

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΔΕΙΦΟΡΟΣ ΑΓΡΟΤΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

«Διαθεσιμότητα βαρέων μετάλλων ενός έντονα ρυπασμένου εδάφους σε
τρία είδη φυτών»



Παπαθεοδώρου Σοφία – Άρτεμις

Βόλος 2015

«Διαθεσιμότητα βαρέων μετάλλων ενός έντονα ρυπασμένου εδάφους σε τρία είδη
φυτών.»
ΠΑΠΑΘΕΟΔΩΡΟΥ ΣΟΦΙΑ - ΑΡΤΕΜΙΣ

ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ Β., ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΑ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΛΕΒΙΖΟΥ Ε., ΛΕΚΤΟΡΑΣ
ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ ΦΥΤΩΝ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΔΗΜΗΡΚΟΥ Α., ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ
ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΑ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗ ΧΗΜΕΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Copyright © *ONOMATEΠΩΝΥΜΟ, ΕΤΟΣ*.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. Allrightsreserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διατριβής, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης.

Η έγκριση της Μεταπτυχιακής Διατριβής Ειδίκευσης από το Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δε δηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.

Πρόλογος

Η εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Εδαφολογίας, υπό την επίβλεψη του κ. Βασίλειου Αντωνιάδη, Επίκουρο Καθηγητή της Εφαρμοσμένης Εδαφολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για τη συνεχή καθοδήγηση, καθώς και τα μέλη της τριμελούς επιτροπής, Ευθυμία Λεβίζου, Λέκτορας της Φυσιολογίας Φυτών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και Ανθή Δημήρκου, Καθηγήτρια Εδαφολογίας με έμφαση στη Χημεία Εδάφους του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Σκοπός της εργασίας είναι να εξερευνήσει τη συσχέτιση μεταξύ συγκεκριμένων μετάλλων και συγκεκριμένων φυτών, δίνοντας βάση στο επίπεδο αντοχής των φυτών που επηρεάζονται από τα βαρέα μέταλλα.

Περίληψη

Το παρόν πείραμα έλαβε χώρα σε θερμοκήπιο με ελεγχόμενο πότισμα και στο οποίο καλλιεργήθηκαν τρία είδη φυτών: το μαρούλι (*Lactucasativa*), ένα βρώσιμο λαχανικό, η γλιστρίδα (*Portulacaoleracea*), το οποίο είναι χαρακτηριστικό μεσογειακό φυτό καθώς και ζιζάνιο και επιθετικός εισβολέας, και το γεράνι (*Pelargoniumzonale*), ένα κοινό καλλωπιστικό φυτό. Τα φυτά αυτά καλλιεργήθηκαν σε δύο τύπους εδαφών. Το ένα (μάρτυρας), ήταν απαλλαγμένο από βαρέα μέταλλα και το άλλο συλλέχθηκε από μια βιομηχανική περιοχή και περιελάμβανε μια ποσότητα των υπό μελέτη βαρέων μετάλλων. Επειδή, η ποσότητα αυτή των βαρέων μετάλλων που περιελάμβανε το δεύτερο έδαφος δεν ήταν επαρκής για τη διεξαγωγή του πειράματος, προστέθηκε μια επιπλέον ποσότητα από το κάθε βαρύ μέταλλο στο έδαφος, σε δύο δόσεις κατά τη διάρκεια του πειράματος. Μετά τις εργαστηριακές αναλύσεις, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, παρόλο που δεν υπήρξαν εμφανείς επιπτώσεις στα φυτά, και οι τρεις τύποι φυτών είχαν αξιοσημείωτες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στους ιστούς τους. Αυτή η διπλωματική εργασία προτείνει τη μέθοδο της φυτοαποκατάστασης ως μια οικολογική και οικονομική τεχνολογία για την εξαγωγή των βαρέων μετάλλων από επιβαρυμένα εδάφη, καθώς και την εναλλακτική χρήση των φυτών αυτών, εκτός από κατανάλωση ή καλλωπισμό, η οποία θα μπορούσε να επιφέρει περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη.

Φυτοαποκατάσταση, Επιβαρυμέναεδάφη, Μαρούλι, Γλιστρίδα, Γεράνι, Ψευδάργυρος, Κάδμιο

Summary

Soil contamination consist a serious aftereffect, mainly, of intensive industrial and agricultural development that has been taking place the last century. If, in areas that confront soil contamination, it is not treated right people can come up against serious food safety issues. There has been a lot of scientific research and many methods have been practiced in order to restore soil purity but without reaching the expected outcome. An innovative, straightforward and low-cost method is the phytoremediation technology, in which is used the ability of specific plants in order to remove, degrade, metabolize, or immobilize a wide range of contaminants.

The aim of this study is to explore the correlation between a series of heavy metals and a series of plants regarding the level of tolerance of the plants affected by the specific heavy metals. The experiment took place in a greenhouse with controlled water supply and were treated three types of plants : *Lactuca sativa* (lettuce), which represents the horticulture, *Portulaca oleracea* (purslane), which is a Mediterranean and endemic specie of Greece and *Pelarginium zonale* (geranium), which represents the ornamental plants. The plants where grown in two types of soil. The one was heavy-metal free (control) and the other was collected from an industrial area and contained an amount of the studied heavy metals. Because the amount of heavy metals contained in the second type of soil wasn't adequate for carrying out the experiment, an additional quantity of each heavy metal was inputted in the soil in two doses during the experiment. After the laboratory analysis, the results showed that, although there were no phenomenal impacts on the plants, all the three types of plants had notable concentrations of the inputted contaminants on their tissues. Furthermore, this graduate thesis proposes the phytoremediation method as a green and economic technology for the extract of heavy metals from contaminated soils as well as an alternative use of these common plants, apart from consuming, that could offer both environmental and economic benefits.

Phytoremediation, Contaminatedsoils

Εγώ, η Παπαθεοδώρου Σοφία - Άρτεμις, είμαι ο συγγραφέας αυτής της Μ.Δ.Ε. Αυτή η Μ.Δ.Ε. αντικατοπτρίζει την έρευνα που έγινε από εμένα και δεν έχει υποβληθεί (εξ ολοκλήρου ή μέρος της) σαν Μ.Δ.Ε. ή ως μέρος Διδακτορικής Διατριβής σε αυτό ή άλλο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Ιδρυμάτων Τριτοβάθμιας Εκπαίδευσης του εσωτερικού ή εξωτερικού. Όποια συνεργασία καθώς και το μέγεθος αυτής δηλώνονται επακριβώς στο αντίστοιχο πεδίο αυτής της διατριβής. Επίσης έχω διαβάσει όλες τις βιβλιογραφικές αναφορές που παρατίθενται στο τέλος.

Ως επιβλέπων της έρευνας που περιγράφεται σε αυτή τη διατριβή, δηλώνω ότι όλοι οι όροι του Εσωτερικού Κανονισμού του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος έχουν τηρηθεί από την κα Παπαθεοδώρου Σοφία – Άρτεμις.

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| 1. Εισαγωγή | 1 |
| 1.1. Βαρέα Μέταλλα | 1 |
| 1.1.1. Ορισμοί..... | 1 |
| 1.1.2. Πηγές | 1 |
| 1.1.3. Ρύπανση..... | 2 |
| 1.1.4. Βαρέα Μέταλλα στον ελληνικό χώρο..... | 3 |
| 1.1.5. Καταπόνηση φυτών | 4 |
| 1.2. Φυτοαποκατάσταση..... | 5 |
| 1.3. Βαρέα Μέταλλα στο πείραμα | 6 |
| 1.3.1. Ψευδάργυρος (Zn) | 6 |
| 1.3.2. Κάδμιο (Cd)..... | 6 |
| 1.3.3. Μόλυβδος (Pb) | 7 |
| 1.4. Φυτικά είδη στο πείραμα | 7 |
| 1.4.1. Μαρούλι (<i>Lactucasativa</i>) | 7 |
| 1.4.2. Γλιστρίδα (<i>Portulacaoleracea</i>) | 8 |
| 1.4.3. Γεράνι (<i>Pelargoniumzonale</i>) | 8 |
| 1.5. Στόχοι εργασίας | 9 |
| 2. Υλικά και Μέθοδοι | 9 |
| 2.1. Πειραματικός Σχεδιασμός | 9 |
| 2.2. Μέθοδοι Ανάλυσης Εδάφους..... | 10 |
| 2.2.1. Προετοιμασία δείγματος εδάφους..... | 10 |
| 2.2.2. Μέτρηση pH..... | 11 |
| 2.2.3. Μέτρηση οργανικής ουσίας..... | 11 |
| 2.2.4. Μέτρηση διαθέσιμων ιχνοστοιχείων..... | 11 |
| 2.2.5. Ολικές συγκεντρώσεις ιχνοστοιχείων με βασιλικό νερό..... | 12 |
| 2.3. Φυτοκομικές μέθοδοι ανάλυσης..... | 12 |
| 2.3.1. Ανάπτυξη φυτών..... | 12 |
| 2.3.2. Μετρήσεις μορφολογικών χαρακτηριστικών..... | 12 |
| 2.4. Στατιστική Επεξεργασία..... | 13 |
| 3. Αποτελέσματα και Συζήτηση | 13 |
| 4. Συμπεράσματα | 21 |

| | |
|-----------------------|----|
| 5. Βιβλιογραφία | 22 |
| 6. Παράρτημα..... | 25 |

