από τις ρίζες δεν παρουσίασε σημαντική αύξηση με την αύξηση της αλατότητας ενώ δεν φαίνεται να υπήρξε σημαντική μετακίνηση του μετάλλου από τις ρίζες προς τα υπέργεια μέρη με την αύξηση της αλατότητας.

Η πρόσληψη του Pb από τα υπέργεια μέρη των φυτών αυξήθηκε με την αύξηση της αλατότητας ενώ στις ρίζες η συγκέντρωση του μολύβδου αυξήθηκε μόνο με την αύξηση της αλατότητας από 0 σε 0,5%. Ομοίως και εδώ δεν φαίνεται η αύξηση της αλατότητας να οδήγησε σε μετακίνηση του μολύβδου από τις ρίζες προς τα υπέργεια μέρη των φυτών.

Αν ληφθούν υπόψη όλα τα μορφολογικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των φυτών που μελετήθηκαν μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο μόλυβδος και το κάδμιο, για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα του πειράματος και στις συγκεκριμένες συγκεντρώσεις, δεν είχαν δυσμενείς επιπτώσεις στη λειτουργία των φυτών. Η καταπόνηση από τα βαρέα μέταλλα δεν είχε καμία ορατή επίπτωση στην επιβίωση των φυτών και δεν παρουσιάστηκε καμία ορατή ένδειξη τοξικότητας. Η βιομάζα, το περιεχόμενο σε νερό των βλαστών και οι χλωροφύλλες των φυτών δεν παρεμποδίστηκαν από τα μέταλλα αλλά αντιθέτως η βιομάζα των υπέργειων τμημάτων ήταν μεγαλύτερη στις επεμβάσεις με τα μέταλλα και αυτό πιθανόν λόγω της σύγχρονης προσθήκης αζώτου μαζί με την προσθήκη των βαρέων μετάλλων.

Τα αποτελέσματα του πειράματος επιβεβαιώνουν τις υποθέσεις κάποιων ερευνητών ότι το *Halimione portulacoides* εκκρίνει μέταλλα και συγκεκριμένα Cd και Pb από τις αλατώδεις κύστες του, επομένως μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι εξειδικευμένοι αδένες του φυτού αυτού δεν είναι εκλεκτικοί και ότι η σύσταση των αλάτων που εκκρίνονται είναι ανάλογη της σύστασης του εδαφικού διαλύματος. Επιπλέον, επιβεβαιώνεται η υπόθεση ότι η αύξηση της εδαφικής αλατότητας οδηγεί σε αύξηση της έκκρισης του Cd και του Pb.

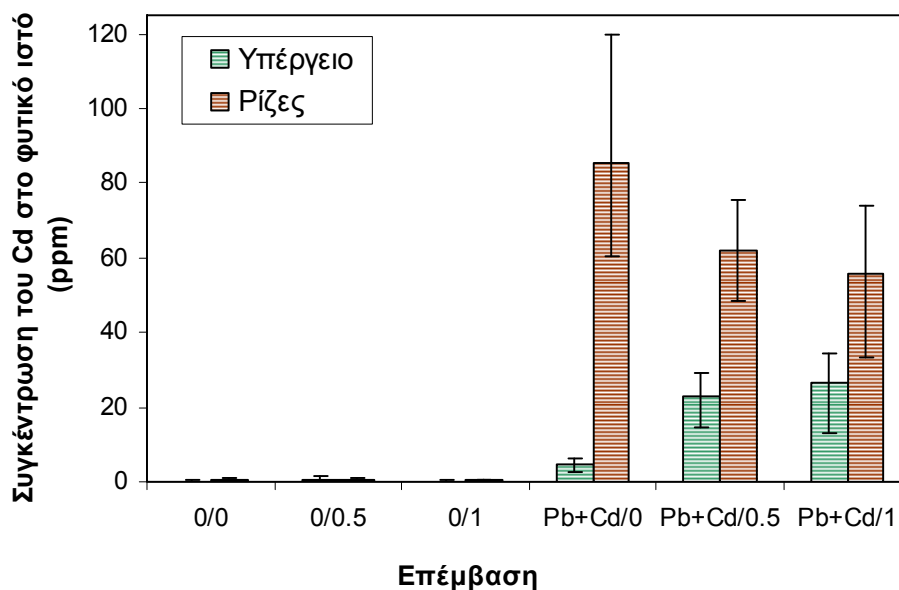
4.2. Υπό εξέταση φυτό *Tamarix parviflora*

4.2.1. Συσσώρευση μετάλλων στο φυτικό ιστό

4.2.1.1. Κάδμιο

Οι συγκεντρώσεις του καδμίου στο υπέργειο τμήμα του *Tamarix parviflora* (Σχήμα 4.2.1) κυμαίνονται από 4,61 έως 26,61 ppm ξηρού βάρους, κατά μέσο όρο, ενώ η μέγιστη συγκέντρωση που μετρήθηκε ήταν 34,49 ppm σε φυτό της επέμβασης με 1% NaCl. Οι συγκεντρώσεις αυτές είναι μέσα στα ανώτερα όρια των συγκεντρώσεων που θεωρούνται τοξικές για τα φυτά (5-30 ppm ξηρού βάρους, σύμφωνα με τους Orcutt & Nilsen 2000), εκτός από την περίπτωση που προαναφέρθηκε. Στις ρίζες οι μέσες συγκεντρώσεις κυμαίνονται από 55,75 έως 85,22 ppm, μεγαλύτερες από τις συγκεντρώσεις στα υπέργεια τμήματα, γεγονός που συμφωνεί και με προηγούμενες μελέτες άλλων ειδών *Tamarix* κατά τις οποίες είχε επίσης παρατηρηθεί ότι η κύρια θέση συσσώρευσης του Cd ήταν οι ρίζες (Al-Taisan 2009, Manousaki et al. 2009)

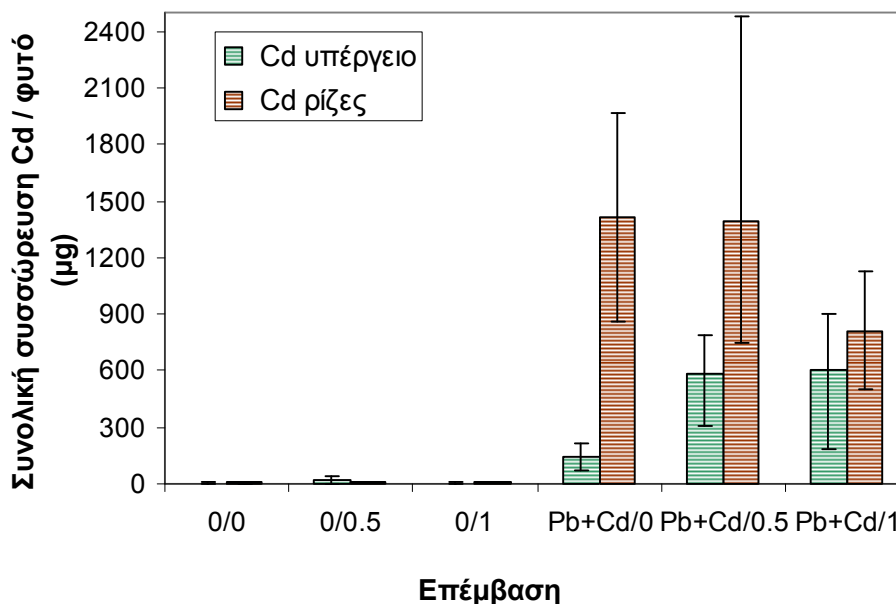
Η αύξηση της εδαφικής αλατότητας φαίνεται ότι είχε θετική επίδραση στην απορρόφηση του καδμίου από τα υπέργεια μέρη των φυτών εφόσον η συγκέντρωση του αυξάνει με την αύξηση της αλατότητας, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 4.2.1. Σε ανάλογο αποτέλεσμα κατέληξε και προηγούμενη μελέτη πάνω στο είδος *Tamarix smyrnensis* (Manousaki et al. 2009). Συγχρόνως, όμως, η συγκέντρωση του μετάλλου στις ρίζες των φυτών μειώνεται όσο αυξάνει η εδαφική αλατότητα και συγκεκριμένα ο λόγος της συγκέντρωσης του Cd: υπέργειο / ρίζες αυξάνει από 0,05 σε 0,36 και 0,47 αντίστοιχα για τις εδαφικές αλατότητες: 0%, 0,5%, 1%. Η παρατήρηση αυτή υποδηλώνει ότι συμβαίνει μετακίνηση του μετάλλου από τις ρίζες προς τα υπέργεια μέρη των φυτών με την αύξηση της αλατότητας. Αύξηση της μεταφοράς του καδμίου, από τις ρίζες προς τα υπέργεια μέρη με την αύξηση της αλατότητας, έχει παρατηρήσει ο Helal και οι συνεργάτες του (1999) στο φυτό *Leucaena leucocephala* (Kholodova et al. 2010) καθώς και οι Manousaki et al. (2009) σε υδροπονική καλλιέργεια και η Μανουσάκη (2008) σε καλλιέργεια σε έδαφος του, συγγενικού με το υπό εξέταση είδος, *Tamarix smyrnensis*.



Σχήμα 4.2.1. Συγκέντρωση του καδμίου (mg/kg ξηρού βάρους) στα υπέργεια μέρη και τις ρίζες του *Tamarix parviflora* που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσες τιμές ($v=3$) και οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές.

Η συνολική ποσότητα του Cd που απορροφάται από τα υπέργεια μέρη των φυτών του *Tamarix*, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.2.2. που ακολουθεί, υπολογίστηκε από 145,57 έως 602,20 μg και στις ρίζες από 811,94 έως 1414,91 μg , κατά μέσο όρο. Στα

υπέργεια μέρη η συνολική συσσώρευση του Cd αυξήθηκε αρκετά με την προσθήκη του NaCl διότι, παρόλο που η βιομάζα των υπέργειων τμημάτων (Σχήμα 4.2.10.) μειώνεται όσο αυξάνει η αλατότητα, η συγκέντρωση του καδμίου στα υπέργεια σχεδόν 5πλασιάστηκε και 6πλασιάστηκε με την αλατότητα του 0,5% και του 1% αντίστοιχα.

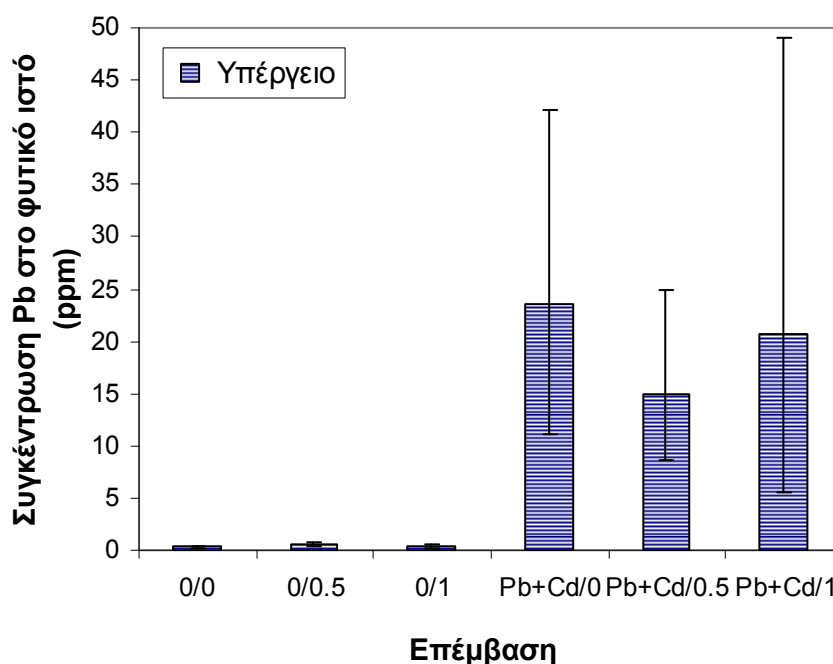


Σχήμα 4.2.2. Συνολικό ποσό Cd (μg) στα φυτικά μέρη του *Tamarix parviflora* που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο έδαφος με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσες τιμές (n=3) και οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές.

Στις ρίζες, αναμενόμενα, η συνολική συσσώρευση του καδμίου (Σχήμα 4.2.2.) παραμένει στα ίδια επίπεδα με την αύξηση της αλατότητας από 0% σε 0,5% γιατί παρόλο που η συγκέντρωση του μετάλλου μειώνεται με την αύξηση της εδαφικής αλατότητας (Σχήμα 4.2.1.), η παραγωγή ξηρής βιομάζας των ριζών (Σχήμα 4.2.10.) είναι μεγαλύτερη στην επέμβαση με 0,5% σε σχέση με αυτή με 0% NaCl. Η περαιτέρω αύξηση της αλατότητας σε 1% οδήγησε σε μεγάλη μείωση της συνολικής συσσώρευσης του μετάλλου στις ρίζες πράγμα που εξηγείται από τη μείωση της συγκέντρωσης του μετάλλου που παρατηρείται σε αυτήν την επέμβαση και επιπλέον από τη σύγχρονη μείωση της ξηρής βιομάζας των ριζών.

4.2.1.2. Μόλυβδος

Η συγκέντρωση του Pb (Σχήμα 4.2.3.) στα υπέργεια μέρη του *Tamarix parviflora* κυμαίνονταν από 15,01 έως 23,51 ppm και η μέγιστη συγκέντρωση που μετρήθηκε ήταν 49,07 ppm στην επέμβαση με τη μεγαλύτερη εδαφική αλατότητα. Οι συγκεντρώσεις αυτές είναι μέσα στα όρια των συγκεντρώσεων του Pb που δεν θεωρούνται τοξικές για τα φυτά (30-300 ppm), σύμφωνα με τους Orcutt & Nilsen (2000). Στις ρίζες (Σχήμα 4.2.4.) η συγκέντρωση του μολύβδου έφτασε τα 7059,23 ppm ενώ μετρήθηκε κατά μέσο όρο από 2646,04 έως 3030,42 ppm, συγκεντρώσεις πολύ μεγαλύτερες από αυτές που συγκέντρωσαν τα υπέργεια μέρη του φυτού, επιβεβαιώνοντας ότι η κύρια περιοχή συσσώρευσης του μολύβδου είναι οι ρίζες, κάτι που έχει παρατηρηθεί ξανά και για τα συγγενικά είδη *Tamarix smyrnensis* (Kadukova & Kalogerakis 2007, Kadukova et al., 2008, Manousaki et al. 2009) και *Tamarix aphylla* (Al-Taisan 2009).