Λίστα Πινάκων

| | |
|---|----|
| Πίνακας 1. Προέλευση κυριότερων ρυπογόνων μετάλλων (πηγή: Κωστοπούλου, 2007). | 1 |
| Πίνακας 2. Εύρος συγκεντρώσεων και οριακές τιμές στο έδαφος ορισμένων τοξικών μετάλλων (πηγή: Gardea-Torresdeyetal., 2005). | 2 |
| Πίνακας 3. Εκπομπές ρύπων λόγω παραγωγικών διαδικασιών (πηγή: Καμινάρη, 1994). | 3 |
| Πίνακας 4. Παράγοντες καταπόνησης φυτών (πηγή: Καραμπουρνιώτης, 2003). | 4 |
| Πίνακας 5. Εύρος συγκεντρώσεων και οριακές τιμές στο έδαφος τοξικών μετάλλων (πηγή: Μανουσάκη, 2008). | 5 |
| Πίνακας 6. Παραδείγματα υπερσυσσωρευτών (πηγή: Pletsch, 2004, Qadir et al., 2004). | 6 |
| Πίνακας 7. Αναλύσεις χαρακτηρισμού των δύο εδαφών που μελετήσαμε. | |
| Πίνακας 8. Μέταλλα του εκχυλίζονται με DTPA και <i>aquaregia</i> στις μεταχειρίσεις του πειράματος. Η σημαντικότητα (“Sign.”) δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 | 7 |
| Πίνακας 9. Ξηρή ουσία των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος. Η σημαντικότητα (“Sign.”) δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 | 8 |
| Πίνακας 10a. Συντελεστής μεταφοράς μετάλλων (transfercoefficient, TC) από το έδαφος στο φυτικό ιστό στα δυο υπό μελέτη εδάφη (σύγκριση μεταξύ εδαφών). Η σημαντικότητα (“Sign.”) δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 | 9 |
| Πίνακας 10b. Συντελεστής μεταφοράς (transfercoefficient, TC) των μετάλλων (σύγκριση μεταξύ φυτών και μετάλλων). | 9 |
| Πίνακας 11a. Συντελεστής μετακίνησης ρίζα-υπέργειο μετάλλων (translocationfactor, TF) (σύγκριση μεταξύ εδαφών). Η σημαντικότητα (“Sign.”) δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^{-3} | 10 |

| | |
|--|----|
| Πίνακας 11b. Συντελεστής μετακίνησης ρίζα-υπέργειο μετάλλων (translocation factor, TF) (σύγκριση μεταξύ μετάλλων και φυτών)..... | 10 |
| Πίνακας 12a. Δείκτης μόλυνσης φυτών (plant pollution index , PPI) του Zn (PPI_{Zn}), του Cd (PPI_{Cd}), και του Pb (PPI_{Pb}), όπως επίσης και ο PPI τριών μετάλλων (PPI_{3M}) στα δύο εδάφη που μελετώνται (σύγκριση μεταξύ εδαφών). Η σημαντικότητα (“Sign.”) δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 | 11 |
| Πίνακας 12b. Δείκτης μόλυνσης φυτών (plant pollution index , PPI) του Zn (PPI_{Zn}), του Cd (PPI_{Cd}), και του Pb (PPI_{Pb}), όπως επίσης και ο PPI τριών μετάλλων (PPI_{3M}) στα δύο εδάφη που μελετώνται (σύγκριση μεταξύ μετάλλων και φυτών). | 11 |
| Πίνακας 13. Δείκτης φόρτου μόλυνσης (metal pollution load index, PLI) των μετάλλων. Η σημαντικότητα (“Sign.”) δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 | 12 |
| Πίνακας 14a. Συντελεστές συσχέτισης, R^2 , της ξηρής ουσίας μέρους των φυτών σε σχέση με τις συγκεντρώσεις μετάλλων στο μαρούλι. | 13 |
| Πίνακας 14b. Συντελεστές συσχέτισης, R^2 , της ξηρής ουσίας μέρους των φυτών σε σχέση με τις συγκεντρώσεις μετάλλων στη γλιστρίδα. | 13 |
| Πίνακας 14c. Συντελεστές συσχέτισης, R^2 , της ξηρής ουσίας μέρους των φυτών σε σχέση με τις συγκεντρώσεις μετάλλων στο γεράνι. | 13 |
| Πίνακας 15. Μήκος βλαστών των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος. Η σημαντικότητα (“Sign.”) δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 | 14 |
| Πίνακας 16. Πάχος φύλλων των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος. Οι ομάδες είναι χωρισμένες με βάση την ηλικία φύλλων, κατά αύξουσα ηλικία: ομάδα 1 < ομάδα 2 < ομάδα 3 < ομάδα 4 < ομάδα 5. Η σημαντικότητα (“Sign.”) δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 | 15 |

Πίνακας 17. Ξηρό βάρος των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος. Οι ομάδες είναι χωρισμένες με βάση την ηλικία φύλλων, αύξουσα ηλικία: ομάδα1< ομάδα 2<ομάδα 3< ομάδα 4< ομάδα 5. Η σημαντικότητα (“Sign.”) δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^318

Πίνακας 18. Ποσοστό ξηρού βάρους επί του νωπού βάρους των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος. Οι ομάδες είναι χωρισμένες με βάση την ηλικία φύλλων, αύξουσα ηλικία: ομάδα1< ομάδα 2< ομάδα 3< ομάδα 4< ομάδα 5. Η σημαντικότητα (“Sign.”) δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^319

Πίνακας 19. Εμβαδό των φύλλων των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος. Οι ομάδες είναι χωρισμένες με βάση την ηλικία φύλλων, αύξουσα ηλικία: ομάδα1< ομάδα 2< ομάδα 3< ομάδα 4< ομάδα 5. Η σημαντικότητα (“Sign.”) δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^320

Πίνακας 20. Πίνακας 20. Οι τιμές δείκτη SPAD παρουσιάζουν τη συγκέντρωση της ολικής χλωροφύλλης των φύλλων των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος. Οι ομάδες είναι χωρισμένες με βάση την ηλικία φύλλων, αύξουσα ηλικία: ομάδα1< ομάδα 2< ομάδα 3< ομάδα 4< ομάδα 5. Η σημαντικότητα (“Sign.”) δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 21

Πίνακας 21. Ο λόγος της ρίζας προς υπέργειο (Root/Shoot) των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος. Η σημαντικότητα (“Sign.”) δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^322

Πίνακας 22. Ειδική μάζα του φύλλου (LeafSpecificMass), ή δείκτης ξηροφιλίας, των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος. Ο δείκτης υπολογίζεται ως ο λόγος του ξηρού βάρους φύλλου προς το εμβαδό του φύλλου. Η σημαντικότητα (“Sign.”) δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^323

Λίστα Σχημάτων

- Σχήμα 1. Τα βέλτιστα όρια ανάπτυξης ενός φυτικού οργανισμού και η εμφάνιση συμπτωμάτων καταπόνησης όταν αυξάνεται ή ελαττώνεται πέραν ορισμένων ορίων η ένταση του παράγοντα καταπόνησης (πηγή: Καραμπουρνιώτης, 2003).26
- Σχήμα 2. Καμπύλη πρόσληψης μεταλλικών στοιχείων, απαραίτητων και μη (πηγή: Baker and Walker 1990).27
- Σχήμα 3. Σχέση μεταξύ μετάλλων εκχυλισμένων με *aquaregia* και DTPA για (a) Zn, (b) Cd, και (c) Pb για όλα τα δεδομένα του πειράματος μαζί.28
- Σχήμα 4. Σχέση μεταξύ μετάλλων εκχυλισμένων με *aquaregia* στο έδαφος και συγκέντρωσης μετάλλων στην υπέργεια (ανοιχτά σημεία) και την υπόγεια (κλειστά σημεία) βιομάζα, και σχέση μεταξύ μετάλλων εκχυλισμένων με DTPA στο έδαφος και συγκέντρωσης μετάλλων στην υπέργεια (ανοιχτά σημεία) και την υπόγεια (κλειστά σημεία) βιομάζα. Οι διακεκομμένες γραμμές τάσεις αφορούν στην υπόγεια βιομάζα, ενώ οι συνεχείς γραμμές αφορούν στην υπέργεια βιομάζα.29
- Σχήμα 5. Σχέση μεταξύ συντελεστών μεταφοράς μετάλλων (transfercoefficient, TC_S) από το έδαφος στο φυτικό ιστό και συγκεντρώσεις Zn, Cd και Pb στο *aquaregia*...30
- Σχήμα 6. Σχέση μεταξύ συντελεστών μεταφοράς μετάλλων (transfercoefficient, TC_S) από το έδαφος στο φυτικό ιστό και συγκεντρώσεων σε *aquaregia* για (a) μαρούλι, (b) γλιστρίδα, (c) γεράνι.31
- Σχήμα 7. Σχέση μεταξύ παράγοντα μετατόπισης μετάλλων (TF) από τη ρίζα στο βλαστό και συγκεντρώσεων σε *aquaregia* για (a) μαρούλι, (b) γλιστρίδα, (c) γεράνι.32
- Σχήμα 8. Σχέση μεταξύ του *plantpollutionindex* καθενός μετάλλου χωριστά με το *plantpollutionindex* και των τριών μετάλλων μαζί και για τα 3 φυτά μαζί. Η διακεκομμένη είναι η γραμμή τάσης του Pb, η σταθερή είναι η γραμμή τάσης του Zn, και η αχνή είναι η γραμμή τάσης του Cd.33

Λίστα Εικόνων

- Εικόνα 1: Μαρούλι στο αρχικό στάδιο ανάπτυξης. Αριστερά είναι τα φυτά μάρτυρες και δεξιά είναι τα φυτά σε επιμολυσμένο έδαφος.34
- Εικόνα 2: Γλιστρίδα στο αρχικό στάδιο ανάπτυξης. Αριστερά είναι τα φυτά μάρτυρες και δεξιά είναι τα φυτά σε επιμολυσμένο έδαφος.35
- Εικόνα 3: Γεράνι στο αρχικό στάδιο ανάπτυξης. Αριστερά είναι τα φυτά μάρτυρες και δεξιά είναι τα φυτά σε επιμολυσμένο έδαφος.36
- Εικόνα 4: Μαρούλι, γλιστρίδα, γεράνι στα αρχικά στάδια ανάπτυξης.37
- Εικόνα 5: Μαρούλι στο τελικό στάδιο ανάπτυξης. Αριστερά είναι τα φυτά μάρτυρες και δεξιά είναι τα φυτά σε επιμολυσμένο έδαφος.38
- Εικόνα 6: Γλιστρίδα στο τελικό στάδιο ανάπτυξης. Αριστερά είναι τα φυτά μάρτυρες και δεξιά είναι τα φυτά σε επιμολυσμένο έδαφος.39
- Εικόνα 7: Γεράνι στο τελικό στάδιο ανάπτυξης. Αριστερά είναι τα φυτά μάρτυρες και δεξιά είναι τα φυτά σε επιμολυσμένο έδαφος.40
- Εικόνα 8: Μαρούλι, γλιστρίδα, γεράνι στο τελικό στάδιο ανάπτυξης.41

1. Εισαγωγή

1.1. Βαρέα μέταλλα

1.1.1. Ορισμοί

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλοί ορισμοί για τα βαρέα μέταλλα. Βαρέα μέταλλα χαρακτηρίζονται τα στοιχεία με ατομικό βάρος μεταξύ 63,54 και 200,59 και με ειδικό βάρος μεγαλύτερο των 4g/cm^3 , ενώ σύμφωνα με άλλους πρόκειται για μια ομάδα στοιχείων με ατομική πυκνότητα μεγαλύτερη του 6g/cm^3 (Μανουσάκη, 2008). Ο Lasat (2000) ορίζει ως βαρύ μέταλλο οποιοδήποτε χημικό στοιχείο το οποίο διαθέτει μεταλλικές ιδιότητες και έχει ατομικό αριθμό μεγαλύτερο του 20 (Μπλάνας, 2013, Μανουσάκη 2008). Επίσης, σύμφωνα με μια άλλη εκδοχή, τα βαρέα μέταλλα αναφέρονται σ' ένα τύπο χημικών στοιχείων τα οποία είναι τοξικά, ιδιαίτερα τοξικά ή δηλητηριώδη σε χαμηλές συγκεντρώσεις (Κουϊμτζής κ.σ., 1998). Προσφάτως έχει προσδιοριστεί ένας νέος όρος που παραπέμπει στις επιβλαβείς ιδιότητες αυτών των στοιχείων και αναφέρεται στα βαρέα μέταλλα ως εν «δυνάμη τοξικά στοιχεία». Καθώς λοιπόν δεν υπάρχει συμφωνία για τον ορισμό των βαρέων μετάλλων πιθανά πιο ορθός όρος θα ήταν ο όρος «τοξικά μέταλλα» (Μανουσάκη, 2008).

1.1.2. Πηγές

Σύμφωνα με την Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (USEPA), η λίστα μετάλλων - ρυπαντών περιλαμβάνει 13 μέταλλα (Ag, As, Be, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, και Zn), τα οποία προέρχονται από φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές (Μεγαδούκα, 2011).

Φυσικές πηγές

Προερχόμενα από

- Τη γεωχημεία του φλοιού της γης (ηφαιστειακές εκρήξεις)
- Την αποσάθρωση των μητρικών πετρωμάτων
- Τις ατμοσφαιρικές αποθέσεις

(Μπλάνας, 2013)

Ανθρωπογενείς πηγές

- Γεωργία (φωσφορικά λιπάσματα, ζιζανιοκτόνα, εντομοκτόνα)
- Η ιλύς προερχόμενη από το βιολογικό καθαρισμό των πόλεων και βιομηχανιών
- Παραγωγή ενέργειας
- Εξόρυξη και χύτευση ορυκτών
- Δευτερογενής παραγωγή μετάλλων και εργασίες ανακύκλωσης
- Αστικά και βιομηχανικά συγκροτήματα (απορρίμματα, αστικά και βιομηχανικά λύματα)
- Καύσεις μηχανών (βενζίνη, πετρέλαιο, καθώς και λιπαντικά και καταλύτες αυτοκινήτων)
- Η τέλεια και ατελής καύση φυσικών (ορυκτών) και συνθετικών καυσίμων
- Η λειτουργία χημικών βιομηχανιών, βιομηχανιών επιμετάλλωσης και χρωμάτων
- Η μη ελεγχόμενη απόθεση αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων ως και απορριμμάτων πόλεων
- Η χρήση πυρομαχικών σε περιόδους πολέμου, αλλά και σε περιπτώσεις στρατιωτικών ασκήσεων

(Μανουσακη, 2008, Κωστοπούλου, 2007)

1.1.3. Ρύπανση

Τα βαρέα μέταλλα έχουν μεγάλη βιολογική σημασία γιατί όταν βρίσκονται σε χαμηλές συγκεντρώσεις ορισμένα από αυτά είναι απαραίτητα για τους ζωντανούς οργανισμούς, είτε για την ανάπτυξη των φυτών (Cu, Mn, Zn), είτε για την ανάπτυξη των ζώων (Co, Cr, Se). Τα απαραίτητα μέταλλα έχουν μία ποικιλία λειτουργιών στα βιολογικά συστήματα, που κυμαίνονται από ρυθμιστές βιολογικών διαδικασιών έως σημαντικά δομικά συστατικά των πρωτεϊνών. Παρόλα αυτά, όταν τα παραπάνω στοιχεία συναντώνται σε υψηλές συγκεντρώσεις προκαλούν τοξικότητα στους ζωντανούς οργανισμούς (Borovik, 1990). Βασική ιδιότητα των βαρέων μετάλλων είναι ότι δεν αποδομούνται, όπως οι οργανικές ενώσεις, και βιοσυσσωρεύονται, δηλαδή μπορούν να παραμείνουν στο περιβάλλον και στα διάφορα μέρη της τροφικής αλυσίδας σε αυξανόμενες συγκεντρώσεις και για μεγάλο χρονικό διάστημα (Κουϊμπτζής κ.σ., 1998). Αυτός είναι ένας από τους βασικούς λόγους για τον οποίο θεωρούνται τα βαρέα μέταλλα επικίνδυνοι ρύποι. Η τοξικότητα των μετάλλων στο έδαφος εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη βιοδιαθεσιμότητά τους, δηλαδή την ικανότητά τους να μεταφέρονται από το έδαφος σε ένα ζωντανό οργανισμό. Η

βιοδιαθεσιμότητα των μετάλλων επηρεάζεται από την ολική συγκέντρωση τους στο έδαφος, από φυσικο-χημικούς και βιολογικούς παράγοντες, καθώς και από τη μορφή στην οποία αυτά βρίσκονται. (Κωστοπούλου, 2007, Ανθουσάκη, 2009). Στον Πίνακα 2 δίνονται οι οριακές τιμές των βαρέων μετάλλων στο έδαφος που ισχύουν στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στην Ελλάδα.

1.1.4. Βαρέα μέταλλα στον ελληνικό χώρο

Έχει καταγραφεί ένας αριθμός ρυπασμένων περιοχών με βαρέα μέταλλα, των οποίων η ρύπανση προέρχεται από βιομηχανικές, μεταλλουργικές δραστηριότητες και από χώρους διάθεσης αστικών απορριμμάτων, εγκαταλελειμμένους ή μη, οι οποίοι λειτουργούσαν με ελάχιστο ή καθόλου έλεγχο περιβαλλοντικής προστασίας. Επιβαρυνμένες περιοχές αποτελούν κυρίως οι βιομηχανικές περιοχές της Αθήνας (Θριάσιο Πεδίο και Οινόφυτα), της Θεσσαλονίκης, του Βόλου και της Καβάλας οι οποίες χαρακτηρίζονται από βιομηχανική δραστηριότητα και μεγάλη αστική ανάπτυξη. Επιπλέον, ιδιαίτερη ρύπανση παρουσιάζουν περιοχές που βρίσκονται κοντά σε ορυχεία διαφόρων μετάλλων, όπως τα εγκαταλελειμμένα ορυχεία του Λαυρίου, της Θάσου και της Ερμιόνης και τα ορυχεία της Κασσάνδρας στην Βόρεια Ελλάδα τα οποία βρίσκονται ακόμα σε λειτουργία (Μανουσάκη, 2008). Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή της Ελευσίνας, τόπο λήψης εδαφικού δείγματος για τη διεξαγωγή αυτού του πειράματος, δραστηριοποιούνται μερικές από τις μεγαλύτερες βιομηχανίες της χώρας, όπως τα διυλιστήρια πετρελαίου ΕΛ.ΔΑ. και Πετρόλα, οι χαλυβουργίες Χαλυβουργία Ελλάδος και Χαλυβουργική, οι τσιμεντοβιομηχανίες Τιτάν και Χάλυψ και μια βιομηχανία πυρομαχικών, καθώς και πλήθος άλλων εργοστασίων, βιομηχανιών, βιοτεχνιών και ναυπηγείων (Δήμος Ελευσίνας, 2012). Επομένως η συγκεκριμένη περιοχή γίνεται αποδέκτης πλήθους ρύπων προερχόμενων από βιομηχανικά και βιοτεχνικά απόβλητα, απόβλητα ναυπηγείων, διαλυτήρια πλοίων και στραγγίσματα Χώρων Ταφής Απορριμμάτων (Βάββας κ.σ., 2009). Στον Πίνακα 1 και Πίνακα 3 δίνονται οι πηγές των κυριότερων ρυπογόνων μετάλλων λόγω των παραγωγικών διαδικασιών, για εγκαταστάσεις που περιβάλλουν την περιοχή της Ελευσίνας.

1.1.5. Καταπόνηση φυτών

Τα φυτά, κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, αντιμετωπίζουν συχνά αντίξοες συνθήκες, οι οποίες τα καταπονούν και επηρεάζουν δυσμενώς την ανάπτυξή τους (Σχήμα 1). Διαταραχές στην ανάπτυξη της βιομάζας του φυτού, στο ρυθμό αφομοίωσης CO₂ ή θρεπτικών συστατικών αποτελούν χαρακτηριστικά σημάδια καταπόνησης (Μπλάνας, 2013, Μανουσάκη, 2008). Οι καταπονήσεις διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις βιοτικές καταπονήσεις που προκαλούνται από άλλους οργανισμούς και τις αβιοτικές ή φυσικοχημικές καταπονήσεις που προκαλούνται από ένα πλεόνασμα ή μία έλλειψη στο φυσικό ή χημικό περιβάλλον (Πίνακας 4) (Μανουσάκη, 2008, Καραμπουρνιώτης, 2003). Κάποια βαρέα μέταλλα, όπως ο χαλκός, το κοβάλτιο και ο ψευδάργυρος, σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις, αποτελούν θρεπτικά στοιχεία είναι απαραίτητα για την ομαλή ανάπτυξη των φυτών. Υπάρχουν όμως και άλλα βαρέα μέταλλα, όπως ο μόλυβδος, το κάδμιο, ο υδράργυρος και το αρσενικό, τα οποία είναι άχρηστα για τα φυτά και μπορεί να προκαλέσουν φυτοτοξικότητα (Κωστοπούλου, 2007, Καραμπουρνιώτης, 2003, Μανουσάκη 2008). Η περίσσεια των στοιχείων στα φυτά μπορεί να προκαλέσει προβλήματα σε πληθώρα βασικών λειτουργιών, όπως αλλαγές σε βιοχημικές και φυσιολογικές διαδικασίες, αλλαγές σε επίπεδο οργάνων ή και ολόκληρου του φυτού, όπως είναι η αναστολή της ανάπτυξης, η μείωση της απόδοσης ή η βλάβη των φύλλων, έως αλλαγές σε επίπεδο φυτοκοινωνίας (Κωστοπούλου, 2007).