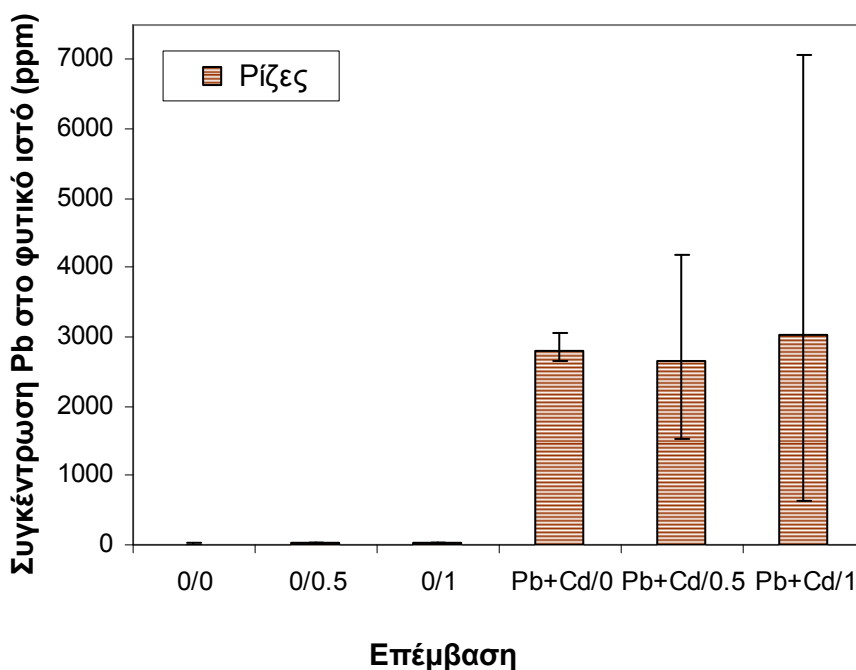


Σχήμα 4.2.3. Συγκέντρωση του μολύβδου (mg/kg ξηρού βάρους) στα υπέργεια μέρη του *Tamarix parviflora* που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσες τιμές (v=3) και οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές.

Η αύξηση της εδαφικής αλατότητας δεν φαίνεται να έχει καθαρή συσχέτιση με τη συγκέντρωση του μολύβδου στα υπέργεια μέρη του *Tamarix parviflora*. Η συγκέντρωση του Pb φαίνεται να μειώνεται στην επέμβαση με 0,5% αλάτι σε σχέση με την επέμβαση

με 0% αλάτι, σε αντίθεση με ότι είχε παρατηρηθεί για το συγγενικό είδος *Tamarix smyrnensis* σε υδροπονική καλλιέργεια (Manousaki et al. 2009). Στην επέμβαση με ακόμα μεγαλύτερη εδαφική αλατότητα (1% αλάτι) παρουσιάζεται αυξημένη και περίπου στα ίδια επίπεδα με την επέμβαση χωρίς προσθήκη αλατιού. Όμως λόγω του μικρού αριθμού επαναλήψεων ($n=3$) και της μεγάλης διαφοράς που εμφανίζεται στις μετρήσεις (ελάχιστη-μέγιστη) δεν μπορεί να προκύψει κάποιο ασφαλές συμπέρασμα.

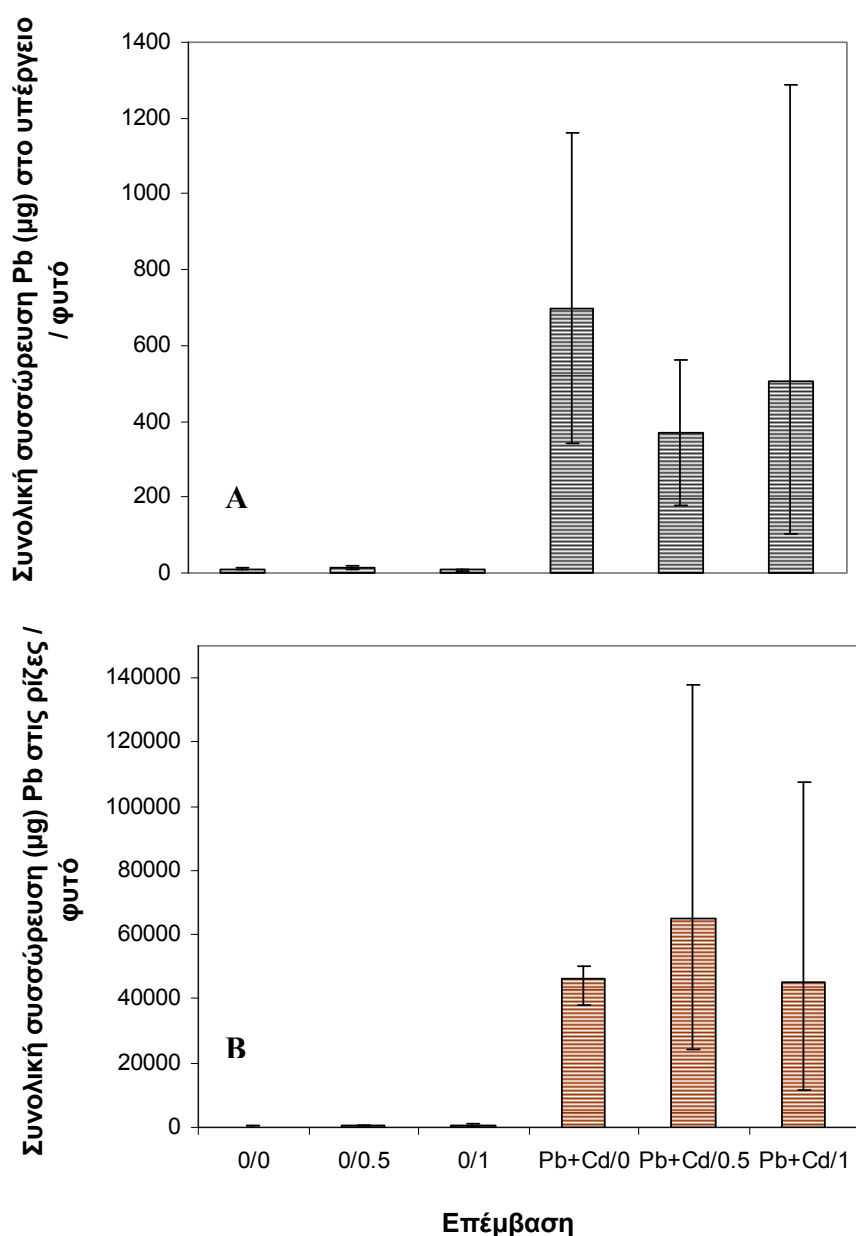
Όσον αφορά τη συγκέντρωση του Pb στις ρίζες, επίσης δεν προκύπτει να υπάρχει σημαντική συσχέτιση με την αύξηση της εδαφικής αλατότητας. Παρατηρείται ότι η συγκέντρωσή του Pb παραμένει στα ίδια επίπεδα, κατά μέσο όρο, όσο η αλατότητα αυξάνει. Τα αποτελέσματα αυτά διαφέρουν από εκείνα που προέκυψαν για την υδροπονική καλλιέργεια του είδους *Tamarix smyrnensis* (Manousaki et al. 2009), όπου η συγκέντρωση του Pb στις ρίζες μειώνονταν όσο η εδαφική αλατότητα αυξανόταν.



Σχήμα 4.2.4. Συγκέντρωση του μολύβδου (mg/kg ξηρού βάρους) στις ρίζες του *Tamarix parviflora* που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσες τιμές ($n=3$) και οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές.

Η συνολική ποσότητα Pb που συσσωρεύτηκε στα υπέργεια μέρη των φυτών και απομακρύνθηκε από το έδαφος (Σχήμα 4.2.5.A, ακολούθως) κυμάνθηκε από 369,77 έως 695,41 μg ανά φυτό, κατά μέσο όρο, ενώ η μέγιστη συσσώρευση μετρήθηκε 1286,51 μg σε φυτό της επέμβασης με 1% αλάτι. Η συνολική συσσώρευση του Pb μειώθηκε με την

αύξηση της εδαφικής αλατότητας. Στην επέμβαση με 0,5% αλάτι είναι μειωμένη σχεδόν στο μισό, κατά μέσο όρο, σε σχέση με την επέμβαση με 0% αλάτι πράγμα αναμενόμενο λόγω της μείωσης της συγκέντρωσης του Pb στα φυτά και της μείωσης της βιομάζας των υπέργειων τμημάτων (Σχήμα 4.2.10.). Στην επέμβαση με 1% αλάτι η συσσώρευση του Pb είναι αυξημένη, σε σχέση με την επέμβαση με 0,5 % αλάτι διότι, παρόλο που υπήρξε μείωση της υπέργειας βιομάζας, υπήρξε συγχρόνως αύξηση της συγκέντρωσης του μετάλλου.



Σχήμα 4.2.5. Συνολικό ποσό (µg) Pb που συσσωρεύτηκε, κατά τη διάρκεια του πειράματος, στα υπέργεια μέρη (A) και στις ρίζες (B) του *Tamarix parviflora* το οποίο καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο έδαφος με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσες τιμές (n=3) και οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές.

Στις ρίζες του *Tamarix parviflora* (Σχήμα 4.2.5.B) η συνολική συσσώρευση του Pb μετρήθηκε από 44.961,76 έως 65.326,24 µg, κατά μέσο όρο, και η μέγιστη ποσότητα που παρατηρήθηκε στις ρίζες έφτανε τα 137.981,54 µg, ποσότητες πολύ μεγαλύτερες από αυτές που συσσωρεύτηκαν στα υπέργεια μέρη των φυτών. Η αύξηση της αλατότητας δεν φαίνεται να επηρεάζει τη συνολική ποσότητα του Pb στις ρίζες καθώς η συγκέντρωση του μετάλλου δεν μεταβάλλεται σημαντικά με την αύξηση της αλατότητας και η ξηρή βιομάζα των ριζών αυξάνεται στην επέμβαση με 0,5% NaCl και μένει σταθερή στην επέμβαση με 1% NaCl. Στην αύξηση της βιομάζας των ριζών οφείλεται η αύξηση που παρουσιάζει η συνολική συσσώρευση του Pb στην επέμβαση με 0,5% NaCl.

4.2.2. Έκκριση Cd και Pb από τον υπέργειο φυτικό ιστό

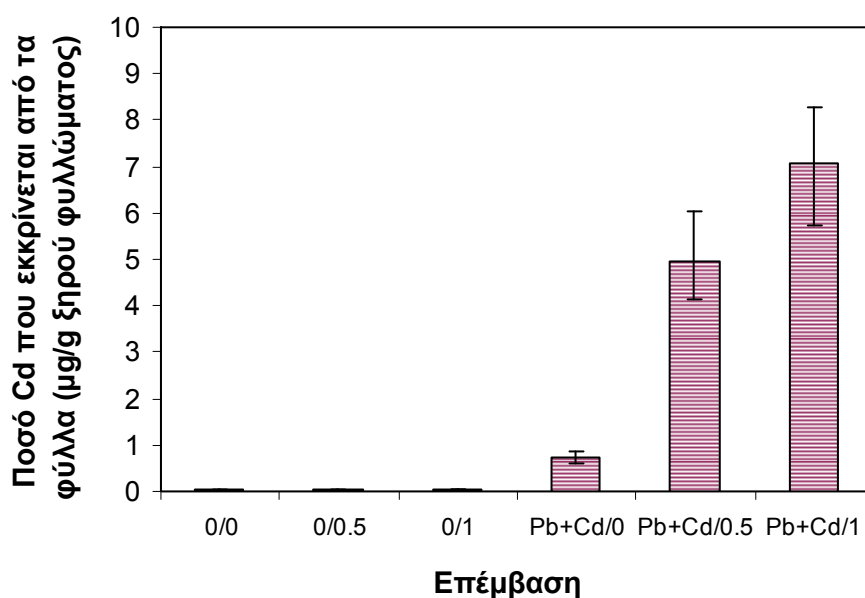
Οι μετρήσεις του πειράματος απέδειξαν ότι από τους αλαταδένες του *Tamarix parviflora* εκκρίνονται, εκτός από τα άλατα, και κάδμιο και μόλυβδος, ως πιθανός μηχανισμός αποτοξίνωσης από τα βαρέα μέταλλα. Οι συγκεντρώσεις των μετάλλων που εκκρίθηκαν από τα φύλλα των φυτών χωρίς προσθήκη μετάλλων ήταν μηδαμινές ενώ αυτών με προσθήκη μετάλλων ήταν πολύ μεγαλύτερες, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 4.2.6. & 4.2.7. Επομένως, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι εκκριτικοί αδένες αυτού του φυτού δεν είναι εκλεκτικοί αλλά η σύσταση των αλάτων που εκκρίνονται είναι ανάλογη της σύστασης του εδαφικού διαλύματος.

Έκκριση μετάλλων, από τους αλαταδένες των φύλλων, έχει παρατηρηθεί και για τα συγγενικά είδη *Tamarix smyrnensis* (Manousaki et al. 2008) και *Tamarix aphylla* (Hagemeyer & Waisel 1988). Στην Εικόνα 13 ακολουθώς φαίνονται φύλλα του *Tamarix parviflora* από φυτό του πειράματος και οι εκκρίσεις των αλάτων από τους αλαταδένες.



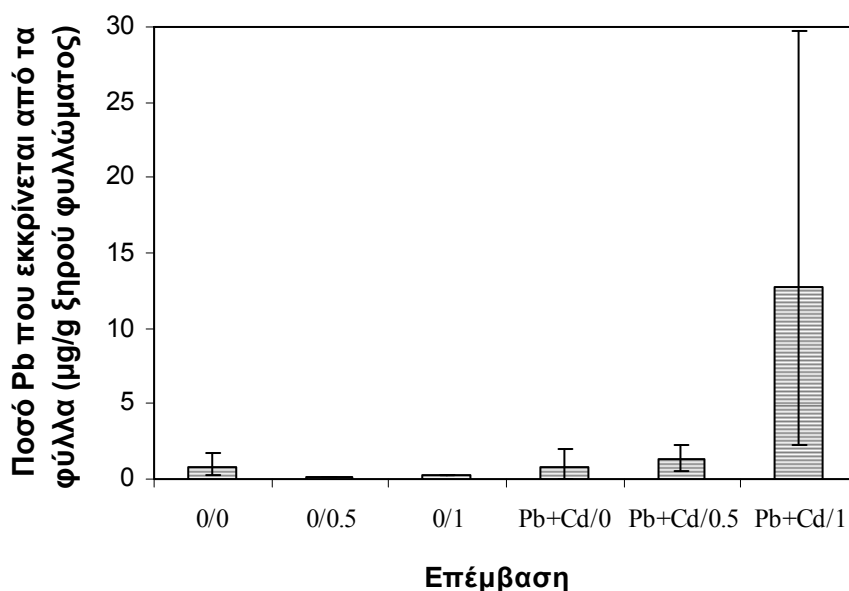
Εικόνα 13. Φύλλα του *Tamarix parviflora*, από φυτό του πειράματος, στα οποία διακρίνονται οι ουσίες και τα άλατα που εκκρίνονται από τους αλατώδεις αδένες

Η ποσότητα του καδμίου που εκκρίθηκε (Σχήμα 4.2.6.), από τα φύλλα των φυτών, των επεμβάσεων με προσθήκη βαρέων μετάλλων, κυμαίνεται από περίπου 0,72 έως 7,06 ppm, κατά μέσο όρο, ενώ η μέγιστη συγκέντρωση που μετρήθηκε ήταν 8,28 ppm. Η ποσότητα του μολύβδου (Σχήμα 4.2.7.) που εκκρίθηκε ήταν από 0,74 – 12,89 ppm και η μέγιστη που μετρήθηκε έφτανε τα 29,78 ppm.



Σχήμα 4.2.6. Ποσό Cd (μg/g) που εκκρίνεται από τα φύλλα του *Tamarix parviflora* το οποίο καλλιεργήθηκε σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσοι όροι των τιμών ($n=3$) και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές

Η μεγαλύτερη έκκριση και για τα δύο μέταλλα παρατηρείται στην επέμβαση με το μεγαλύτερο ποσοστό NaCl (1%) και όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 4.2.6. & 4.2.7. η έκκριση των μετάλλων αυξάνει με την αύξηση της εδαφικής αλατότητας. Όπως και έχει προαναφερθεί η αύξηση της έκκρισης με την αύξηση της εδαφικής αλατότητας πιθανόν οφείλεται στην αύξηση της απορρόφησης των μετάλλων από τα φυτά λόγω της αύξησης της διαλυτότητας τους στο εδαφικό διάλυμα (Bingham et al. 1983, Greger et al. 1995, Kirkham 2006, Ghnaya et al. 2007, Wahla & Kirkham 2009). Επίσης, σε προηγούμενες μελέτες έχει παρατηρηθεί η μεταφορά των μετάλλων από τις ρίζες προς τα υπέργεια μέρη των φυτών και συνεπώς και προς τους εκκριτικούς αδένες τους (Greger et al. 1995, Manousaki et al. 2008), πράγμα που παρατηρήθηκε και εδώ στην περίπτωση του καδμίου.

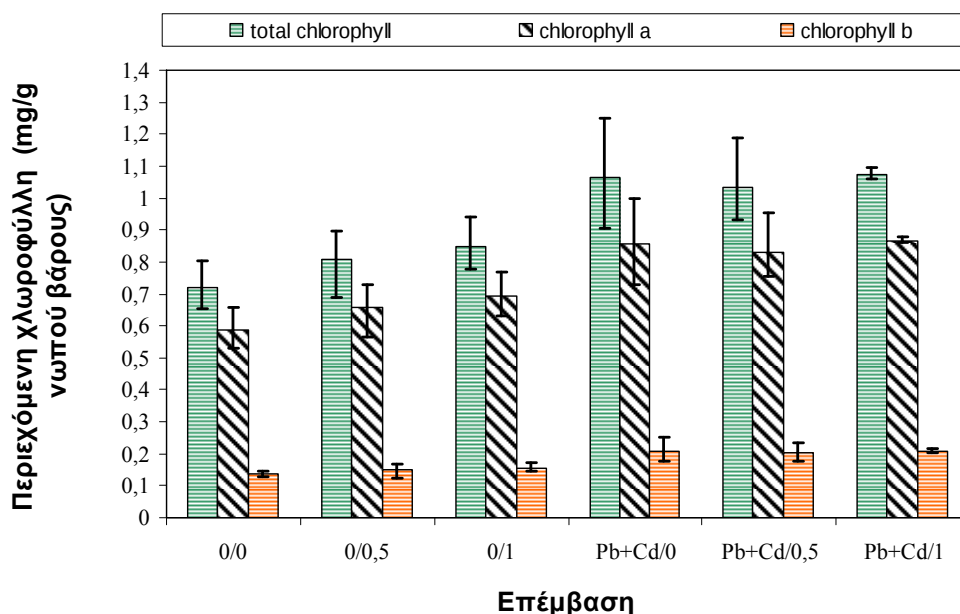


Σχήμα 4.2.7. Ποσό Pb (μg/g) που εκκρίνεται από τα φύλλα του *Tamarix parviflora* το οποίο καλλιεργήθηκε σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσοι όροι των τιμών (v=3) και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές

4.2.3. Επίδραση των μετάλλων και της εδαφικής αλατότητας στα παραγωγικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά του *Tamarix parviflora*

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, από την οπτική παρακολούθηση που πραγματοποιήθηκε, φάνηκε ότι τα φυτά του *Tamarix parviflora* δεν παρουσίασαν συμπτώματα τοξικότητας από τα βαρέα μέταλλα ή από την αυξημένη εδαφική αλατότητα. Απεναντίας, τα φυτά στα οποία δεν έγινε προσθήκη μετάλλων εμφανίζονταν πιο ασθενικά και με συμπτώματα ελαφριάς χλώρωσης, ανεξαρτήτως της εδαφικής αλατότητας.

Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 4.2.8. ακολούθως, οι φωτοσυνθετικές χρωστικές των φυτών του *T. parviflora* δεν μειώθηκαν με την προσθήκη των μετάλλων αλλά είναι αυξημένες στις επεμβάσεις που προστέθηκαν τα μέταλλα. Επίσης, η αυξημένη εδαφική αλατότητα δεν φαίνεται να επηρεάζει αρνητικά τις χλωροφύλλες αλλά αντιθέτως με την αύξηση της εδαφικής αλατότητας εμφανίζεται μία μικρή αύξηση στην χλωροφύλλη a και συνεπώς και στην ολική χλωροφύλλη, στις επεμβάσεις χωρίς προσθήκη των μετάλλων.

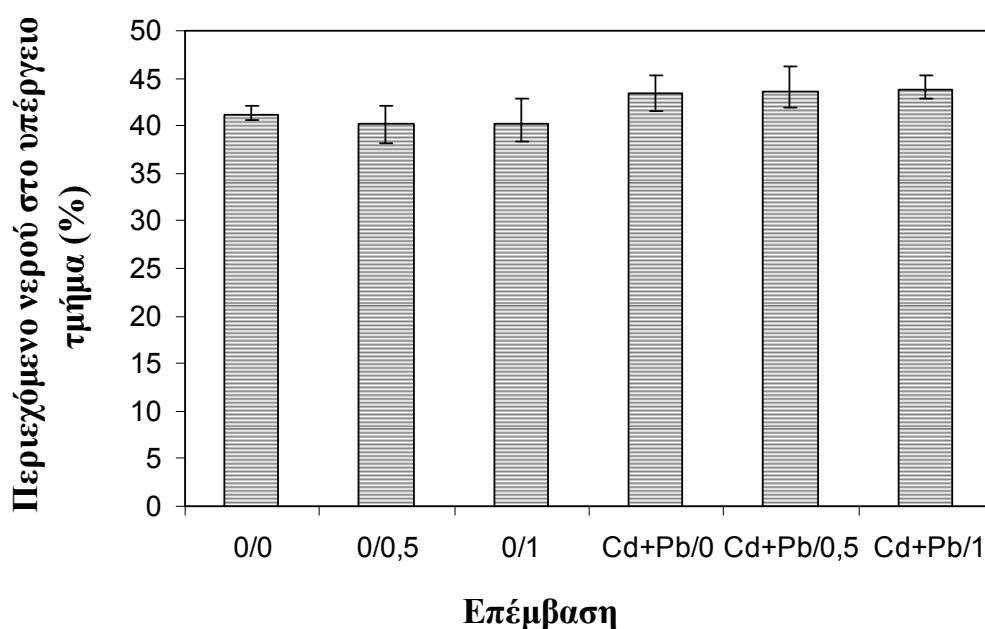


Σχήμα 4.2.8. Περιεχόμενη χλωροφύλλη (mg/g νωπού βάρους) στα φύλλα του *Tamarix parviflora* που καλλιεργήθηκε σε έδαφος καθαρό και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσοι όροι των τιμών (n=3) και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές

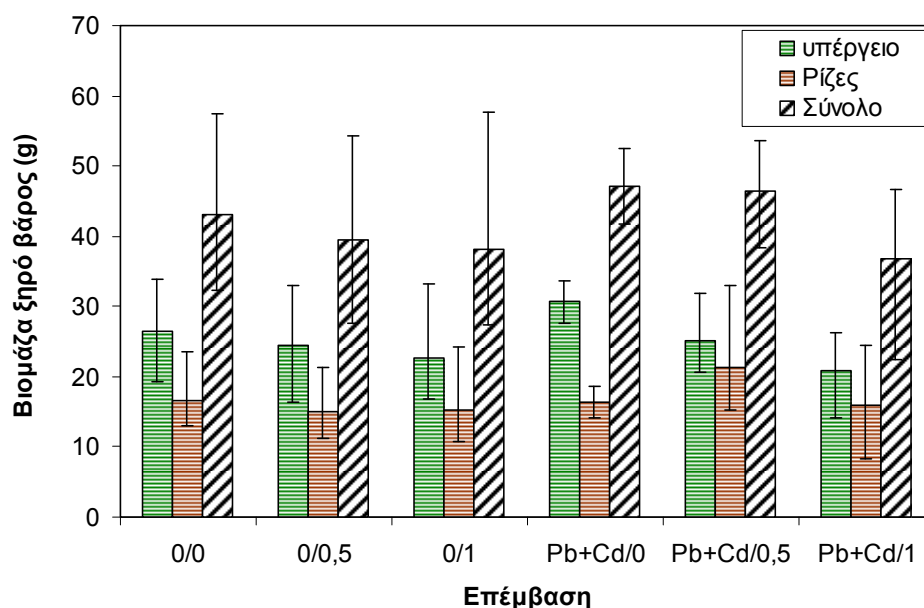
Το % περιεχόμενο σε νερό των υπέργειων τμημάτων του *T. parviflora* (Σχήμα 4.2.9.) εμφανίζεται μεγαλύτερο στις επεμβάσεις με την προσθήκη των μετάλλων ενώ δεν φαίνεται να επηρεάζεται από τη διακύμανση της ποσότητας NaCl. Επιβεβαιώνεται έτσι η μεγάλη ανθεκτικότητα του είδους στην υψηλή αλατότητα και στις υψηλές συγκεντρώσεις Cd και Pb. Η αύξηση του περιεχόμενου σε νερό (%) των βλαστών στις επεμβάσεις με την προσθήκη των μετάλλων πιθανόν οφείλεται λόγω της προσθήκης των μετάλλων με την μορφή νιτρικών αλάτων και άρα και την σύγχρονη προσθήκη μαζί με αυτά και μιας ποσότητας αζώτου, γεγονός που πιθανόν συνετέλεσε στη φυσιολογικότερη λειτουργία των φυτών.

Η βιομάζα των φυτών του είδους αυτού (Σχήμα 4.2.10.) φαίνεται ελαφρά αυξημένη στις επεμβάσεις με την προσθήκη μετάλλων σε σχέση με τις επεμβάσεις χωρίς τα μέταλλα. Η αύξηση αυτή πιθανότατα οφείλεται, όπως και για τους προηγούμενους παράγοντες που ελέγχθηκαν, στην σύγχρονη προσθήκη αζώτου μαζί με το κάδμιο και τον μόλυβδο. Η παρατήρηση αυτή, επιπλέον, επιβεβαιώνει την ανθεκτικότητα του είδους στις υψηλές συγκεντρώσεις καδμίου και μολύβδου.

Επίσης παρατηρείται μια μικρή μείωση στη βιομάζα των υπέργειων τμημάτων των φυτών όσο αυξάνει η εδαφική αλατότητα, ενώ η βιομάζα των ριζών παραμένει στα ίδια επίπεδα και είναι αυξημένη στην επέμβαση με 0,5 % NaCl και τα μέταλλα.



Σχήμα 4.2.9. Περιεχόμενο σε νερό (%) του *Tamarix parviflora* που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb, ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσοι όροι των τιμών ($v=3$) και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές



Σχήμα 4.2.10. Βιομάζα του *Tamarix parviflora* που καλλιεργήθηκε σε έδαφος μη ρυπασμένο και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσοι όροι των τιμών ($n=3$) και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές.

4.2.4. Συνοπτικά αποτελέσματα για το φυτό *Tamarix parviflora*

Φαίνεται ότι οι ρίζες του είδους αυτού δεν παρουσιάζουν εκλεκτικότητα στην πρόσληψη των μετάλλων από τη ριζόσφαιρα, κάτι που έχει παρατηρηθεί και για άλλα είδη του ίδιου γένους, όπως το *Tamarix smyrnensis* (Μανουσάκη 2008) και το *Tamarix aphylla* (Hagemeyer & Waisel 1988, Manousaki & Kalogerakis 2010). Τα φυτά του *Tamarix parviflora* συγκεντρώσαν, κατά τη διάρκεια του πειράματος, ποσότητες καδμίου και μολύβδου όχι μεγαλύτερες από αυτές που είναι γνωστές ως τοξικές για τα φυτά (Orcutt & Nilsen 2000). Οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στα υπέργεια μέρη των φυτών δεν ήταν τόσο μεγάλες ώστε να μπορεί το *Tamarix parviflora* να θεωρηθεί ένας συσσωρευτής του Cd ή του Pb.

Το φυτό αυτό συγκεντρώνει πολύ μεγαλύτερες ποσότητες καδμίου και μολύβδου στις ρίζες του σε σχέση με τα υπέργεια τμήματά του, κάτι που έχει διαπιστωθεί και για το συγγενικό είδος *T. smyrnensis* (Kadukova & Kalogerakis 2007, Kadukova et al. 2008, Manousaki et al. 2009) και *Tamarix aphylla* (Al-Taisan 2009). Αν ληφθούν υπόψη, όμως, οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στο υπέργειο τμήμα των φυτών και η μεγάλη παραγωγή

βιομάζας του, τότε φαίνεται ότι το είδος αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε εφαρμογές φυτοσυσσώρευσης.

Η αύξηση της εδαφικής αλατότητας δεν φαίνεται να έχει καθαρή συσχέτιση με τη συγκέντρωση του μολύβδου στα διάφορα φυτικά μέρη του *Tamarix parviflora*. Αντίθετα στην περίπτωση του Cd παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της εδαφικής αλατότητας επέδρασε θετικά στην μετατόπιση του μετάλλου από τις ρίζες στα υπέργεια τμήματα του φυτού (Σχήμα 4.2.1.)

Αν λάβουμε υπόψη τα μορφολογικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των φυτών στις επεμβάσεις με τα βαρέα μέταλλα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα μέταλλα δεν επηρέασαν αρνητικά τη συγκέντρωση των χλωροφυλλών, τη βιομάζα των φυτών, το % περιεχόμενο σε νερό των βλαστών, αλλά αντιθέτως οι παράμετροι αυτές παρουσιάζονται αυξημένες στις επεμβάσεις με το Cd και τον Pb.

Η αύξηση της εδαφικής αλατότητας οδήγησε σε μείωση της βιομάζας των υπέργειων τμημάτων των φυτών, καθώς και της ολικής βιομάζας (Σχήμα 4.2.10.), σε όλες τις επεμβάσεις, το οποίο πιθανόν οφείλεται στην κατανάλωση της ενέργειας για τους μηχανισμούς οσμωρύθμισης.

Το φυτό αυτό διαπιστώθηκε ότι εκκρίνει από τους αλατώδεις αδένες του Cd και Pb, πιθανόν χρησιμοποιώντας την έκκριση των μετάλλων ως μηχανισμό αποτοξίνωσης, πράγμα που έχει παρατηρηθεί και για το *Tamarix smyrnensis* (Kadukova et al. 2008, Manousaki et al. 2008) και για το *Tamarix nilotica* (Fawzy et al. 2006). Η χαμηλή συσσώρευση των μετάλλων στα υπέργεια μέρη των φυτών πιθανόν οφείλεται στον μηχανισμό αυτόν της έκκρισης και απομάκρυνσης των μετάλλων από τους αλαταδένες. Τέλος, η έκκριση και των δύο μετάλλων αυξήθηκε με την αύξηση της εδαφικής αλατότητας.