Πιο συγκεκριμένα, οι μηχανισμοί τοξικότητας των μεταλλικών ιόντων μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις γενικές κατηγορίες. Τα μεταλλικά ιόντα:

1. Αντικαθιστούν άλλα, απαραίτητα μεταλλικά ιόντα από τις βιολογικά λειτουργικές μονάδες.
2. Εμποδίζουν απαραίτητες λειτουργικές ομάδες, συμπεριλαμβανομένων των ενζύμων και των πολυνουκλεοτιδίων.
3. Μεταβάλλουν και διαταράσσουν την ενεργή δομή βιομορίων, κυρίως ενζύμων και πολυνουκλεοτιδίων. (Κωστοπούλου, 2007)

Οι παραπάνω μηχανισμοί τοξικότητας προκαλούν μεταβολικές δυσλειτουργίες στα φυτά, με χαρακτηριστικά συμπτώματα την παρεμπόδιση της μεταφοράς ηλεκτρονίων κατά τη διάρκεια της αναπνοής και της φωτοσύνθεσης και προκαλούν μειωμένη ανάπτυξη του φυτού και την παρεμπόδιση της δραστηριότητας σημαντικών ενζύμων (Καραμπουρνιώτης κ.σ., 2012).

Παρά το γεγονός ότι η σχετική τοξικότητα των διαφόρων μετάλλων ποικίλλει ανάλογα με το γενότυπο και τις συνθήκες που επικρατούν, τα μέταλλα που θεωρούνται ως τοξικότερα για τα ανώτερα φυτά όταν βρίσκονται σε μεγάλες συγκεντρώσεις είναι ο Hg, ο Cu, το Ni, ο Pb, Co και το Cd και πιθανόν και τα Ag, Be και Sn (Κωστοπούλου, 2007).

1.2. Φυτοαποκατάσταση

Η προσαρμογή των φυτών στις καταπονήσεις του περιβάλλοντος περιλαμβάνει πολύπλοκους μηχανισμούς. Τα περισσότερα φυτά δεν είναι ανθεκτικά στα βαρέα μέταλλα. Υπάρχουν όμως κάποια φυτά που παρουσιάζουν ανθεκτικότητα και έχουν αναπτύξει μηχανισμούς αντίστασης και ανθεκτικότητας με τους οποίους αποκλείουν τα βαρέα μέταλλα από το να εισέλθουν στους ιστούς τους. Τα φυτά που αναπτύσσουν μηχανισμούς αντίστασης δεν έχουν ανθεκτικά κύτταρα σε υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, γεγονός που τα καθιστά το ίδιο ευαίσθητα με τα μη ανθεκτικά φυτά. Επομένως, τα τοξικά μεταλλικά ιόντα είτε δεσμεύονται και εξουδετερώνονται στο περιβάλλον της ριζόσφαιρας των φυτών αυτών από χηλικές ενώσεις (κυρίως με οργανικά οξέα, όπως 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 (Καραμπουρνιώτης, 2003, Κωστοπούλου, 2007, Ashrafetal, 2010). Από την άλλη, τα φυτά που αναπτύσσουν μηχανισμούς ανθεκτικότητας έχουν την ικανότητα να αναπτύσσονται σε επιβαρυμένα εδάφη και να συσσωρεύουν στους ιστούς τους βαρέα μέταλλα σε εξαιρετικά υψηλές συγκεντρώσεις (Καραμπουρνιώτης, 2003). Τα φυτά αυτά, ονομάζονται υπερσυσσωρευτές και χαρακτηριστικό τους στοιχείο είναι ότι μπορεί να περιέχουν έως 1000 μg/g ξηρού βάρους Ni, Cu, Cr, Pb, As ή 10000 μg/g ξηρού βάρους Zn και Mn (Ashrafetal, 2010, Κωστοπούλου, 2007), καθώς και ότι μπορούν να συγκεντρώσουν βαρέα μέταλλα στους βλαστούς τους από 10-500 φορές περισσότερο από το κανονικό, χωρίς να παρουσιάσουν συμπτώματα τοξικότητας (Ashrafetal, 2010). Μερικοί ερευνητές προτείνουν ότι για να θεωρηθεί ένα φυτικό είδος ικανό να υπερσυσσωρεύσει βαρέα μέταλλα θα πρέπει ο λόγος της συγκέντρωσης των μετάλλων στους βλαστούς και τα φύλλα

προς τη συγκέντρωσή τους στις ρίζες να είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα (Baghour et al. 2001). Οι αντιδράσεις των φυτών στην αυξημένη συγκέντρωση των μετάλλων οδηγούν στη δημιουργία χαρακτηριστικών καμπύλων αντίδρασης, οι φάσεις των οποίων αντιστοιχούν στο εύρος της έλλειψης, της αντοχής και της τοξικότητας (Σχήμα 2). Για τα μη απαραίτητα στα φυτά στοιχεία υπάρχουν μόνο οι φάσεις της αντοχής και της τοξικότητας (Κωστοπούλου, 2007).

1.3. Βαρέα Μέταλλα στο πείραμα

Τα βαρέα μέταλλα που μελετήθηκαν για την επίδρασή τους στα φυτά, είναι ο ψευδάργυρος (Zn), κάδμιο (Cd) και ο μόλυβδος (Pb).

1.3.1. Ψευδάργυρος (Zn)

Ο ψευδάργυρος αποτελεί ένα από τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία για την ανάπτυξη των φυτών, καθώς παίζει πρωταρχικό ρόλο σε βασικές κυτταρικές λειτουργίες, όπως είναι ο μεταβολισμός των πρωτεϊνών, η γονιδιακή έκφραση, η δομική και λειτουργική ακεραιότητα των βιομεμβρανών, η φωτοσύνθεση κ.α.. Σε υψηλές συγκεντρώσεις, όμως, είναι τοξικός για τα φυτά. Για να προκαλέσει τοξικότητα στα φυτά, ο ανιχνεύσιμος στο έδαφος ψευδάργυρος θα πρέπει να έχει συγκέντρωση μεγαλύτερη από ένα εύρος τιμών 150–300 mg/kg. Όταν ο ψευδάργυρος βρίσκεται σε υψηλές συγκεντρώσεις, μπορεί να προκαλέσει στο φυτό αναστολή της αύξησης, της ανάπτυξης και του μεταβολισμού. Η τοξικότητα ψευδαργύρου εκδηλώνεται με μείωση της ανάπτυξης του φυτού, τόσο του ριζικού συστήματος, όσο και του υπέργειου μέρους, καθώς και με σημάδια πρόωρης γήρανσης. Μπορεί να προκαλέσει, ακόμα, χλώρωση στα νεαρά και στη συνέχεια στα ωριμότερα φύλλα. Τέλος, χαρακτηριστικό σύμπτωμα της τοξικότητας ψευδαργύρου είναι η εμφάνιση πορφυροκόκκινης απόχρωσης στα φύλλα εξαιτίας της ανεπάρκειας φωσφόρου. Η μέση συγκέντρωση του στο έδαφος κυμαίνεται από 1-900 mg/kg, ενώ στα φύλλα το φυσιολογικό εύρος συγκέντρωσης του είναι 27-150 mg/kg με τοξικά επίπεδα μεταξύ 100 και 400 mg/kg (Πίνακας 5) (Κωστοπούλου, 2007, Μεγαδουκα 2011, Kabata-Pendias, 1992).

1.3.2. Κάδμιο (Cd)

Το κάδμιο θεωρείται ένας από τους πιο επικίνδυνους ρύπους, λόγω της υψηλής τοξικότητας του και της υψηλής διαλυτότητας του στο νερό. Επιπλέον, παρόλο που δεν αποτελεί απαραίτητο στοιχείο για την επιβίωση των φυτών, λαμβάνεται εύκολα από τις ρίζες και μεταφέρεται στα φύλλα σε πολλά φυτικά είδη. Η τοξικότητα του καδμίου στα φυτά μπορεί να κλείσιμο των στομάτων, να αναστείλει τη βιοσύνθεση της χλωροφύλλης, μειωμένη πρόσληψη Fe, Zn, Cu και Mn και άλλων θρεπτικών, μείωση της διαπνοής και γενικότερη αναστολή της αύξησης των φυτών. Χαρακτηριστικά συμπτώματα της τοξικότητας του καδμίου είναι η χλώρωση και η μείωση της αύξησης και βιομάζας. Η μέση συγκέντρωση του στο έδαφος είναι λιγότερο από 1mg/kg, ενώ στα φύλλα το φυσιολογικό εύρος συγκέντρωσης του είναι 0,05-0,2 mg/kg με τοξικά επίπεδα μεταξύ 5 και 30 mg/kg (Πίνακας 5) (Ashraf et al., 2010, Κωστοπούλου, 2007, Gardea-Torresdey et al., 2005, Μεγαδούκα, 2011, Μπλάνας, 2013).