4.3. Υπό εξέταση φυτό *Limoniastrum monopetalum*

4.3.1. Συσσώρευση μετάλλων στο φυτικό ιστό

4.3.1.1. Κάδμιο

Οι συγκεντρώσεις του καδμίου και σε αυτό το φυτό ήταν κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές που θεωρούνται τοξικές για τα φυτά, όπου σύμφωνα με τους Orcutt & Nilsen (2000) κυμαίνονται από 5-30 ppm ξηρού βάρους ιστού στα υπέργεια μέρη. Παρολ' αυτά

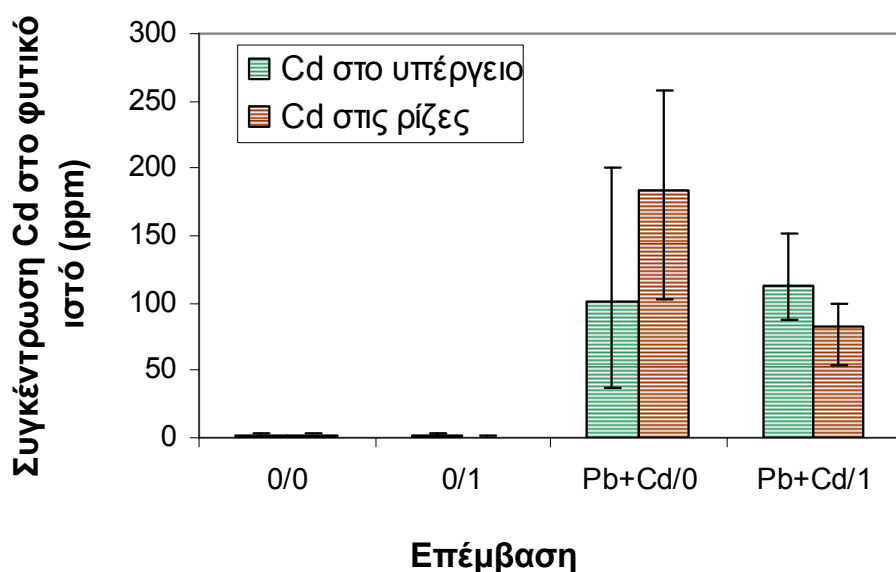
τα φυτά δεν παρουσίασαν, κατά τη διάρκεια του πειράματος, οπτικά συμπτώματα τοξικότητας. Στις επεμβάσεις ελέγχου η συγκέντρωση του Cd ήταν πολύ ασήμαντη ενώ στις επεμβάσεις με τα μέταλλα πολύ μεγάλη, πράγμα που δείχνει ότι το φυτό αυτό συσσωρεύει κάδμιο στους ιστούς του σε μεγάλες ποσότητες ανάλογα με εάν αυτό υπάρχει στο έδαφος ή όχι. Στις επεμβάσεις με προσθήκη των μετάλλων στο έδαφος, η συγκέντρωση του καδμίου στα υπέργεια μέρη των φυτών (Σχήμα 4.3.1.), μετρήθηκε πολύ μεγάλη και συγκεκριμένα κυμαίνονταν από 101,23 έως 112,77 ppm, κατά μέσο όρο, ενώ η μέγιστη συγκέντρωση που μετρήθηκε ήταν 200,74 ppm. Τα 100 ppm είναι και το όριο για να μπορεί να χαρακτηριστεί ένα φυτό ως “υπερσυσσωρευτής” του Cd.

Στις ρίζες των φυτών η συγκέντρωση του κυμαίνονταν από 83,41 έως 182,95 ppm, κατά μέσο όρο, και στην επέμβαση με την προσθήκη NaCl η συγκέντρωση του καδμίου στις ρίζες ήταν μικρότερη από τη συγκέντρωσή του στα υπέργεια μέρη των φυτών δίνοντας λόγο: υπέργειο / ρίζες = 1,35, ενώ στην επέμβαση χωρίς προσθήκη αλατιού η συγκέντρωση του μετάλλου ήταν μεγαλύτερη στις ρίζες με τον λόγο υπέργειο / ρίζες = 0,55.

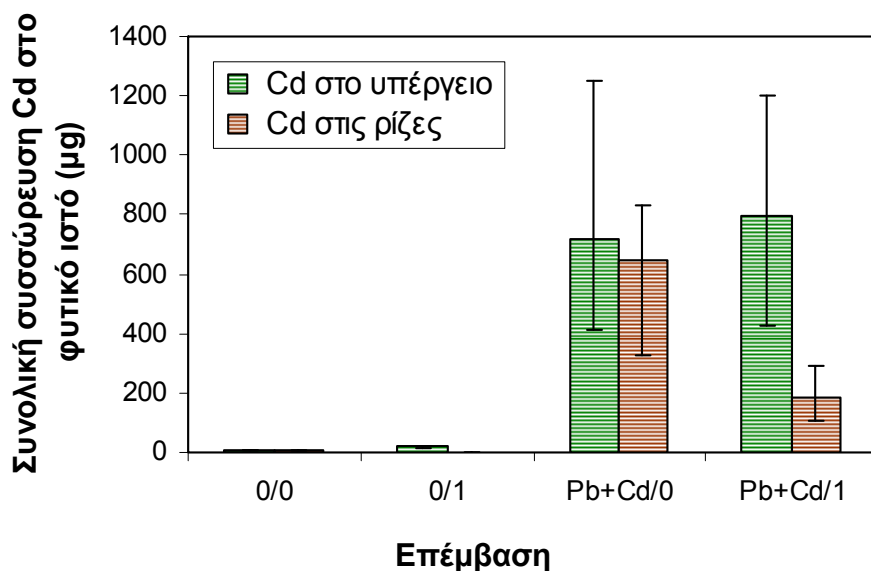
Η αυξημένη εδαφική αλατότητα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3.1., οδήγησε σε μικρή αύξηση της συγκέντρωσης του Cd στα υπέργεια μέρη των φυτών, ενώ συγχρόνως σε μείωση της συγκέντρωσής του στις ρίζες των φυτών. Αυτό πιθανότητα οφείλεται σε μετακίνηση του μετάλλου από τις ρίζες προς τα υπέργεια μέρη των φυτών, με την αύξηση της αλατότητας.

Η συνολική ποσότητα Cd που συσσωρεύσαν τα φυτά του είδους αυτού, κατά τη διάρκεια του πειράματος, φαίνεται (Σχήμα 4.3.2.) ότι είναι μεγαλύτερη στα υπέργεια μέρη των φυτών σε σχέση με τις ρίζες κάτι πολύ σημαντικό για τις εφαρμογές της φυτοσυσσώρευσης. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στην μεγαλύτερη παραγωγή βιομάζας των υπέργειων τμημάτων που παρατηρήθηκε στα φυτά, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 4.3.9. πιο κάτω. Η συνολική συσσωρευση του μετάλλου, στα υπέργεια μέρη των φυτών, μετρήθηκε από 719,64 έως 794,74 μg με μέγιστη συγκέντρωση τα 1249,94 μg . Αν λάβουμε υπόψη την ξηρή παραγωγή βιομάζας των φυτών υπολογίζεται ότι η μέγιστη ποσότητα του Cd που συσσωρεύτηκε, κατά τις 6 εβδομάδες του πειράματος, στα υπέργεια μέρη των φυτών, ήταν κατά μέσο όρο 108,36 mg ανά Kg ξηρής ουσίας.

Η αύξηση της αλατότητας του ποτιστικού νερού από 0% σε 1%, αναμενόμενα, οδήγησε σε αύξηση της συνολικής συσσωρευσης του Cd στα υπέργεια μέρη των φυτών και σε μείωση της στις ρίζες, αφού είχαμε μετατόπιση μετάλλου από τις ρίζες στα υπέργεια μέρη.



Σχήμα 4.3.1. Συγκέντρωση του Cd (mg/kg ξηρού βάρους) στις ρίζες και στα υπέργεια μέρη του *Limoniastrum monopetalum*, που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο έδαφος με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb (ξηρού βάρους εδάφους), σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσες τιμές και οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές.

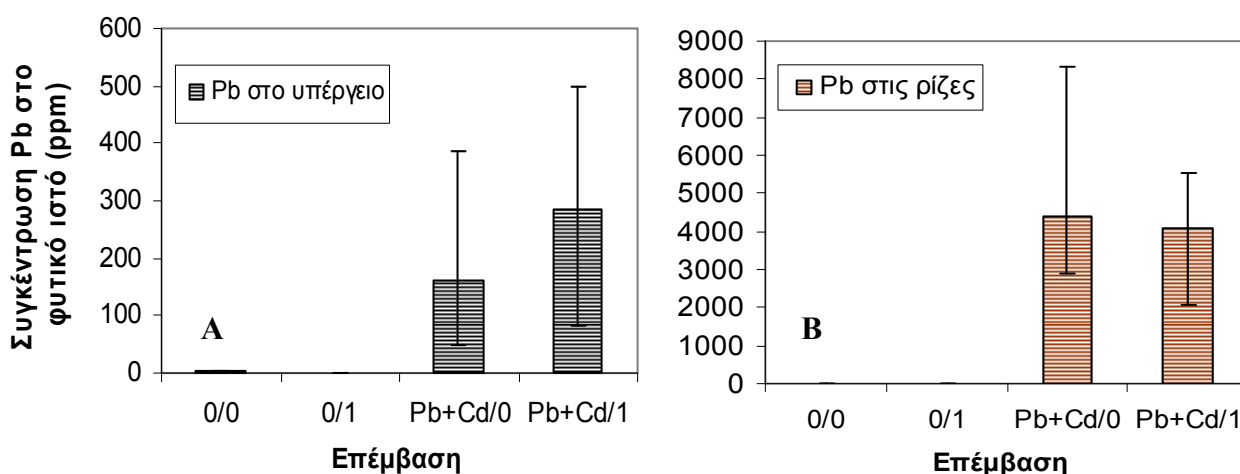


Σχήμα 4.3.2. Συνολικό ποσό (μg) Cd που συσσωρεύτηκε, κατά τη διάρκεια του πειράματος, στους ιστούς του *Limoniastrum monopetalum*, το οποίο καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο έδαφος με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσες τιμές και οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές.

4.3.1.2. Μόλυβδος

Οι συγκεντρώσεις του μολύβδου στα υπέργεια μέρη των φυτών του *Limoniastrum monopetalum* κυμαίνονταν από 162,35 έως 284,49 ppm, κατά μέσο όρο, ενώ η μέγιστη συγκέντρωση που παρατηρήθηκε ήταν 500,11 ppm. Στα περισσότερα φυτά η συγκέντρωση του μολύβδου στα υπέργεια μέρη (Σχήμα 4.3.3.A) ήταν χαμηλότερα από τα ανώτερα όρια τα οποία θεωρούνται τοξικά για τα φυτά (30-300 ppm, Orcutt & Nilsen 2000) και μόνο σε ελάχιστες περιπτώσεις τα ξεπερνούσαν. Ενώ στις επεμβάσεις ελέγχου η συγκέντρωση του μετάλλου ήταν πολύ μικρή στις επεμβάσεις με την προσθήκη μετάλλων ήταν πολύ μεγάλη, το οποίο δείχνει ότι το φυτό αυτό συσσωρεύει μόλυβδο, όπως και κάδμιο, στους ιστούς του, ανάλογα με το αν είναι διαθέσιμο το μέταλλο στο έδαφος στο οποίο αναπτύσσεται.

Οι συγκεντρώσεις του Pb στις ρίζες (Σχήμα 4.3.3.B) ήταν πολύ μεγαλύτερες από αυτές στα υπέργεια φυτικά μέρη δηλώνοντας ότι και σε αυτό το είδος η κύρια θέση συσσώρευσης του μολύβδου είναι οι ρίζες των φυτών, κάτι που έχει παρατηρηθεί και για άλλα φυτά όπως το *H. portulacoides* στην παρούσα μελέτη αλλά και σε παλιότερη (Sousa et al. 2008) και για το *T. parviflora* στην παρούσα μελέτη ή για συγγενικά του είδη (Kadukova & Kalogerakis, 2007, Kadukova et al. 2008, Manousaki et al. 2009, Al-Taisan 2009).



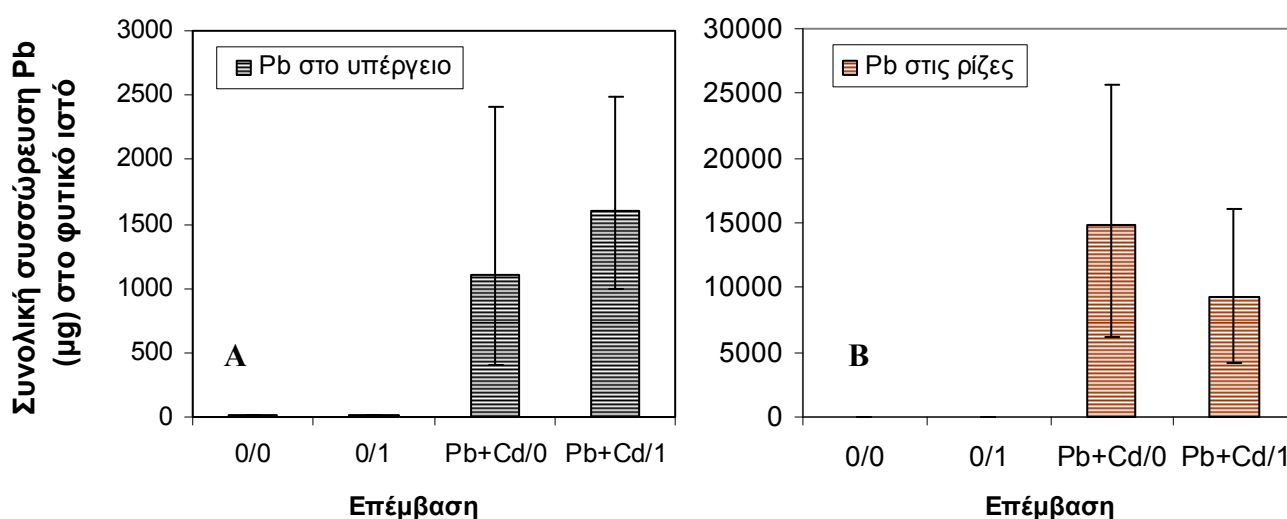
Σχήμα 4.3.3. Συγκέντρωση του Pb (mg/kg ξηρού βάρους) στα υπέργεια μέρη (A) και στις ρίζες (B) του *Limoniastrum monopetalum*, που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο έδαφος με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb (ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσες και οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές.

Η αύξηση της εδαφικής αλατότητας οδήγησε σε αύξηση της συγκέντρωσης του μολύβδου στα υπέργεια μέρη των φυτών και σε μείωση τους στις ρίζες παρατήρηση που πιθανότητα υποδηλώνει τη μετακίνηση του μετάλλου από τις ρίζες των φυτών προς τους βλαστούς και τα φύλλα.

Η συνολική ποσότητα Pb που συγκεντρώθηκε στα υπέργεια μέρη των φυτών του *L. monopetalum* (Σχήμα 4.3.4.A) στις επεμβάσεις ελέγχου ήταν ελάχιστη, ενώ στις επεμβάσεις όπου έγινε προσθήκη μετάλλων κυμάνθηκε, κατά μέσο όρο, από 1110,07 έως 1605,33 μg ενώ η μέγιστη ποσότητα που συσσωρεύτηκε ήταν 2486,01 μg . Λαμβάνοντας υπόψη την παραγωγή ξηρής βιομάζας υπολογίζεται ότι η μέγιστη, κατά μέσο όρο, ποσότητα μολύβδου που απομακρύνεται από το έδαφος και συσσωρεύεται στα υπέργεια μέρη των φυτών είναι 218 mg ανά kg ξηρής ουσίας.

Στις ρίζες η συνολική συσσώρευση του μολύβδου (Σχήμα 4.3.4.B) είναι πολύ μεγάλη και κυμαίνεται από 9275,23 έως 14909,50 μg ενώ η μέγιστη συσσώρευση που μετρήθηκε έφτανε τα 25.663,21 μg . Αναμενόμενα η συσσώρευση στις ρίζες είναι πολύ μεγάλη αφού και η συγκέντρωση του μετάλλου στις ρίζες ήταν πολύ μεγάλη.

Η αύξηση της αλατότητας του ποτιστικού νερού από 0% σε 1% οδήγησε σε αύξηση της συνολικής συσσώρευσης του Pb στα υπέργεια μέρη των φυτών και σε μείωσή της στις ρίζες, αναμενόμενο εφόσον και η συγκέντρωση του μετάλλου ακολουθεί το ίδιο πρότυπο.



Σχήμα 4.3.4. Συνολικό ποσό (μg) Pb που συσσωρεύτηκε, κατά τη διάρκεια του πειράματος, στα υπέργεια μέρη (A) και στις ρίζες (B) του *Limoniastrum monopetalum*, το οποίο καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε ρυπασμένο έδαφος με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσες τιμές και οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές.

4.3.2. Έκκριση Cd και Pb από τον υπέργειο φυτικό ιστό

Τα αποτελέσματα του πειράματος έδειξαν ότι μαζί με την έκκριση των αλάτων πραγματοποιείται και έκκριση καδμίου και μολύβδου από τους αλαταδένες του είδους *Limoniastrum monopetalum*, και μάλιστα ενώ η έκκριση των μετάλλων στις επεμβάσεις ελέγχου είναι μηδαμινή, στις επεμβάσεις όπου προστέθηκαν τα μέταλλα είναι πολύ μεγαλύτερη (Σχήμα 4.3.5. & Σχήμα 4.3.6.). Φαίνεται λοιπόν, ότι οι εκκριτικοί αδένες του είδους αυτού δεν είναι εκλεκτικοί αλλά η σύσταση των αλάτων που εκκρίνονται είναι ανάλογη της σύστασης του εδαφικού διαλύματος, κάτι που παρατηρήθηκε και για τα άλλα δύο φυτά που διερευνήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Στην Εικόνα 14 ακολούθως φαίνονται οι εκκρίσεις των αλάτων και των άλλων ουσιών από τους αλατώδεις αδένες των φυτών του είδους αυτού.

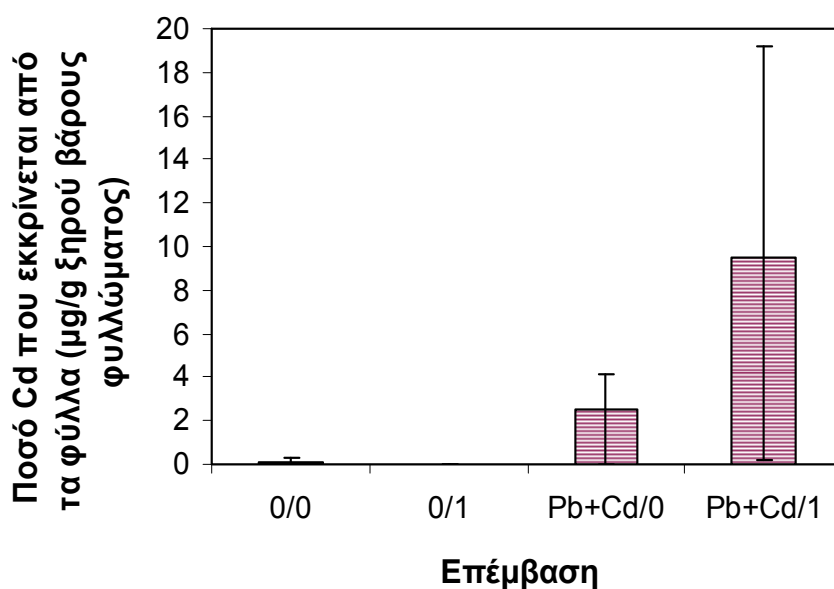


Εικόνα 14. Φύλλο του *Limoniastrum monopetalum*, από φυτό του πειράματος, στο οποίο φαίνονται οι εκκρίσεις των αλάτων και των άλλων ουσιών.

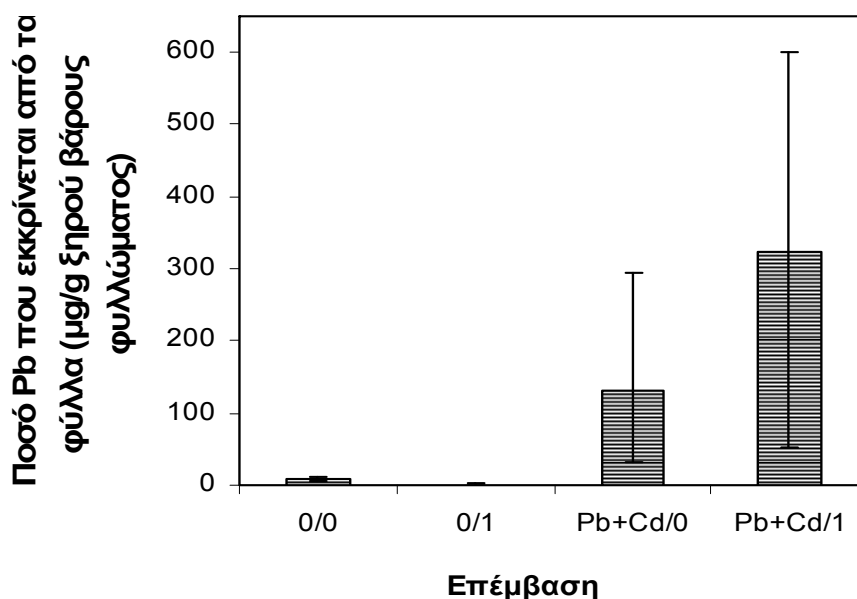
Όπως φαίνεται και παρακάτω, η έκκριση του Cd (Σχήμα 4.3.5.) από τα φύλλα των φυτών μετρήθηκε από 2,51 έως 9,46 μg , κατά μέσο όρο, ενώ η μέγιστη έκκριση που μετρήθηκε ήταν 19,22 μg . Η έκκριση του Pb (Σχήμα 4.3.6.) κυμαίνεται από 19,5 έως 63,12 μg και η μέγιστη έκκριση που μετρήθηκε ήταν 120,89 μg .

Παρατηρείται επίσης ότι η έκκριση του καδμίου και του μολύβδου αυξήθηκε σημαντικά με την αύξηση της εδαφικής αλατότητας. Η έκκριση του καδμίου είναι σχεδόν τετραπλάσια στην επέμβαση με αυξημένη εδαφική αλατότητα (“Pb+Cd/1”) σε σχέση με την επέμβαση με μηδενική αλατότητα και η έκκριση του Pb στην επέμβαση (“Pb+Cd/1”)

είναι τριπλάσια σε σχέση με την επέμβαση με μηδενική εδαφική αλατότητα (“Pb+Cd/0”). Οι παρατηρήσεις αυτές επιβεβαιώνουν την υπόθεση ότι λαμβάνει χώρα μεγαλύτερη έκκριση μετάλλων στις υψηλότερες αλατότητες. Η μεγαλύτερη έκκριση στην μεγαλύτερη εδαφική αλατότητα πιθανότατα οφείλεται στην αύξηση της απορρόφησης των μετάλλων από τα φυτά λόγω της αύξησης της διαλυτότητας τους στο εδαφικό διάλυμα (Bingham et al. 1983, Greger et al. 1995, Kirkham 2006, Ghnaya et al. 2007, Wahla & Kirkham 2009). Επίσης, σε πολλές μελέτες, έχει παρατηρηθεί η μεταφορά των μετάλλων από τις ρίζες προς τα υπέργεια μέρη των φυτών και συνεπώς και προς τους εκκριτικούς αδένες τους (Greger et al. 1995, Kadukova & Kalogerakis 2007, Manousaki et al. 2008), κάτι που παρατηρήθηκε και στην παρούσα περίπτωση.



Σχήμα 4.3.5. Ποσό Cd (μg) που εκκρίνεται από τα φύλλα του *Limoniastrum monopetalum* το οποίο καλλιεργήθηκε σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσοι όροι των τιμών και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές.

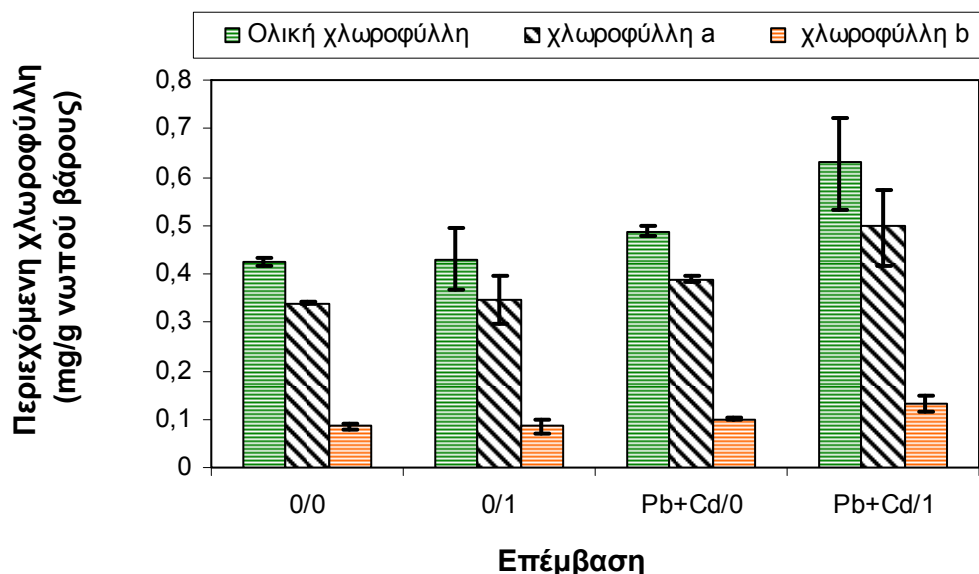


Σχήμα 4.3.6. Ποσό Pb (μg) που εκκρίνεται από τα φύλλα του *Limoniastrum monopetalum* το οποίο καλλιεργήθηκε σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσοι όροι των τιμών και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές

4.3.3. Επίδραση των μετάλλων και της εδαφικής αλατότητας στα παραγωγικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά του *Limoniastrum monopetalum*

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, από την οπτική παρατήρηση που πραγματοποιούνταν, δεν έγιναν αντιληπτά συμπτώματα τοξικότητας στα φυτά από τα μέταλλα, από την αυξημένη εδαφική αλατότητα ή τον συνδυασμό τους.

Στο Σχήμα 4.3.7., ακολούθως, παρουσιάζονται οι χλωροφύλλες στα φύλλα του *Limoniastrum monopetalum* και όπως φαίνεται είναι αυξημένες στις επεμβάσεις με τα βαρέα μέταλλα σε σχέση με τις επεμβάσεις ελέγχου δείχνοντας ότι οι υψηλές συγκεντρώσεις των μετάλλων στα φυτά δεν επηρέασαν τη σύνθεση της χλωροφύλλης αρνητικά. Πιθανόν η αύξηση των χλωροφυλλών οφείλεται στην προσθήκη αζώτου μαζί με την προσθήκη των μετάλλων το οποίο συντελεί σημαντικά στη φυσιολογική λειτουργία των φυτών ή και λόγω της προσθήκης των μετάλλων αυτών καθαυτών. Επίσης η περιεχόμενη χλωροφύλλη είναι μεγαλύτερη στην επέμβαση όπου εκτός από την προσθήκη μετάλλων προστίθεται και το μεγαλύτερο ποσοστό NaCl πιθανόν λόγω της αλοφυτικής φύσης του είδους αυτού.



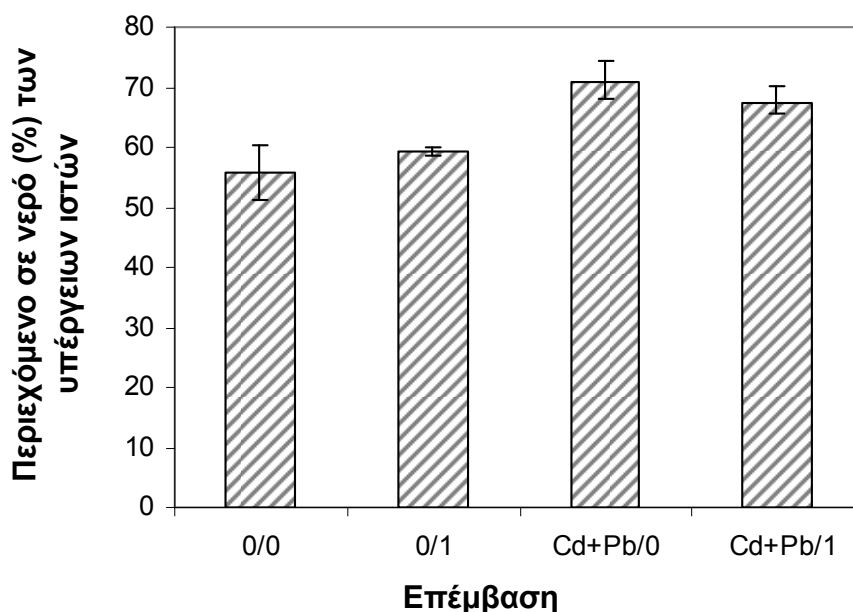
Σχήμα 4.3.7. Περιεχόμενη χλωροφύλλη (mg/g νωπού βάρους) στα φύλλα του *Limoniastrum monopetalum* που καλλιεργήθηκε σε έδαφος καθαρό και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσοι όροι των τιμών και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές

Το περιεχόμενο (%) σε νερό στους βλαστούς του *Limoniastrum monopetalum* (Σχήμα 4.3.8.) παρουσιάζεται και αυτό μεγαλύτερο στις επεμβάσεις με τα βαρέα μέταλλα σε σχέση με τις επεμβάσεις ελέγχου. Πιθανόν για τον ίδιο λόγο που αναφέρεται και στην περίπτωση των χλωροφυλλών δηλαδή λόγω της προσθήκης του αζώτου με τα βαρέα μέταλλα ή λόγω της προσθήκης των μετάλλων αυτών καθαυτών. Το κάδμιο και ο μόλυβδος λοιπόν δεν φαίνεται να επηρεάζουν αρνητικά το % περιεχόμενο σε νερό των βλαστών του είδους αυτού.