1.3.3. Μόλυβδος (Pb)

Ο μόλυβδος δεν αποτελεί απαραίτητο στοιχείο για την επιβίωση των φυτών. Σε σύγκριση με το κάδμιο, η φυτοτοξικότητα του μολύβδου είναι σχετικά χαμηλή λόγω της χαμηλής διαθεσιμότητας και πρόσληψης του από το έδαφος και τα εδαφικά διάλυμα. Εντούτοις, οι ρίζες των φυτών είναι συνήθως ικανές να προσλάβουν και να συσσωρεύσουν μεγάλες ποσότητες Pb^{2+} από το έδαφος αλλά η μεταφορά του στα υπέργεια τμήματα είναι σχετικά περιορισμένη. Η τοξικότητα από το μόλυβδο συνδέεται με διαταραχή των κυττάρων και της κυτταρικής διαίρεσης, παρεμπόδιση της φωτοσύνθεσης και της αναπνοής, παρεμπόδιση της ενζυμικής δραστηριότητας, ανταγωνισμό με θρεπτικά συστατικά, εμφάνιση χλώρωσης, μείωση της επιμήκυνσης και διείδυσης της ρίζας στο έδαφος και γενικότερα αναστολή της αύξησης και μείωση της βιομάζας. Στα φύλλα των φυτών το φυσιολογικό εύρος συγκέντρωσης του μετάλλου είναι 5-10 mg/kg ενώ συγκεντρώσεις μεταξύ 30 και 300 mg/kg θεωρούνται τοξικές για τα φυτά (Πίνακας 5) (Κωστοπούλου, 2007, Μεγαδούκα, 2011).

1.4. Φυτικά είδη στο πείραμα

Για το συγκεκριμένο πείραμα επιλέχθηκαν τρία είδη φυτών, το μαρούλι (*Lactuca sativa*), η γλιστρίδα (*Portulaca oleracea*) και το γεράνι (*Pelargonium zonale*).

1.4.1. Μαρούλι (*Lactucasativa*)

Το μαρούλι που καλλιεργήθηκε στο πείραμα είναι ποικιλία Κως ή Ρωμάννα (Cos ή Romaine). Είναι φυτό γρήγορης ανάπτυξης και ευδοκιμεί σχεδόν σε όλη την Ελλάδα. Ανήκει στην οικογένεια Σύνθετα (Compositae) της τάξης Αστερώδη (Asterales). Είναι φυτό ετήσιο και πώδες και η καλλιέργειά του γίνεται με σπορά. Η ρίζα του είναι πασσαλώδης, φτάνοντας σε μήκος το μισό μέτρο, και τα φύλλα του είναι ανοιχτού ή σκούρου πράσινου χρώματος και φύονται απευθείας από τον κοντό και χοντρό βλαστό του. Αναπτύσσεται σε διάφορους τύπους εδαφών, με καλύτερη ανάπτυξη όμως στα γόνιμα εδάφη. Σύμφωνα με διάφορες ερευνητικές μελέτες, το μαρούλι, παρότι έχει σχετικά μικρή βιομάζα και κύκλο ζωής, είναι αρκετά αποτελεσματικό στη βιοσυσσώρευση διαφόρων μετάλλων που βρίσκονται το έδαφος (Rodriguesetal, 2010, Guntuzetal, 2012, Mgangaetal, 2011).

1.4.2. Γλιστρίδα (*Portulacaoleracea*)

Η γλιστρίδα είναι φυτό με μεγάλη εξάπλωση και μπορεί να βρεθεί σε οποιοδήποτε μέρος του ελλαδικού χώρου. Είναι πώδες και μονοετές ζιζάνιο με μέσο ύψος 40 εκατοστά και ανήκει στην οικογένεια Πορτουλακοειδή (Portulacaceae), της τάξης Καρυοφυλλώδη (Caryophyllales). Αναπτύσσεται σε όλα τα εδάφη, ιδίως στα άγονα και είναι εξαιρετικά ανθεκτική στην ξηρασία και σε ασθένειες. Το φυτό ανθίζει και καρποφορεί σε όλη τη διάρκεια της ανάπτυξής του. Με βάση πειραματικά αποτελέσματα, η γλιστρίδα παρόλο που και αυτή έχει μικρή βιομάζα και κύκλο ζωής, σημειώνει σημαντική βιοσυσσώρευση των βαρέων μετάλλων του εδάφους (Tiwarietal, 2008, Chamietal, 2013).

1.4.3. Γεράνι (*Pelargoniumzonale*)

Το γεράνι αποτελεί ένα από τα πιο αντιπροσωπευτικά, κυρίως καλλωπιστικά, φυτά της Ελλάδας. Λόγω της μεγάλης ανθεκτικότητας του σε διάφορες κλιματικές συνθήκες, της προσαρμοστικότητάς του σχεδόν σε όλους τους τύπους εδαφών και των ελάχιστων απαιτήσεων του σε νερό καθίσταται πολύ καλή επιλογή ως καλλιέργεια. Είναι πώδες, πολυετές, φυτό ικανό να αναπτυχθεί σε οποιοδήποτε συνθήκες, τόσο εδαφολογικές, όσο και κλιματικές. Μπορεί να αντεπεξέλθει σε υψηλές θερμοκρασίες, έχοντας μικρές απαιτήσεις σε εδαφική υγρασία. Ανήκει στην οικογένεια Γερανιοειδή (Geraniaceae) της τάξης Γερανιώδη (Geraniales). Για συγγενικά του είδη έχει εξεταστεί πειραματικά η

ικανότητά τους να προσλαμβάνουν βαρέα μέταλλα από το έδαφος και πειραματικά αποτελέσματα υποστηρίζουν την δυνατότητά του για ικανοποιητική βιοσυσσώρευση (Arshadetal 2008,Danetal 2000).

1.5. Στόχοι εργασίας

Σκοποί της εργασίας ήταν:

(α) Να καλλιεργήσουμε τρία είδη φυτών, ένα βρώσιμο λαχανικό, ένα ζιζάνιο και ένα καλλωπιστικό (μαρούλι, γλιστρίδα και γεράνι, αντίστοιχα) σε ένα ρυπασμένο με βαρέα μέταλλα έδαφος και σε ένα μη-ρυπασμένο έδαφος, και να συγκρίνουμε την αντίδρασή τους στα δύο αυτά εδάφη.

(β) Να αξιολογίσουμε αν κάποιο από αυτά τα φυτά αναπτύσσει μηχανισμούς βιοσυσσώρευσης ή αποκλεισμού βαρέων μετάλλων.

2. Υλικά και Μέθοδοι

2.1. Πειραματικός σχεδιασμός

Το πειραματικό κομμάτι της εργασίας αποτελείται από εργαστηριακές αναλύσεις του εδαφικού δείγματος, όπως λήφθηκε από την περιοχή της Ελευσίνας, την εγκατάσταση των φυτών και τέλος την εργαστηριακή ανάλυση του φυτικού ιστού, αφού έχει ολοκληρώσει την ανάπτυξή του, και του τελικού εδαφικού δείγματος. Στο συγκεκριμένο πείραμα έγινε χρήση δύο διαφορετικών εδαφών, ενός μάρτυρα που λήφθηκε από την περιοχή του Πανεπιστημιακού Αγροκτήματος στο Βελεστίνο και ενός ρυπασμένου εδάφους που λήφθηκε από την Ελευσίνα από σημείο που βρίσκεται πολύ κοντά σε βιομηχανική περιοχή. Στα εδάφη αυτά αναπτύχθηκαν τρία είδη φυτών, με δέκα επαναλήψεις κάθε φυτού στο κάθε έδαφος. Το μαρούλι και η γλιστρίδα αρχικά φυτεύτηκαν με σπόρο σε σπορεία και στη συνέχεια μεταφυτεύθηκαν και το γεράνι τοποθετήθηκε απευθείας στην τελική του θέση, αφού προήλθε από φυτώριο ήδη ανεπτυγμένο σε δίσκους μεταφύτευσης.

Αρχικά, έγινε δειγματοληψία εδάφους από την περιοχή της Ελευσίνας και από την περιοχή του Βελεστίνου. Το έδαφος αεροξηράνθηκε και στη συνέχεια αναλύθηκε εργαστηριακά για να μετρηθούν κάποιες χαρακτηριστικές φυσικοχημικές ιδιότητες: pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3), οργανική ουσία, κοκκομετρική σύσταση (άμμος,

άργυλος και ιλύς), και έγινε ανίχνευση του χρωμίου (Cr), νικελίου (Ni), χαλκού (Cu), ψευδαργύρου (Zn), καδμίου (Cd) και μολύβδου (Pb) σε DTPA (εκχυλίσμα, ως δείκτης βιοδιαθεσιμότητας) και aquaregia. Στη συνέχεια, σε σπορεία με τύρφη, φυτεύτηκαν σπόροι γλιστρίδας και μαρουλιού στις 10/5/14 και μετά την παρέλευση, περίπου, δεκαπέντε ημερών, αφού τα φυτά εκτιμήθηκε ότι ήταν στο κατάλληλο στάδιο ανάπτυξης, έγινε η μεταφύτευσή τους σε γλάστρες με μείγμα εδάφους Ελευσίνας ή Βελεστίνου με περλίτη. Με βάση την αρχική ανάλυση του εδάφους της Ελευσίνας, βρέθηκε ότι η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων δεν ήταν ικανοποιητική για τη διεξαγωγή του πειράματος. Επομένως, 6 ημέρες μετά τη μεταφύτευση, έγινε επιμόλυνση των φυτών που περιείχονταν στο εδαφικό δείγμα από την Ελευσίνα με ψευδάργυρο (Zn), κάδμιο (Cd) και μόλυβδο (Pb) (Σχήμα 2.1). Τα φυτά αναπτύχθηκαν σε θερμοκήπιο της Γεωπονικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για διάστημα εξηνταπέντε ημερών, κατά τη διάρκεια του οποίου οι γλάστρες ποτίζονταν τακτικά ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε φυτού. Τα φυτά κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής τους προσβλήθηκαν από ασθένειες και πιο συγκεκριμένα, το μαρούλι προσβλήθηκε από αλευρώδη, το οποίο αντιμετωπίστηκε με εφαρμογή σκόνης θείου στο φύλλωμά του και η γλιστρίδα προσβλήθηκε από αφίδες, που αντιμετωπίστηκε με χειρωνακτική εκκαθάριση των προσβεβλημένων φυτών. Οι προσβολές αντιμετωπίστηκαν αρκετά νωρίς και έτσι δεν επηρεάστηκε η μορφολογία των φυτών. Δέκα μέρες, περίπου, μετά την επιμόλυνση, ξεκίνησαν οι μετρήσεις στα μορφολογικά χαρακτηριστικά των φυτών, οι οποίες περιλάμβαναν μέτρηση μήκους – πλάτους φύλλων, μέτρηση πάχους φύλλων και μέτρηση χλωροφύλλης. Το κάθε πακέτο μετρήσεων επαναλαμβανόταν κάθε δέκα περίπου ημέρες, μέχρι την εξαγωγή των φυτών από τις γλάστρες. Όταν το μαρούλι και η γλιστρίδα διαπιστώθηκε ότι προσέγγιζαν στο τέλος του κύκλου ζωής τους, δηλαδή άρχισαν να σποριάζουν, ξεκίνησε η διαδικασία της συγκομιδής. Πριν κοπούν τα φυτά, έγιναν οι τελικές μετρήσεις σε χλωροφύλλη, σε μήκος – πλάτος φύλλων, έτσι ώστε να υπολογιστεί η φυλλική επιφάνεια, και σε πάχος φύλλων. Τα φυτά, στη συνέχεια, χωρίστηκαν σε υπόγειο και υπέργειο μέρος, αποξηράθηκαν και κονιορτοποιήθηκαν, έτσι ώστε να γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις για την ανίχνευση βαρέων μετάλλων. Παράλληλα, έγινε αποξήρανση δείγματος εδάφους από κάθε γλάστρα για να γίνει στη συνέχεια η χημική του ανάλυση, με σκοπό να ανιχνευθεί και να υπολογιστεί η ποσότητα των βαρέων μετάλλων στο έδαφος.