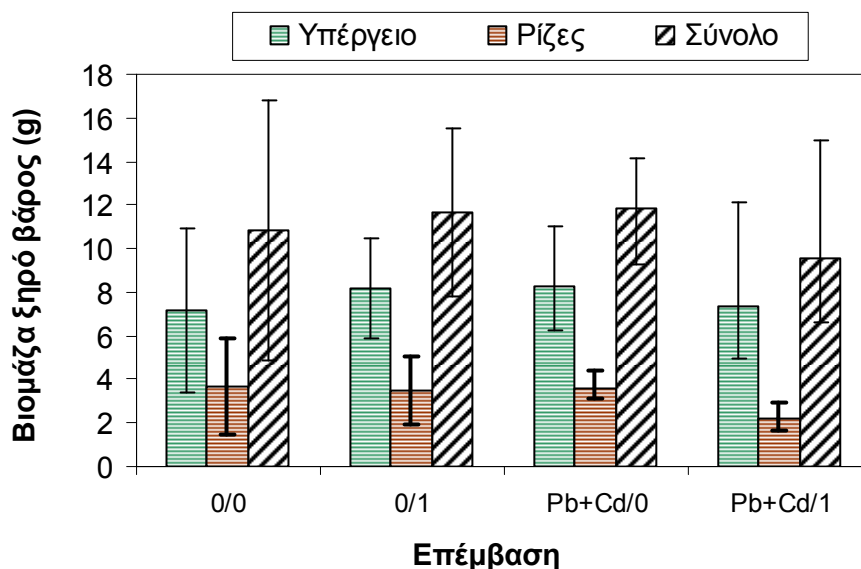
Στις επεμβάσεις ελέγχου, παρατηρούμε ότι η αύξηση της εδαφικής αλατότητας δεν επηρεάζει αρνητικά το % περιεχόμενο σε νερό, γεγονός που επιβεβαιώνει ξανά την αλοφυτική φύση του *Limoniastrum monopetalum*.

Στο Σχήμα 4.3.9. πιο κάτω φαίνεται η παραγωγή βιομάζας των φυτών του *L. monopetalum*. Η βιομάζα των φυτών στις επεμβάσεις ελέγχου αυξάνει με την αύξηση της εδαφικής αλατότητας λόγω της αύξησης της βιομάζας των υπέργειων τμημάτων. Επίσης είναι αυξημένη στην επέμβαση όπου έγινε προσθήκη Cd και Pb χωρίς να προστεθεί NaCl. Αντιθέτως, η βιομάζα και των ριζών και των υπέργειων βλαστών μειώνεται με την αύξηση της αλατότητας στις επεμβάσεις όπου έγινε και προσθήκη των μετάλλων. Αυτό πιθανόν οφείλεται στην κατανάλωση ενέργειας στους μηχανισμούς αντιμετώπισης των υψηλών

συγκεντρώσεων των μετάλλων που συσσωρεύουν αυτά τα φυτά και στην έλλειψη ενέργειας για την αντιμετώπιση της υψηλής αλατότητας.



Σχήμα 4.3.8. Περιεχόμενο σε νερό (%) του *Limoniastrum monopetalum* που καλλιεργήθηκε σε καθαρό έδαφος και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb, ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσοι όροι των τιμών και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές



Σχήμα 4.3.9. Βιομάζα του *Limoniastrum monopetalum* που καλλιεργήθηκε σε έδαφος μη ρυπασμένο και σε έδαφος ρυπασμένο με 20 ppm Cd και 800 ppm Pb ξηρού βάρους εδάφους, σε διαφορετικές εδαφικές αλατότητες. Φαίνονται οι μέσοι όροι των τιμών και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές

4.3.4. Συνοπτικά αποτελέσματα για το φυτό *Limoniastrum monopetalum*

Από τα αποτελέσματα του πειράματος φάνηκε ότι το *Limoniastrum monopetalum* μπορεί να συγκεντρώνει στους ιστούς του μεγάλες ποσότητες Cd, μεγαλύτερες από αυτές που θεωρούνται τοξικές για τα φυτά (Orcutt & Nilsen 2000) χωρίς να παρουσιάζει σημαντικά συμπτώματα τοξικότητας. Οι συγκεντρώσεις του καδμίου στα υπέργεια μέρη των φυτών ξεπερνούσαν, κατά μέσο όρο, τη συγκέντρωση των 100 ppm και στην επέμβαση με την προσθήκη NaCl η συγκέντρωση του καδμίου ήταν μεγαλύτερη στους υπέργειους ιστούς απ' ότι στις ρίζες. Επίσης το συνολικό κάδμιο που συσσωρεύτηκε στα υπέργεια μέρη των φυτών ήταν περισσότερο από αυτό που συσσωρεύτηκε στις ρίζες λόγω της μεγαλύτερης παραγωγής υπέργειας βιομάζας που παρατηρήθηκε. Συμπερασματικά λοιπόν, μπορούμε να καταλήξουμε ότι το *Limoniastrum monopetalum* αποτελεί έναν πιθανό υπερσυσσωρευτή του Cd, κάτι που αξίζει να διερευνηθεί περαιτέρω.

Οι συγκεντρώσεις του Pb στα υπέργεια μέρη των φυτών επιβεβαίωσαν ότι το είδος αυτό μπορεί να συγκεντρώνει και μόλυβδο στους ιστούς του σε πολλαπλάσιες συγκεντρώσεις από αυτές που βρίσκονται στο έδαφος αλλά αυτές οι συγκεντρώσεις δεν ξεπερνούσαν τις ανώτερες τιμές που θεωρούνται τοξικές για τα φυτά (Orcutt & Nilsen 2000) και δεν ήταν τόσο μεγάλες ώστε το φυτό να μπορεί να θεωρηθεί ένας πιθανός συσσωρευτής του μολύβδου. Οι συγκεντρώσεις του μολύβδου ήταν πολύ μεγαλύτερες στις ρίζες απ' ότι στα υπέργεια μέρη δηλώνοντας ότι και σε αυτό το είδος η κύρια θέση συσσώρευσης του Pb είναι οι ρίζες.

Η αύξηση της εδαφικής αλατότητας οδήγησε σε αύξηση της συγκέντρωσης του Cd και του Pb στα υπέργεια μέρη και μείωσή τους στις ρίζες, κάτι που δείχνει μετακίνηση των μετάλλων από τις ρίζες προς τα υπέργεια μέρη των φυτών.

Η έκκριση του Cd και του Pb από τους αλαταδένες του είδους αυτού επιβεβαίωσε ότι οι εκκριτικοί μηχανισμοί του δεν είναι εκλεκτικοί μόνο για τα άλατα αλλά η σύσταση των αλάτων που εκκρίνονται είναι ανάλογη της σύστασης του εδαφικού διαλύματος και ότι πιθανόν το φυτό αυτό χρησιμοποιεί την έκκριση των μετάλλων ως ένα μηχανισμό αντιμετώπισης των υψηλών συγκεντρώσεών τους. Επίσης η έκκριση και των δύο μετάλλων αυξήθηκε σημαντικά με την αύξηση της εδαφικής αλατότητας, γεγονός που αποδεικνύει την υπόθεση ότι λαμβάνει χώρα μεγαλύτερη έκκριση μετάλλων στις υψηλότερες αλατότητες.

Τα φυτά, στα οποία προστέθηκαν τα βαρέα μέταλλα, παρουσίασαν αυξημένες χλωροφύλλες και περιεχόμενο % σε νερό στους βλαστούς ενώ και η βιομάζα τους

παρουσίασε μικρή αύξηση αλλά μόνο στην επέμβαση χωρίς την προσθήκη του NaCl. Στις επεμβάσεις όπου έγινε, στο έδαφος, εκτός από την προσθήκη μετάλλων και προσθήκη NaCl 1%, οι χλωροφύλλες ήταν πάλι αυξημένες αλλά το % περιεχόμενο σε νερό των υπέργειων και η βιομάζα (υπέργειων + ριζών) παρουσίασαν μικρή μείωση. Αυτό δείχνει ότι ο συνδυασμός της υψηλής εδαφικής αλατότητας και των βαρέων μετάλλων επιδρά αρνητικά στην βιομάζα και στο % περιεχόμενο σε νερό των υπέργειων βλαστών πιθανόν λόγω της κατανάλωσης ενέργειας στους μηχανισμούς οσμωρύθμισης και συγχρόνως στους μηχανισμούς αποτοξίνωσης από τα μέταλλα.

6. Συνολικά Συμπεράσματα

6.1. Συνολικά συμπεράσματα για το φυτό *Halimione portulacoides*

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα και τις παρατηρήσεις του πειράματος καταλήγουμε ότι το *Halimione portulacoides* είναι ένα πολύ ανθεκτικό φυτό σε υψηλές συγκεντρώσεις Cd και Pb αφού βρέθηκε να συγκεντρώνει μεγάλες ποσότητες στους ιστούς του. Επιπλέον, στα υπέργεια μέρη του συγκεντρώνει Cd σε συγκεντρώσεις πολύ μεγαλύτερες από αυτές που θεωρούνται τοξικές για τα φυτά, χωρίς να παρατηρηθεί καμία ένδειξη τοξικότητας ή αρνητικής επίπτωσης στη λειτουργία των φυτών. Πιθανόν λοιπόν, να αποτελεί έναν συσσωρευτή του καδμίου κάτι που απαιτεί περαιτέρω έρευνα.

Το *Halimione portulacoides* εμφάνισε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις καδμίου και μολύβδου στις ρίζες απ' ότι στα υπέργεια μέρη του, όμως η συνολική ποσότητα καδμίου που συσσωρεύτηκε στα υπέργεια μέρη των φυτών ήταν πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που συσσωρεύτηκε στις ρίζες λόγω της αύξησης της βιομάζας των υπέργειων τμημάτων που παρατηρήθηκε στα φυτά των επεμβάσεων με τα μέταλλα. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για τις εφαρμογές της φυτοσυσσώρευσης όπου στόχος είναι ο θερισμός και η απομάκρυνση των υπέργειων τμημάτων των φυτών.

Επιπλέον, το είδος αυτό έχει αλατώδεις κύστες στα φύλλα του από τις οποίες παρατηρήθηκε ότι εκκρίνει κάδμιο και μολύβδο, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι οι εξειδικευμένοι αλαταδένες του φυτού δεν είναι εκλεκτικοί αλλά η σύσταση των αλάτων που εκκρίνονται είναι ανάλογη της σύστασης της ριζόσφαιρας. Αυτό καθιστά υποψήφιο αυτό το είδος για χρήση σε εφαρμογές της φυτοέκκρισης, μίας εναλλακτικής τεχνικής φυτοεξυγίανσης που έχει προταθεί πρόσφατα από άλλους ερευνητές (Kadukova et al. 2008, Manousaki et al. 2008).

Ακόμα, παρατηρήθηκε αύξηση της πρόσληψης του Cd από τα υπέργεια μέρη του φυτού καθώς και αύξηση της έκκρισης των μετάλλων από τις αλατώδεις κύστες, με την αύξηση της εδαφικής αλατότητας. Αυτό το γεγονός είναι πολύ σημαντικό γιατί υποδεικνύει ότι υπάρχει η δυνατότητα, σε μία εφαρμογή της φυτοσυσσώρευσης ή της φυτοέκκρισης, να αυξηθεί η συσσώρευση του καδμίου στα φυτά ή η έκκριση των μετάλλων με τους κατάλληλους χειρισμούς.

Αν ληφθούν όλα αυτά υπόψη καθώς και ότι είναι ένα είδος που δεν απαιτεί ιδιαίτερες καλλιεργητικές τεχνικές, είναι πολυετές, παρουσιάζει ευρεία κατανομή σε διαφορετικά κλίματα και μπορεί να αναπαραχθεί εύκολα με ριζοβολία, φαίνεται ότι είναι ένα πολλά υποσχόμενο φυτό για τις εφαρμογές της φυτοαποκατάστασης των εδαφών από μέταλλα και ειδικά κάδμιο, καθώς συνδυάζει την φυτοσυσσώρευση και την φυτοέκκριση.

6.2. Συνολικά συμπεράσματα για το φυτό *Tamarix parviflora*

Με βάση τις παρατηρήσεις για το *Tamarix parviflora* μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι παρόλο που το φυτό αυτό συγκέντρωσε ποσότητες καδμίου και μολύβδου στους ιστούς του, δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένας πιθανός συσσωρευτής του Cd ή του Pb αφού οι συγκεντρώσεις στα υπέργεια μέρη του δεν ξεπέρασαν τις γνωστές ως τοξικές συγκεντρώσεις για τα φυτά και ήταν κατά πολύ μικρότερες από τις συγκεντρώσεις στις ρίζες. Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της εδαφικής αλατότητας επέδρασε θετικά στην μετατόπιση του καδμίου από τις ρίζες στα υπέργεια τμήματα του φυτού.

Το φυτό αυτό διαπιστώθηκε ότι εκκρίνει από τους αλατώδεις αδένες του Cd και Pb, πιθανόν χρησιμοποιώντας την έκκριση των μετάλλων ως μηχανισμό αποτοξίνωσης. Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της εδαφικής αλατότητας οδήγησε σε αύξηση της έκκρισης και των δύο μετάλλων από τους εκκριτικούς αδένες.

Λαμβάνοντας υπόψη, τις συγκεντρώσεις των μετάλλων στο υπέργειο τμήμα των φυτών σε συνδυασμό όμως με την μεγάλη παραγωγή βιομάζας του, τότε φαίνεται ότι το είδος αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε εφαρμογές φυτοσυσσώρευσης και ειδικά σε συνδυασμό με τη μέθοδο της φυτοέκκρισης και σε συνδυασμό με τις κατάλληλες καλλιεργητικές τεχνικές (π.χ. αύξηση εδαφικής αλατότητας) που μπορεί να αυξήσουν την απομάκρυνση των μετάλλων από το έδαφος. Η χρήση των δέντρων, γενικά, έχει προταθεί ότι αποτελεί μια καλή λύση για τις εφαρμογές της φυτοεξυγίανσης, διότι παρόλο που συνήθως συσσωρεύουν σχετικά μικρές ποσότητες βαρέων μετάλλων στα υπέργεια μέρη τους, παρέχουν οικονομική αποκατάσταση του ρυπασμένου εδάφους μέσω της μεγάλης παραγωγής βιομάζας τους. Επίσης, είναι κατάλληλο διότι έχει εκτεταμένο ριζικό σύστημα που φτάνει μέχρι τον υδροφόρο ορίζοντα, αναπτύσσεται επιτυχώς σε φτωχά εδάφη, αντέχει σε ποικιλία διαφορετικών κλιματικών συνθηκών και δεν απαιτεί ιδιαίτερες καλλιεργητικές τεχνικές.

6.3. Συνολικά συμπεράσματα για το φυτό *Limoniastrum monopetalum*

Από τα αποτελέσματα του πειράματος φάνηκε ότι το *Limoniastrum monopetalum* είναι πιθανότατα ένας υπερσυσσωρευτής του Cd, διότι οι συγκεντρώσεις του καδμίου στα υπέργεια μέρη των φυτών ξεπερνούσαν, κατά μέσο όρο, τη συγκέντρωση των 100 ppm και στην επέμβαση με την προσθήκη NaCl η συγκέντρωση του καδμίου ήταν μεγαλύτερη

στους υπέργειους ιστούς απ' ότι στις ρίζες. Βέβαια αυτό είναι μία σημαντική ένδειξη που πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω. Ακόμα, το είδος αυτό μπορεί να συγκεντρώνει και μόλυβδο στους ιστούς του σε πολλαπλάσιες συγκεντρώσεις από αυτές που βρίσκονται στο έδαφος αλλά αυτές οι συγκεντρώσεις δεν ξεπερνούσαν τις ανώτερες τιμές που θεωρούνται τοξικές για τα φυτά και η κύρια θέση συσσώρευσης του Pb ήταν οι ρίζες οπότε το φυτό δεν μπορεί να θεωρηθεί ένας πιθανός συσσωρευτής του μολύβδου.