2.2. Μέθοδοι ανάλυσης εδάφους

2.2.1. Προετοιμασία δείγματος εδάφους

Το εδαφικό δείγμα μετά από την δειγματοληψία αεροξηράνθηκε για περίπου 5 μέρες. Στη συνέχεια τα δείγματα λειοτριβήθηκαν και κοσκινίστηκαν από κόσκινο διαμέτρου 2 mm. Τέλος αποθηκεύτηκαν έως ότου να γίνει η ανάλυσή τους.

2.2.2. Μέτρηση pH

Για την μέτρηση pH ζυγίστηκαν 10g εδαφικού δείγματος, 25 mL απιονισμένο H₂O και έγινε ανακίνηση για 30 λεπτά σε φυαλίδια τύπου falcon των 50mL. Στη συνέχεια, το δείγμα παρέμεινε σε κατάσταση ηρεμίας για ½ της ώρας πριν να γίνει η μέτρηση με το πεχάμετρο.

2.2.3. Μέτρηση οργανικής ουσίας (με υγρή οξειδωση)

Σε κωνική φιάλη των 500mL τοποθετήθηκε 0,5 g δείγματος και προστέθηκαν 10 mL διχρωμικό κάλιο 0.166 M K₂Cr₂O₇, με σκοπό την οξείδωση – αποικοδόμηση της οργανικής ουσίας. Στη συνέχεια προστέθηκαν 10 mL πυκνόθειικό οξύ. Το διάλυμα παρέμεινε σε ηρεμία για 30 λεπτά με μία ώρα ώστε να γίνει η οξείδωση της οργανικής ουσίας του εδάφους. Έπειτα προστέθηκαν 200 mL απιονισμένο νερό για την αραιώση του διαλύματος, 10 mL πυκνό φωσφορικό οξύ (H₃PO₄) και 5-6 σταγόνες διφαινυλαμίνης ώστε το δείγμα να χρωματιστεί καφέ. Κατόπιν ογκομετρήθηκε με επτα-ένυδροθειικό σίδηρο 0,5 M (FeSO₄·7H₂O) μέχρι να αναπτυχθεί σκούρο πράσινο χρώμα. Η διαδικασία έγινε και για το λευκό δείγμα για την τιτλοδότηση του διαλύματος ογκομέτρησης. Ο οργανικός άνθρακας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$OC \% = 0.195 \times [(mL \text{ ογκομέτρησης λευκού} - mL \text{ ογκομέτρησης δείγματος}) / g \text{ δείγματος εδάφους}]$$

Η οργανική ουσία υπολογίζεται ως εξής $OM \% = OC / 0.58$ γιατί θεωρούμε ότι το C αποτελεί το 58% της οργανικής ουσίας

2.2.4. Μέτρηση διαθέσιμων ιχνοστοιχείων (εκχύλιση με DTPA)

Το διάλυμα DTPA (diethylo-triamino-pentaphosphoricacid, διαίθυλο-τριαμινο-πενταφωσφορικό οξύ) παρασκευάζεται με την ανάμιξη 9,835 gDTPA, 7,4 gCaCl₂·2H₂O και 74.5 g τριαιθανολαμίνης σε 5 L H₂O. Το pH του διαλύματος ρυθμίζεται στην τιμή 7,3 με λίγες σταγόνες HCl. Για την εκχύλιση ζυγίστηκαν 10 g εδαφικού δείγματος σε φιάλη τύπου falcon των 30 mL και προστέθηκαν με 20 mL διαλύματος DTPA. Ακολούθησε ανακίνηση για 2 ώρες, φυγοκέντρηση και διήθηση του αιωρήματος για την παραλαβή του διαυγούς. Το εκχύλισμα κατόπιν μετρήθηκε σε ατομική απορρόφηση για ιχνοστοιχεία. Οι υπολογισμοί γίνονται με τον ακόλουθο τύπο:

$M = (\text{mL διαλύματος εκχύλισης}) * A/B \text{ mgkg}^{-1} \text{ εδάφους}$

Όπου M είναι τα ιχνοστοιχεία που εκχυλίζονται (Fe, Ni, Mn, Zn, Cu κτλ.), A η συγκέντρωση (mgL^{-1}) που μετρείται στην ατομική απορρόφηση, και B το βάρος του εδάφους σε g.

2.2.5. Ολικές συγκεντρώσεις ιχνοστοιχείων με βασιλικό νερό

Σε σωλήνα πέψης των 250 mL ζυγίστηκε 1 g εδάφους (κοσκινισμένο από κόσκινο των 250 μm). Προστέθηκαν 15 mL πυκνό HCl και 5 mL πυκνό HNO₃ σε απαγωγό αερίων. Τα δείγματα παρέμειναν σε ηρεμία σε θερμοκρασία δωματίου για 16 ώρες, έτσι ώστε τα οξέα να εισχωρήσουν σε όλους τους πόρους του εδάφους και να διευκολυνθεί η διαλυτοποίηση των ορυκτών του εδάφους. Την επόμενη μέρα θερμάνθηκε το block πέψης στους 50 °C για μια ώρα και στη συνέχεια στους 140 °C για 3 ώρες. Αφού κρυώσαν τα δείγματα, έγινε διήθηση του περιεχόμενου των σωλήνων πέψης με απιονισμένο νερό σε ογκομετρικές φιάλες των 1000mL. Το εκχύλισμα αυτό μετρήθηκε σε ατομική απορρόφηση για ιχνοστοιχεία. Οι υπολογισμοί γίνονται με τον ακόλουθο τύπο:

$M (\text{mgkg}^{-1} \text{ εδάφους}) = (\text{mL ογκομετρικής φιάλης όπου έγινε η διήθηση}) * A/B$

Όπου M είναι τα ιχνοστοιχεία, A η συγκέντρωση (mgL^{-1}) που λαμβάνεται στην ατομική απορρόφηση, και B το βάρος του εδάφους σε g.

2.3. Φυτοκομικές μέθοδοι ανάλυσης

2.3.1. Ανάπτυξη φυτών

Τα φυτά του μαρουλιού και της γλιστρίδας αρχικά φυτεύθηκαν με σπόρο σε σπορείο και στη συνέχεια, όταν έφτασαν σε επιθυμητό στάδιο ανάπτυξης, μεταφυτεύθηκαν σε γλάστρες. Τα φυτά του γερανιού τα λάβαμε ανεπτυγμένα από φυτώριο και τα μεταφυτεύσαμε στις τελικές τους θέσεις. Τα φυτά του πειράματος αναπτύχθηκαν σε θερμοκήπιο του Πανεπιστημίου με ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας και το πότισμα γινόταν ανάλογα με τις ανάγκες τους.

2.3.2. Μετρήσεις μορφολογικών χαρακτηριστικών

Μετά την επιμόλυνση των φυτών με βαρέα μέταλλα ξεκίνησαν οι μετρήσεις των μορφολογικών χαρακτηριστικών των φυτών, οι οποίες περιελάμβαναν τη μέτρηση του μήκους και του πλάτους των φύλλων των φυτών, τη μέτρηση του πάχους των φυτών και τη μέτρηση της χλωροφύλλης και επαναλαμβάνονταν ανά διάστημα δέκα ημερών. Η μέτρηση του μήκους και του πλάτους των φύλλων των φυτών έγινε με χάρακα κλίμακας χιλιοστών και μετρήθηκε το μέγιστο μήκος και το μέγιστο πλάτος κάθε φύλλου κάθε φυτού. Η μέτρηση του πάχους των φύλλων έγινε με τη βοήθεια του παχύμετρου με εύρος μετρήσεων

0,01-10 mm. Τέλος, η μέτρηση της χλωροφύλλης έγινε επί του φύλλου με το όργανο μέτρησης χλωροφύλλης SPAD. Στο τέλος της ανάπτυξης των φυτών και λίγο πριν την εξαγωγή τους από τις γλάστρες έγιναν οι τελικές μετρήσεις των παραπάνω χαρακτηριστικών. Στη συνέχεια, έγινε η εξαγωγή των φυτών και ο διαχωρισμός του σε υπέργειο και υπόγειο μέρος, καθώς και ο διαχωρισμός των φύλλων σε ηλικιακές ομάδες. Τα φύλλα στη συνέχεια επεξεργάστηκαν νωπά με σαρωτή έτσι ώστε να μετρηθεί η φυλλική τους επιφάνεια.

Το φυτικό υλικό, αφού καθαρίστηκε επιμελώς, τοποθετήθηκε σε χάρτινες σακούλες και σε φούρνο στους 70 °C μέχρι τη μη περαιτέρω απώλεια βάρους, και κονιοροτοποιήθηκε σε μύλο άλεσης. Το κονιοροποιημένο δείγμα, τοποθετήθηκε σε πλαστικές σακούλες και αποθηκεύτηκε για τις εκχυλίσεις. Η διαδικασία της εκχύλισης με αποτέφρωση γίνεται για να μετρηθούν όλα τα μη πτητικά συστατικά (πτητικά είναι μεταξύ άλλων ο C και το N). Η διαδικασία αποτέφρωσης του φυτικού ιστού έχει ως σκοπό την καταστροφή της οργανικής ουσίας των φυτικών ιστών. Για την καύση λήφθηκαν 0,5 g από τον κονιοροποιημένο φυτικό ιστό τα οποία τοποθετήθηκαν σε χωνευτήρια πορσελάνης για να καεί σε φούρνο σε θερμοκρασία 500 °C για 4 ώρες. Αφού κρυώσαν οι κάψες αποτέφρωσης, έγινε η παραλαβή της τέφρας του φυτικού ιστού με 20 mL 20% HCl και διηθήθηκε σε ογκομετρικές φιάλες των 50mL. Το εκχύλισμα αυτό θα χρησιμοποιηθηκε για τη μέτρηση των ιχνοστοιχείων.

2.4. Στατιστική επεξεργασία δεδομένων

Σε όλες οι σειρές δεδομένων έγινε με ανάλυση της παραλλακτικότητας (ANOVA). Στα δεδομένα που μετρήσαμε μία φορά έγινε one-wayANOVA παράγοντα τις 5 μεταχειρίσεις, ενώ στα δεδομένα που μετρήσαμε δύο φορές στο χρόνο διεξάγαμε two-wayANOVA με παράγοντα τις 5 μεταχειρίσεις και δεύτερο παράγοντα το χρόνο. Σε όλες τις σειρές δεδομένων πραγματοποιήθηκε και το multiplerangetest με σκοπό την καταγραφή των διαφορών μεταξύ παρατηρήσεων. Η στατιστική επεξεργασία έγινε με τα στατιστικά πακέτα Statgraphics 2.1 (one-wayANOVA) και SPSS (two-wayANOVA).

3. Αποτελέσματα και Συζήτηση

Με βάση τις αναλύσεις DTPA και aquaregiaπου έγιναν και στα δύο εδαφικά δείγματα (έδαφοςΑ, Βελεστίνου, και έδαφος Β, Ελευσίνας) για κάθε μια φυτική μεταχείριση, τα οποία λήφθηκαν μετά την ολοκλήρωση του κύκλου ζωής των φυτών του πειράματος, ανιχνεύθηκε ισχυρή παρουσία των μετάλλων (Zn, Pb και Cd) στο εδαφικό δείγμα του επιμολυσμένου εδάφους (έδαφοςΒ) για όλες τις φυτικές μεταχειρίσεις (Πίνακας 8). Πιο συγκεκριμένα, οι ολικές συγκεντρώσεις του ψευδαργύρου στο έδαφος όπου αναπτύχθηκε το μαρούλι, η γλιστρίδα και το γεράνι, ξεπερνούν κατά πολύ τις οριακές τιμές συγκέντρωσης (Πίνακας 2). Ενδεικτικά, οι μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις του Zn με βάση την οδηγία της Ε.Ε. 86/278/EC είναι 150-300 mg/kg, ενώ στο παρόν πείραμα οι τιμές που ανιχνεύθηκαν κυμαίνονται από 592,46 – 896.58 mg/kg. Το ίδιο συμβαίνει και με τις ολικές συγκεντρώσεις του καδμίου και στις τρεις μεταχειρίσεις, οι οποίες, όμως, παρουσιάζουν τις υψηλότερες

τιμές σε σχέση με τις ολικές συγκεντρώσεις των άλλων δύο μετάλλων. Η οριακή τιμή του Cd είναι 1-3 mg/kg, ενώ στο παρόν πείραμα οι τιμές που ανιχνεύθηκαν κυμαίνονται από 2.259 – 3.020 mg/kg. Τέλος, οι ανιχνεύσιμες τιμές του μολύβδου βρίσκονται μέσα στο επιτρεπτό όριο, το οποίο είναι 50-300 mg/kg και οι τιμές που ανιχνεύθηκαν κυμαίνονται από 170.74 – 198.50mg/kg. Μια ολοκληρωμένη εικόνα των εκχυλισμένων μετάλλων του πειράματος μας δίνει το **Σχήμα 3** όπου ο ψευδάργυρος σημειώνει την ισχυρότατη τάση σε σχέση με τα άλλα δύο μέταλλα. Ακολουθούν το κάδμιο και ο μολύβδος με αρκετά ισχυρές τάσεις.

Στο **Σχήμα 4** απεικονίζεται γραφικά η σχέση μεταξύ μετάλλων εκχυλισμένων με *aquaregia* στο έδαφος και συγκέντρωσης μετάλλων στην υπέργεια και την υπόγεια βιομάζα, και σχέση μεταξύ μετάλλων εκχυλισμένων με DTPA στο έδαφος και συγκέντρωσης μετάλλων στην υπέργεια και την υπόγεια βιομάζα. Ο ψευδάργυρος τόσο στο *aquaregia*, όσο και στο DTPA παρουσιάζει ισχυρότατη συσχέτιση τόσο με το υπόγειο όσο και με το υπέργειο τμήμα των φυτών, γεγονός που υποδεικνύει ότι ο ψευδάργυρος έχει απορροφηθεί σημαντικά και από τα δύο μέρη των φυτών. Το κάδμιο στην ανάλυση *aquaregia* παρουσιάζει ισχυρή συσχέτιση μόνο με την υπόγεια βιομάζα, δηλαδή φαίνεται να απορροφάται μόνο από το υπόγειο μέρος των φυτών, ενώ στην ανάλυση DTPA σημειώνει σχετικά ισχυρή συσχέτιση μόνο με το υπέργειο μέρος των φυτών. Τέλος, ο μολύβδος στην ανάλυση *aquaregia* παρουσιάζει ισχυρή συσχέτιση με το υπόγειο μέρος των φυτών και λιγότερο ισχυρή συσχέτιση με το υπέργειο μέρος, ενώ στην ανάλυση DTPA εμφανίζει συσχέτιση, όχι ιδιαίτερα ισχυρή, μόνο με το υπέργειο μέρος των φυτών. Ένας λόγος είναι ότι στην περίπτωση του Cd και του Pb κάποιες επαναλήψεις από τις 10 ανά μεταχείριση δεν μετρήθηκαν, λόγω έλλειψης επαρκούς ποσότητας φυτικού ιστού.

Υπολογίζοντας την ξηρή ουσία των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος, παρατηρείται σημαντική μείωση στην ξηρή ουσία του βλαστού του μαρουλιού στα φυτά που αναπτύχθηκαν στο επιμολυσμένο έδαφος (**Πίνακας 9**), ενώ στη γλιστρίδα δεν παρατηρείται κάποια σημαντική μεταβολή. Επίσης, μικρή αύξηση της ξηρής ουσίας παρουσιάζεται στα φύλλα των φυτών του γερανιού που καλλιεργήθηκαν στο επιμολυσμένο έδαφος.

Για να προσδιοριστεί η κινητικότητα των βαρέων μετάλλων από το έδαφος στο φυτικό ιστό και τη ρίζα των φυτών του πειράματος υπολογίστηκε ο συντελεστής μεταφοράς μετάλλων (transfercoefficient, $TC = A/B$, όπου $A =$ συγκέντρωση

μετάλλου στο φυτό σε mg/kg, και B = ολική συγκέντρωση μετάλλου στο έδαφος σε mg/kg). Πιο συγκεκριμένα, στο μαρούλι οι συντελεστές μεταφοράς και των τριών μετάλλων από το έδαφος στο φυτικό ιστό (TC) εμφανίζονται μειωμένοι στο επιμολυσμένο έδαφος σε σχέση με το έδαφος μάρτυρα (Πίνακας 10a, Πίνακας 10b). Ομοίως, υπάρχει η ίδια εξέλιξη με τους συντελεστές μεταφοράς του Zn, του Cd και του Pb στη γλιστρίδα και στο γεράνι. Στο Σχήμα 5 απεικονίζεται γραφικά η πτωτική τάση της μεταφοράς μετάλλων από το έδαφος στον φυτικό ιστό αυξανόμενης της συγκέντρωσης των μετάλλων στο έδαφος, όπου παρατηρούνται σημαντικές στατιστικές διαφορές στη μεταφορά και των τριών υπό μελέτη μετάλλων και πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 6 απεικονίζεται γραφικά η μεταφορά των τριών μετάλλων από το έδαφος σε κάθε φυτικό είδος. Αυτή η μείωση των τιμών των συντελεστών, παρόλο που δεν είναι αναμενόμενη, έχει παρατηρηθεί σε διάφορες πειραματικές μελέτες. Έχει παρατηρηθεί πως όταν υπάρχουν μεγάλες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στο έδαφος μειώνεται η απορρόφηση των μετάλλων από τα φυτά.