Φάνηκε ότι είναι ένα φυτό πολύ ανθεκτικό στις υψηλές συγκεντρώσεις των μετάλλων αυτών διότι δεν μεταβλήθηκαν σημαντικά οι λειτουργίες του με την προσθήκη των μετάλλων και δεν παρουσιάστηκε κανένα οπτικό σύμπτωμα τοξικότητας κατά τη διάρκεια του πειράματος. Κάποιες φυσιολογικές του λειτουργίες φαίνεται να επηρεάστηκαν αρνητικά αλλά όχι σημαντικά από τη σύγχρονη παρουσία των μετάλλων και της υψηλής εδαφικής αλατότητας.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, καταλήγουμε ότι το είδος αυτό είναι κατάλληλο για χρήση σε εφαρμογές της φυτοσυσσώρευσης του καδμίου και του μολύβδου και κυρίως βέβαια του καδμίου όπου μπορεί να πετύχει σημαντικούς ρυθμούς απομάκρυνσης του από το έδαφος.

Επιβεβαιώθηκε επιπλέον ότι το φυτό αυτό εκκρίνει Cd και Pb από τους αλαταδένες του υποδεικνύοντας ότι οι εκκριτικοί μηχανισμοί του δεν είναι εκλεκτικοί μόνο για τα άλατα αλλά η σύσταση των αλάτων που εκκρίνονται είναι ανάλογη της σύστασης του εδαφικού διαλύματος. Αυτό, δείχνει ότι το *Limoniastrum monopetalum* μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή της τεχνικής της φυτοέκκρισης, κάτι που απαιτεί περισσότερη έρευνα για να καθοριστεί και η ποσότητα των μετάλλων που μπορεί να απομακρύνει το φυτό από το έδαφος σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Η αύξηση της εδαφικής αλατότητας οδήγησε σε μετακίνηση και των δύο μετάλλων από τις ρίζες προς τα υπέργεια μέρη των φυτών όπως και σε μεγαλύτερη έκκριση τους από τους αλαταδένες. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι σε αλατούχα εδάφη θα επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση της φυτοσυσσώρευσης και της φυτοέκκρισης ή και ότι με την προσθήκη αλάτων στο προς αποκατάσταση έδαφος θα οδηγούμαστε σε καλύτερη απόδοση της μεθόδου.

Συνυπολογίζοντας τις παραπάνω παρατηρήσεις, μαζί και το γεγονός ότι το φυτό αυτό δεν απαιτεί ιδιαίτερες καλλιεργητικές τεχνικές για την ανάπτυξή του, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι είναι ένα πολύ σημαντικό φυτό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις μεθόδους της φυτοσυσσώρευσης και της φυτοέκκρισης αλλά και για τον συνδυασμό και των δύο μεθόδων, ώστε να πετύχουμε καλύτερες αποδόσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adriano D.C., Wenzel W.W., Vangronsveld J., Bolan N.S (2004) “Role of assisted natural remediation in environmental cleanup” *Geoderma* **122**: 121–142
- Alloway B.J (1995) “*The Origins of Heavy metals in soils*” in: Alloway B.J., Heavy Metals in Soils, 2nd edition, Blackie Academic and Professional, an imprint of Chapman & Hall, 1995, UK
- Al-Taisan A.Wafa’a (2009) “Suitability of Using *Phragmites australis* and *Tamarix aphylla* as Vegetation Filters in Industrial Areas” *American Journal of Environmental Sciences* **5** (6): 740-747
- Bajji M., Kinet J.-M., Lutts S. (1998) “Salt stress effects on roots and leaves of *Atriplex halimus* L. and their corresponding callus cultures” *Plant Science* **137**: 131–142
- Bazzaz F.A., Carlson R.W., Rolfe C.G.L. (1974) “The effect of heavy metals on plants: Part I. Inhibition of gas exchange in Sunflower by Pb, Cd, Ni and Tl” *Environmental Pollution* **7**: 241-242
- Ben Hassine A., Ghanem M.E., Bouzid S., Lutts S. (2009) “ Absciscic acid has contrasting effects on salt excretion and polyamine concentrations of an inland and a coastal population of the Mediterranean xero-halophyte species *Atriplex halimus*” *Annals of Botany* **104**: 925-936
- Bingham F.T., Strong J.E., Sposito G. (1983) “Influence of Chloride Salinity on Cadmium uptake by Swiss chard” *Soil Science* **135** (3): 160-165
- Blamey M., Grey-Wilson C. (1998) Mediterranean Wild Flowers, HarperCollins Publishers, Domino Books production
- Blaylock M .J., Salt D., Dushenkov S., Zakharova O., Gussman C., Kapulnik Y., B. Ensley, Raskin I. (1997) “Enhanced Accumulation of Pb in Indian Mustard by Soil-Applied Chelating Agents” *Environmental Science and Technoogy*. **31**: 860-865
- Boominathan R., Doran P.M. (2003) “Cadmium Tolerance and Antioxidative Defences in Hairy Roots of the Cadmium Hyperaccumulator, *Thlaspi caerulescens*” *Biotechnology and Bioengineering* **83**(2): 158-167
- Breckle S-W. (2002) “*Salinity, Halophytes and Salt Affected Natural Ecosystems*” in: Läubli A. and Lüttge U. (eds.) Salinity: Environment – Plants – Molecules, 53-77, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2002
- Breckle S.-W, Kahle H. (1992) “Effects of toxic heavy metals (Cd, Pb) on growth and mineral nutrition of beech (*Fagus sylvatica* L.)” *Vegetatio* **101**: 43-53
- Burke D. J., Weis J. S., Weis P. (2000) “Release of Metals by the Leaves of the Salt Marsh Grasses *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis*” *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **51**: 153–159
- Carlson R.W., Bazzaz F. A. (1977) “Growth reduction in American Sycamore (*Platanus occidentalis* L.) caused by Pb-Cd interactions” *Environmental. Pollution* **12**: 243-253

- Chaney R.L., Angle J.S., Broadhurst C.L., Peters C.A., Tappero R.V., Sparks D.L. (2007) "Improved Understanding of Hyperaccumulation Yields Commercial Phytoextraction and Phytomining Technologies" *Journal of Environmental Quality* **36**: 1429-1443
- Chen Y., Li X., Shen Z. (2004) "Leaching and uptake of heavy metals by ten different species of plants during an EDTA-assisted phytoextraction process" *Chemosphere* **57**: 187-196
- Choi Y.-E., Harada E., Wada M., Tsuboi H., Morita Y., Kusano T., Sano H. (2001) "Detoxification of Cadmium in Tobacco plants: formation and active excretion of crystals containing cadmium and calcium through trichomes" *Planta* **213**: 45-50
- Choukr-Allah R. (1997) "The potential of salt-tolerant plants for utilisation of saline waters" Options Méditerranéennes, Sér. A, No. 31, Séminaires Méditerranéens
- Clemens S., Palmgren M.G., Krämer U. (2002) "A Long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation" *Trends in Plant Science* **7** (7)
- Cunningham S.D., Berti W.R., Huang J.W. (1995) "Phytoremediation of contaminated soils" *Trends in Biotechnology* **13**: 393-397
- Dajic Z. (2006) "Salt Stress" in: Madhava Rao K.V., Raghavendra A.S., Janardhan Reddy K. (eds.), *Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants*, 41-99, Springer, Printed in the Netherlands
- Das P., Samantaray S., Rout G.R. (1997) "Studies on Cadmium Toxicity in Plants: A Review" *Environmental Pollution* **98** (1): 29-36
- Ewais E.A. (1997) "Effects of Cadmium, Nickel and Lead on Growth, Chlorophyll content and Proteins of weeds" *Biologia Plantarum* **39** (3): 403-410
- Fahn Abraham (1988) "Secretory tissues in vascular plants-Tansley Review No.14" *New Phytology* **108**: 229-257
- Farmaki E.G., Thomaidis N.S. (2008) "Current status of the metal pollution of the environment of Greece- A Review" *Global NEST Journal* **10** (3): 366-375
- Fawzy E.M., Soltan M.E., Sirry S.M. (2006) "Mobilization of different metals between Tamarix parts and their crystal salts – soil system at the banks of river Nile, Aswan, Egypt" *Toxicological & Environmental Chemistry* **88**(4): 603-618
- Fedotov P. S., Spivakov B. Ya (2008) "Fractionation of elements in soils, sludges and sediments: batch and dynamic methods" *Russian Chemical Reviews* **77** (7): 649- 660
- Flowers T.J., Colmer T.D. (2008) "Salinity tolerance in halophytes" *New Phytologist* **179**: 945-963
- Flowers T.J., Flowers S.A. (2005) "Why does salinity pose such a difficult problem for plant breeders?" *Agricultural Water Management* **78**: 15-24

- Gardea-Torresdey J. L., Peralta-Videa J. R., de la Rosa G., Parsons J.G. (2005) "Phytoremediation of heavy metals and study of the metal coordination by X-ray absorption spectroscopy" *Coordination Chemistry Reviews* **249**: 1797–1810
- Ghosh M., Singh S.P. (2005). "A Review on Phytoremediation of Heavy Metals and Utilization of its Byproducts" *Applied Ecology and Environmental Research* **3**(1): 1-18
- Ghnaya T., Slama I., Messedi D., Grignon C., Habib Ghorbel M., Abdelly C. (2007) "Cd-induced growth reduction in the halophyte *Sesuvium portulacastrum* is significantly improved by NaCl" *Journal of Plant Research* **120**: 309–316
- Glenn E.P., Brown J.J., Blumwald E. (1999) "Salt Tolerance and Crop Potential of Halophytes" *Critical Reviews in Plant Sciences* **18** (2):227–255
- Glenn E. P., O'Leary J. W. (1984) "Relationship between salt accumulation and water content of dicotyledonous halophytes" *Plant, Cell and Environment*: **7**: 253-261
- Greger M., Kautsky L. Sandberg T. (1995) "A Tentative Model of Cd Uptake in *Potamogeton pectinatus* in Relation to Salinity" *Environmental and Experimental Botany* **35** (2): 215-225
- Hagemeyer J., Waisel Y. (1988) "Excretion of ions (Cd^{2+} , Li^+ , Na^+ , and Cl^-) by *Tamarix aphylla*" *Physiologia Plantarum* **73**: 541-546
- Ha N.T.H., Sakakibara M., Sano S., Nhuanc M.T. (2011) "Uptake of metals and metalloids by plants growing in a lead–zinc mine area, Northern Vietnam" *Journal of Hazardous Materials* **186**: 1384–1391
- Hall J.L. (2002) "Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance" *Journal of Experimental Botany* **53** (366): 1-11
- Harborne J.B. (1984). Chlorophylls In: *Phytochemical Methods*, 2nd ed., Chapman and Hall, London, pp. 214-221
- Hameed M., Ashraf M., Sajid Aqeel Ahmad M., Naz N. (2010) "Structural and Functional Adaptations in Plants for Salinity Tolerance" *in*: Ashraf M.et al. (eds.), *Plant Adaptation and Phytoremediation*-Chapter 8, Springer Science + Business Media B.V., 2010
- Henry J.R. (2000) "An Overview of the Phytoremediation of Lead and Mercury" National Network of Environmental Management Studies (NNEMS), Prepared For U.S. Environmental Protection Agency, available on-line at: <http://www.clu-in.org/download/studentpapers/henry.pdf>
- Huang J. W., Chen J., Berti W.R., Cunningham S.D. (1997) "Phytoremediation of lead-contaminated soils: role of synthetic chelates in lead phytoextraction" *Environmental Science and Technology* **31**: 800-805

- Hussein H.S., Norman Terry (2002) “Phytomonitoring the unique colonization of oil-contaminated saline environment by *Limoniastrum monopetalum* (L.) Boiss in Egypt” *Environment International* **28**: 127–135
- Islam E., Liu D., Li T., Yang X., Jin X., Khan M.A., Mahmood Q., Hayat Y., Imtiaz M. (2010) “Effect of Pb Toxicity on the Growth and Physiology of Two Ecotypes of *Elsholtzia argyi* and Its Alleviation by Zn” *Environmental Toxicology* Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI 10.1002/tox.20630
- Jadia C.D., Fulekar M.H. (2009) “Phytoremediation of heavy metals: Recent techniques (Review)” *African Journal of Biotechnology* **8** (6): 921-928
- Jensen A. (1985) “On the ecophysiology of *Halimione portulacoides*” *Vegetatio* **61**, 231-240
- Jiang X.J., Luo Y.M., Zhao Q.G., Baker A.J.M., Christie P., Wong M.H. (2003) “Soil Cd availability to Indian mustard and environmental risk following EDTA addition to Cd-contaminated soil” *Chemosphere* **50**: 813–818
- Jithesh M.N., Prashanth S.R., Sivaprakash K.R., Parida A.K. (2006) “Antioxidative response mechanisms in halophytes: their role in stress defense, Review article” *Journal of Genetics* **85** (3): 237-254
- Kadukova J., Kalogerakis N. (2007) “Lead accumulation from non-saline and saline environment by *Tamarix smyrnensis* Bunge” *European Journal of Soil Biology* **43**: 216-223
- Kadukova J., Manousaki E., Kalogerakis N. (2008) “Pb and Cd Accumulation and Phyto-Excretion by Salt Cedar (*Tamarix smyrnensis* Bunge)”, *International Journal of Phytoremediation* **10** (1): 31 - 46
- Kasassi A., Rakimbei P., Karagiannidis A., Zabaniotou A., Tsiouvaras K., Nastis A., Tzafeiropoulou K. (2008) “Soil contamination by heavy metals: Measurements from a closed unlined landfill” *Bioresource Technology* **99**: 8578–8584
- Kazakou E., Dimitrakopoulos P., Baker A.J.M., Reeves R.D., Troumbis A.Y. (2008) “Hypotheses, mechanisms and trade-offs of tolerance and adaptation to serpentine soils: from species to ecosystem level” *Biological. Reviews*, doi:10.1111/j.1469-185X.2008.00051.x
- Kelepertsis A.E., Bibou A. (1991) “Heavy metal contamination of soils at old mining sites on Thasos Island, Greece” *Environmental Geochemistry and Health* **13**: 23-28
- Kirkham M.B. (2006) “Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments”, *Geoderma* **137**: 19-32
- Khan A.G. (2006) “Mycorrhizoremediation—an enhanced form of phytoremediation-a Review” *J. Zhejiang Univ. SCIENCE B* **7** (7):503-514

- Kholodova V., Volkov K., Kuznetsov V. (2010) “Plants Under Heavy Metal Stress in Saline Environments” in: I. Sherameti and A. Varma (eds.), Soil Heavy Metals, Soil Biology, Vol **19**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Kos B. and Leštan D. (2003) “Induced phytoextraction / soil washing of lead using biodegradable chelate and permeable barriers” *Environmental Science and Technology* **37**: 624-629
- Kopittke P. M., Asher C. J., Blamey F. P. C., Menzies N. W. (2007) “Toxic effects of Pb²⁺ on the growth and mineral nutrition of signal grass (*Brachiaria decumbens*) and Rhodes grass (*Chloris gayana*)” *Plant Soil* **300**:127–136
- Kopittke P. M., Asher C. J., Blamey F. P. C., Menzies N. W. (2007) “Toxic effects of Pb²⁺ on the growth and mineral nutrition of signal grass (*Brachiaria decumbens*) and Rhodes grass (*Chloris gayana*)” *Plant Soil* **300**:127–136
- Krämer U., Chardonens A.N. (2001) “The use of transgenic plants in the bioremediation of soils contaminated with trace elements” *Applied Microbiology and Biotechnology* **55**:661–672
- Lasat M.M. (2000) “The use of plants for the removal of toxic metals from contaminated soil” American Association for the Advancement of Science, Environmental Science and Engineering Fellow. Available online at:
http://www.plantstress.com/Articles/toxicity_m/phytoremed.pdf
- Lasat M.M. (2002) “Phytoextraction of Toxic Metals: A Review of Biological Mechanisms” *Journal of Environmental Quality* **31**:109–120
- Lefèvre I., Marchal G., Meerts P., Corrial E., Lutts S. (2009). “Chloride salinity reduces cadmium accumulation by the Mediterranean halophyte species *Atriplex halimus* L.” *Environmental and Experimental Botany* **65**: 142–152
- Liu D., Jiang W., Wang W., Zhao F., Lu C. (1994) “Effects of Lead on Root Growth, Cell Division and Nucleolus of *Allium cepa*” *Environmental Pollution* **86**: 1-4
- Liu D. Zou J., Meng Q., Zou J., Jiang W. (2009) “Uptake and accumulation and oxidative stress in garlic (*Allium sativum* L.) under lead phytotoxicity” *Ecotoxicology* **18**:134–143
- Lovelock C.E., Ball M.C. (2002) “Influence of Salinity on Photosynthesis of Halophytes” *in*: Läuchli A., Lüttge U. (eds.), Salinity: Environment – Plants- Molecules, 315 – 339, Kluwer Academic Publishers, Printed in Netherlands, 2002
- Mahon S. & Carman R. K. (2008). “The Influence of salinity on the uptake, distribution, and excretion of metals by the smooth cordgrass, *Spartina alterniflora* (Loisel.), grown in sediment contaminated by multiple metals” *Estuaries and Coasts* **31**:1089–1097
- Manousaki Eleni, Kadukova Jana, Papadantonakis Nikolaos, Kalogerakis Nicolas (2008) “Phytoextraction and phytoexcretion of Cd by the leaves of *Tamarix smyrnensis* growing on contaminated non-saline and saline soils”. *Environmental Research* **106**

(3): 326-332

- Manousaki E., Kalogerakis N. (2009) “Phytoextraction of Pb and Cd by the Mediterranean saltbush (*Atriplex halimus* L.): metal uptake in relation to salinity” *Environmental Science and Pollution Research* **16**: 844–854
- Manousaki E., Kalogerakis N. (2010) “Halophytes-an emerging trend in phytoremediation” *International Journal of Phytoremediation*, In Print
- Manousaki E., Kalogerakis N. (2011) “Halophytes Present New Opportunities in Phytoremediation of Heavy Metals and Saline Soils” *Industrial and Engineering Chemistry Research* **50**: 656–660
- Manousaki E., Kokkali F., Kalogerakis N. (2009) “Influence of salinity on lead and cadmium accumulation by the salt cedar (*Tamarix smyrnensis* Bunge)” *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* **84**: 877–883
- Mench M., Lepp N., Bert V., Schwitzguébel J.-P., Gawronski S.W., Schröder P., Vangronsveld J. (2010) “Successes and limitations of phytotechnologies at field scale: outcomes, assessment and outlook from COST Action 859” *Journal of Soils and Sediments* **6**: 1039-1070, Springer-Verlag, Published online 13 February 2010
- Messedi D., Slama I., Laabidi N., Ghnaya T., Savoure A., Soltani A. and Abdelly C. (2006) “Effect of nitrogen deficiency, salinity and drought on proline metabolism in *Sesuvium portulacastrum*” *Biosaline Agriculture and Salinity Tolerance in Plants*, Edited by Öztürk M., Waisel Y., Khan M.A. and Görk G., 2006, Birkhäuser Verlag /Switzerland
- Nascimento C.W.A, Xing B. (2006) “Phytoextraction: A review on enhanced metal availability and plant accumulation” *Scientia Agricola (Piracicaba, Braz.)*, **63**(3): 299-311
- Nakos G. (1982) “Pollution of soil and vegetation in the Thriasian Plain, Greece” *Plant and Soil* **66**: 271-277
- Neves J. P., Ferreira L. F., Simões M. P., Gazarini L. C. (2007) “Primary Production and Nutrient Content in Two Salt Marsh Species, *Atriplex portulacoides* L. and *Limoniastrum monopetalum* L., in Southern Portugal” *Estuaries and Coasts* **30** (3): 459-468
- Nikolaidis C., Zafiriadis I., Mathioudakis V., Constantinidis T. (2010) “Heavy Metal Pollution Associated with an Abandoned Lead–Zinc Mine in the Kirki Region, NE Greece” *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **85**: 307–312
- Orcutt D.M., Nilsen E.T. (2000). *Physiology of Plants under Stress*, soil and biotic factors, John Wiley & sons, Inc.
- Papafilipaki A., Velegraki D., Vlachaki C., Stavroulakis G. (2008) “Levels of Heavy metals and bioavailability in soils from the industrial area of Herakleion –Crete,

- Greece” In the Proceedings of the “Protection and Restoration of the Environment IX” 29/6-3/7/2008, Kefalonia.
- Papafilipaki A., Sotiriou G., Paidia E., Stavroulakis G. (2008) “Spatial Distribution of Pb and Cd in Urban Soils of Chania City, Crete (Greece)” Proceedings of the 1st International Conference on Hazardous Waste Management, 1-3 Oct. 2008, Chania, Greece.
- Papastergios G., Filippidis A., Fernandez-Turiel Jose-Luis, Gimeno D., Sikalidis C. (2010) “Surface Soil Geochemistry for Environmental Assessment in Kavala Area, Northern Greece” *Water Air Soil Pollution* Published online 29 June 2010
- Peer W.A., Baxter I.R., Richards E.L., Freeman J.L., Murphy A.S. (2005) “Phytoremediation and Hyperaccumulator Plants”. Ch. 11 In: Klomp LWJ, Martinoia E and Tamás MJ (Eds). *Molecular Biology of Metal Homeostasis and Detoxification: from microbes to man. Topics in Current Genetics*. Vol. 14 New York, Springer-Verlag Produced by The Center for Phytoremediation, Purdue University, West Lafayette, USA
- Prasad M.N.V (1995) “Cadmium Toxicity and Tolerance in Vascular Plants” *Environmental and Experimental Botany* **35** (4): 525-545
- Prasad M.N.V., Freitas H.M.O. (2003) “Metal hyperaccumulation in plants-Biodiversity prospecting for phytoremediation technology” *Electronic journal of Biotechnology* **6** (3), available on-line at: <http://www.ejbiotechnology.info/content/vol6/issue3/>
- Rabhi M., Ferchichi S., Jouini J., Hamrouni M. H., Koyro H.-W., Ranieri A., Abdelly C., Smaoui A. (2010) “Phytodesalination of a salt-affected soil with the halophyte *Sesuvium portulacastrum* L. to arrange in advance the requirements for the successful growth of a glycophytic crop” *Bioresource Technology* **101**: 6822–6828
- Raskin I., Nanda Kumar PBA, Dushenkov S., Salt D.E (1994) “Bioconcentration of heavy metals by plants” *Current Opinion in Biotechnology* **5**:285-290
- Raskin I., Smith R.D., Salt D.E. (1997) “Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment” *Current Opinion in Biotechnology* **8**: 221-226
- Reboreda R., Caçador I. (2007) “Copper, zinc and lead speciation in salt marsh sediments colonised by *Halimione portulacoides* and *Spartina maritima*” *Chemosphere* **69**: 1655–1661
- Reboreda F. (2001) “Cadmium Uptake by *Halimione portulacoides*: An Ecophysiological Study” *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **67**: 926–933
- Redondo-Gómez S., Mateos-Naranjo E., Davy A.J., Fernández-Munoz F., Castellanos E.M., Luque T., Figueroa M.E. (2007) “Growth and Photosynthetic Responses to Salinity of the Salt-marsh Shrub *Atriplex portulacoides*” *Annals of Botany* **100**: 555-563

- Rhodes D., Nadolska-Orczyk A., Rich P.J. (2002) “Salinity, Osmolytes and Compatible Solutes” in: Läuchli A. and Lüttge U. (eds.) Salinity: Environment – Plants – Molecules, Chapter 9, pp. 53-77, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2002
- Roosens N., Verbruggen N., Meerts P., Ximénez-Embún, Smith J.A.C. (2003) “Natural variation in cadmium tolerance and its relationship to metal hyperaccumulation for seven populations of *Thlaspi caerulescens* from western Europe” *Plant, Cell and Environment* **26**: 1657–1672
- Rozema Jelte, Buys Ed, Otte L. Marinus, Broekman A. Rob, and Ernst H.O. Wilfried (1991) “Ion content and ion excretion of *Spartina anglica* in relation to salinity and redox potential of salt marsh soil” *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **154**:307-313
- Salt D.E., Smith R.D., Raskin I. (1998) “Phytoremediation” *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* **49**: 643-668
- Schmidt U. (2003) “Enhancing Phytoextraction: The Effect of Chemical Soil Manipulation on Mobility, Plant Accumulation, and Leaching of Heavy Metals” *Journal of Environmental Quality*. **32**:1939–1954
- Sharma S.S., Dietz K.-J. (2006) “The significance of amino acids and amino acid-derived molecules in plant responses and adaptation to heavy metal stress” *Journal of Experimental Botany* **57** (4):711–726
- Somaru R., Naidoo Y., Naidoo G.(2002) “Morphology and ultrastructure of the leaf salt glands of *Odyssea paucinervis* (Stapf) (Poaceae)” *Flora* **197**: 67–75
- Soon Y.K. (1998). Determination of cadmium, chromium, cobalt, lead and nickel in plant tissue. In: Kaltra P. (eds), Handbook of Reference Methods for Plant Analysis, CRC Press, London, pp. 193-198
- Sousa A.I., Caçador I., Lillebø A.I., Pardal M.A. (2008) “Heavy metal accumulation in *Halimione portulacoides*: Intra- and extra-cellular metal binding sites” *Chemosphere* **70**: 50–857
- Stamatis G., Voudouris K., Karefilakis F. (2001) “Groundwater Pollution by Heavy Metals in Historical Mining Area of Lavrio, Attica, Greece” *Water, Air, and Soil Pollution* **128**: 61–83
- Stienstra A.W. (1977) “Mineral Composition of *Halimione portulacoides* (L.)Aellen Leaves” *Hydrobiologia* **51** (1): 89-91
- Sun L., Niu Z., Sun T. (2007) “Effects of Amendments of N, P, Fe on Phytoextraction of Cd, Pb, Cu, and Zn in Soil of Zhangshi by Mustard, Cabbage, and Sugar Beet” Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com)
- Suntornvongsagul K., Burke D., Dittmar H. (2007). “Uptake and Translocation of Heavy Metals in Salt Marsh Sediments by *Spartina patens*” *Bulletin of Environmental*

Contamination and. Toxicology **78**: 275–279

- Toderich K.N., Tsukatani T., Black C.C., Takabe K., Katayama Y. (2002) “Adaptations of Plants to Metal/Salt Contained Environments: Glandlar Structure and Salt Excretion” Discussion Paper No.552, Kyoto Institute of Economic Research, Kyoto University
- Turland N.J., Chilton L., Press J.R. (1993), *Flora of the Cretan Area*, The Natural History Museum, London
- Tutin T.G., Heywood V.H., Burges N.A., Moore D.M., Valentine D.H., Walters S.M., Webb D.A. (1981), *Flora Europea*, Cambridge University Press
- Twomey J Amanda, Naidu P. Bodapati & Fukai Shu (2008). “Evidence of salt secretion at the stem of *Melaleuca cuticularis* Labill.” Available from: Nature Precedings. <http://precedings.nature.com/documents/2450/version/1/files/npre20082450-1.pdf>
- Vázquez S., Goldsbrough P., Carpena R.O. (2006) “Assessing the relative contributions of phytochelatins and the cell wall to cadmium resistance in white lupin” *Physiologia Plantarum* **128**: 487–495
- Verma S., Dubey R.S. (2003) “Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants” *Plant Science* **164**: 645-655
- Wahid A. (2003) “Physiological Significance of Morpho-Anatomical Features of Halophytes with Particular Reference to Cholistan Flora, Review” *International Journal of Agriculture and Biology* **5** (2): 207-212
- Wahid A., Arshad M., Farooq M. (2009) “Cadmium Phytotoxicity: Responses, Mechanisms and Mitigation Strategies: A Review” in: E. Lichtfouse (ed.) *Organic Farming, Pest Control and Remediation of Soil Pollutants, Sustainable Agriculture Reviews*1, Springer Science and Business Media B.V. 2009
- Wahla I.H., Kirkham M.B. (2008) “Heavy metal displacement in salt-water-irrigated soil during phytoremediation” *Environmental Pollution* **155**: 271-283
- Weis J.S., Weis P. (2004) “Metal uptake, transport and release by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration” *Environment International* **30**: 685– 700
- Wei S., Teixeira da Silva J.A., Zhou Q. (2008) “Agro-improving method of phytoextracting heavy metal contaminated soil” *Journal of Hazardous Materials* **150**: 662–668
- Xia H., Chi X., Yan Z., Cheng W. (2009) “Enhancing plant uptake of polychlorinated biphenyls and cadmium using tea saponin” *Bioresource Technology* **100**: 4649–4653
- Yassoglou N., Kosmas C., Asimakopoulos J., Kallianou C. (1987) “Heavy Metal Contamination of Roadside Soils in the Greater Athens Area” *Environmental Pollution* **47**: 293-304

Zhang S., Chen M., Li T., Xu X., Deng L. (2010) “A newly found cadmium accumulator-*Malva sinensis* Cavan.” *Journal of Hazardous Materials* **173**: 705–709

Ελληνική βιβλιογραφία

Γαλάτης Β., Γανωτάκης Δ., Γκανή-Σπυροπούλου Κ., Καραμπουρνιώτης Γ., Κοτζαμπάσης Κ., Κωνσταντινίδου Ε.-Ι., Μενετής Ι., Ρουμπελάκη-Αγγελάκη Κ.Α. (2009), “Φυσιολογία Φυτών: από το μόριο στο περιβάλλον”, επιμέλεια: Ρουμπελάκη-Αγγελάκη Κ.Α., Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο.

Καραμπουρνιώτης Γ.Α. (2003), “Φυσιολογία Καταπονήσεων των Φυτών”, Εκδόσεις Έμβρυο και Γ. Καραμπουρνιώτης, Αθήνα

Μανουσάκη Ε. (2008) “Χαρακτηρισμός της ικανότητας μεσογειακών φυτών για απομάκρυνση Pb και Cd από ρυπασμένα εδάφη” Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

Μιχαλοπούλου Χ. (2004), Νομοθεσία για το Περιβάλλον, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη

Παπαμίχος Ν.Θ. (1996), Δασικά Εδάφη, σχηματισμός, Ιδιότητες, Συμπεριφορά, Έκδοση Β΄, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης-Υπηρεσία Δημοσιευμάτων.

Σπέντζα Ρ. (2010). “Αξιολόγηση της ανάπτυξης των αυτοφυών *Hyssopus officinalis*, *Limoniastrum monopetalum* & *Salvia triloba*, σε υποστρώματα λατομικών δραστηριοτήτων, για αποκατάσταση εδαφών της νήσου Μήλου”, Μεταπτυχιακή διπλωματική, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής.

Διαδικτυακές Πηγές:

WHO: <http://www.euro.who.int/>

USDA Forest Service: <http://www.fs.fed.us/database/feis/plants/tree/tamspp/all.html>