Με σκοπό να καταγραφεί η μετακίνηση των βαρέων μετάλλων στο φυτικό ιστό, χρησιμοποιείται ο παράγοντας μετακίνησης μετάλλων (translocation factor, $TF = A/B$, όπου A = η συγκέντρωση του μετάλλου στο υπέργειο μέρος του φυτού σε mg/kg, και B = η συγκέντρωση του μετάλλου στο υπόγειο μέρος του φυτού σε mg/kg), ο οποίος απεικονίζει την κίνηση των μετάλλων από τη ρίζα προς το βλαστό των φυτών. Στη σύγκριση που γίνεται μεταξύ εδαφών στον Πίνακα 11a και Πίνακα 11b ο παράγοντας μετακίνησης εμφανίζει μειωμένες τιμές στο επιμολυσμένο έδαφος (SoilB) και συγκεκριμένα μεγάλη σημαντικότητα παρουσιάζει η μετατόπιση του ψευδαργύρου και του μολύβδου στο μαρούλι. Μια λεπτομερή εικόνα της κίνησης των βαρέων μετάλλων μας δίνει Σχήμα 7 στο οποίο απεικονίζεται γραφικά η μετατόπιση των βαρέων μετάλλων από τη ρίζα στο βλαστό σε κάθε ένα από τα τρία φυτά. Στο μαρούλι και στη γλιστρίδα διαγράφεται πτωτική τάση της μετατόπισης των μετάλλων από τη ρίζα προς το βλαστό και σημειώνονται μικρές σημαντικά στατιστικές διαφορές. Στο γεράνι δεν παρουσιάζεται καμία σημαντική στατιστικά διαφορά. Το γεγονός ότι οι τιμές του παράγοντα μετακίνησης είναι χαμηλότερες στο επιμολυσμένο έδαφος, πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι τα φυτά αναπτύσσουν μηχανισμούς παρεμπόδισης της μετακίνησής τους.

Για το επίπεδο μόλυνσης του φυτού από βαρέα μέταλλα, χρησιμοποιείται ο δείκτης μόλυνσης του φυτού (PlantPollutionIndex, $PPI = 100 \cdot A/B$, όπου A = η συγκέντρωση του μετάλλου στο υπεργείο μέρος του φυτού στο παρόν πείραμα σε mg/kg, και B = η οριακή τιμή του μετάλλου σε mg/kg πάνω από την οποία σύμφωνα με την βιβλιογραφία υπάρχει κίνδυνος τοξικότητας. Αυτές οι τιμές ελήφθησαν ίσες με 120 για τον Zn, 0.5 για το Cd, και 10 για τον Pb). Στον Πίνακα 12α και Πίνακα 12β καταγράφεται ο δείκτης μόλυνσης φυτού για κάθε μέταλλο χωριστά σε κάθε φυτική μεταχείριση καθώς και για τα τρία μέταλλα μαζί. Στο μαρούλι ο PPI_{Zn} σημειώνει μεγάλη αύξηση (87.90) στο επιμολυσμένο έδαφος, ο PPI_{Cd} έχει τη μεγαλύτερη τιμή (332.23) και ο PPI_{Pb} (55.91) έχει και αυτός αυξημένη τιμή στο επιμολυσμένο έδαφος. Συνολικά ο PPI και για τα τρία μέταλλα σημειώνει μεγάλη αύξηση και παρουσιάζει σημαντικά στατιστικές διαφορές. Στη γλιστρίδα ο PPI_{Zn} (86.80) σημειώνει μεγάλη αύξηση στην τιμή του με μεγάλη σημαντικότητα, ο PPI_{Cd} (205.77) αυξάνεται χωρίς όμως κάποια σημαντικότητα και ο PPI_{Pb} (48.92) καθώς και ο συνολικός PPI (129.71) αυξάνονται αλλά με οριακή σημαντικότητα. Τέλος στο γεράνι, έχουμε αύξηση και στους τρεις δείκτες, με αυτόν του ψευδαργύρου και του μολύβδου να σημειώνουν τη μεγαλύτερη σημαντικότητα. Στο Σχήμα 8 περιγράφεται Σχέση μεταξύ του PPI καθενός μετάλλου χωριστά με το PPI και των τριών μετάλλων μαζί και για τα 3 φυτά μαζί. Ο PPI του καδμίου σημειώνει το μεγαλύτερο επίπεδο σημαντικότητας (υψηλότερο R^2 και χαμηλότερο p-value) και ακολουθούν οι δείκτες του ψευδαργύρου και του μολύβδου. Ουσιαστικά τα φυτά έχουν δεχθεί τη μεγαλύτερη μόλυνση από το κάδμιο σε σχέση με τα υπόλοιπα μέταλλα.

Με σκοπό να προσδιοριστεί με ακρίβεια ο βαθμός μόλυνσης των βαρέων μετάλλων στο έδαφος υπολογίζεται ο δείκτης φορτίου μόλυνσης (pollutionloadindex, $PLI = \sqrt[n]{\frac{A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n}{B_1 \cdot B_2 \cdot \dots \cdot B_n}}$, όπου A = η ολική συγκέντρωση ενός μετάλλου στο ρυπασμένο έδαφος σε mg/kg, και B = η ολική συγκέντρωση ενός μετάλλου στο μη-ρυπασμένο έδαφος σε mg/kg), η τιμή του οποίου όταν βρίσκεται κοντά στη μονάδα υποδεικνύει ότι οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων βρίσκονται μέσα στα επιτρεπόμενα όρια, ενώ όταν η τιμή του ξεπερνάει τη μονάδα, τότε υποδεικνύει ότι υπάρχει μόλυνση (Liu et al. 2005). Στον Πίνακα 13 παρουσιάζονται οι δείκτες φορτίου μόλυνσης των βαρέων μετάλλων για τα φυτικά είδη του πειράματος. Όλες οι τιμές κυμαίνονται πολύ πάνω από τη μονάδα, επομένως όλα τα φυτικά είδη παρουσιάζουν πρόβλημα μόλυνσης από τα βαρέα μέταλλα, με μεγάλη σημαντικότητα να παρουσιάζουν το μαρούλι και το γεράνι.

Στους Πίνακες 14a, 14b, 14c παρουσιάζεται η συσχέτιση της ξηράς ουσίας των φυτών με τις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στο μαρούλι, στη γλιστρίδα και στο γεράνι αντίστοιχα. Στο βλαστό του μαρουλιού (Πίνακας 14a) με βάση την ανάλυση DTPA σημειώνονται οριακά στατιστικές διαφορές στη συγκέντρωση του ψευδαργύρου και με βάση την ανάλυση aquaregia σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές στη συγκέντρωση του ψευδαργύρου και οριακά σημαντικές διαφορές στη συγκέντρωση του μολύβδου στο βλαστό. Στη γλιστρίδα (Πίνακας 14b) σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές μόνο στη συγκέντρωση του καδμίου στο βλαστό με βάση την ανάλυση DTPA. Τέλος, στο γεράνι (Πίνακας 14c), με βάση την ανάλυση DTPA, έχουμε στατιστικά σημαντικές διαφορές στη συγκέντρωση ψευδαργύρου στα φύλλα και με βάση την ανάλυση aquaregia οριακά στατιστικές διαφορές στη συγκέντρωση μολύβδου στα φύλλα.

Παρόλο που σημειώνεται μεγάλη συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων στα φυτά του πειράματος, δεν έχουν παρατηρηθεί σημαντικές μορφολογικές διαφορές στα φυσιολογικά τους χαρακτηριστικά σε όλα τα φυτικά είδη σε σχέση με το μάρτυρα. Πιο συγκεκριμένα, στον Πίνακα 15, παρουσιάζεται το μήκος του βλαστού (κεντρικών, πλάγιων και συνολικού) των φυτικών ειδών, όπου η μόνη διαφορά που παρατηρείται είναι στα φυτά της γλιστρίδας που καλλιεργήθηκαν σε επιμολυσμένο έδαφος, των οποίων οι πλάγιοι βλαστοί σημείωσαν μια αύξηση της τάξης του 37% περίπου. Στο έδαφος Β το μήκος πλαγίων βλαστών και συνολικό μήκος βλαστών της γλιστρίδας αυξήθηκαν σημαντικά σε σχέση με το ίδιο φυτό που αναπτύχθηκε στο έδαφος Α. Αυτό δείχνει ότι το φορτίο βαρέων μετάλλων μετέβαλε την αρχιτεκτονική αύξησης της κόμης του φυτού. Τα άλλα δύο φυτά δεν έδειξαν να έχουν διαφορές μεταξύ των εδαφών. Η αύξηση αυτή των πλαγίων βλαστών έρχεται σε συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα των Ameretal. (2012), στα οποία σημειώθηκε αύξηση του βλαστού των φυτών της γλιστρίδας.

Παρομοίως, μικρές διαφορές παρατηρούνται στην σύγκριση των φύλλων μεταξύ των φυτών που έχουν καλλιεργηθεί στο έδαφος μάρτυρα και στο επιμολυσμένο έδαφος (Πίνακας 16). Πιο συγκεκριμένα, στο μαρούλι σημειώνεται μείωση του πάχους των νεαρότερων φύλλων των φυτών που έχουν καλλιεργηθεί σε επιμολυσμένο έδαφος κατά 0.07mm και των γηραιότερων φύλλων κατά 0.07mm επίσης. Στη γλιστρίδα, μείωση του πάχους των φύλλων παρατηρείται στη μεσαία ηλικιακή ομάδα των

φύλλων κατά 0.13mm και επομένως και συνολικά στα φύλλα της γλιστρίδας κατά 0.1mm. Τέλος, στο γεράνι, σημειώνεται αύξηση του πάχους στα νεαρότερα φύλλα κατά 0.2mm, κάτι που σημαίνει ότι μια φυσιολογική αντίδραση στην καταπόνηση λόγω βαρέων μετάλλων είναι τα νεαρότερα φύλλα του γερανιού να καθίστανται παχύτερα.

Μελετώντας το ξηρό βάρος των φυτών, τα οποία είναι χωρισμένα με βάση τις ηλικιακές ομάδες των φύλλων, προκύπτουν κάποιες σημαντικές διαφορές(Πίνακας 17). Στο μαρούλι η μόνη στατιστικώς σημαντική μείωση του ξηρού βάρους στα φυτά που καλλιεργήθηκαν αφορά το βλαστό. Στη γλιστρίδα δεν παρατηρείται καμία σημαντική διαφοροποίηση του ξηρού βάρους των φυτών. Τέλος, στο γεράνι, σημειώνεται σημαντική αύξηση του ξηρού βάρους τόσο των νεαρών φύλλων όσο και των φύλλων μέσης ηλικίας, επομένως και του συνόλου των φύλλων του γερανιού, κάτι που επιβεβαιώνει τη φυσιολογική αντίδραση του φυτού που καταγράφηκε και με το πάχος των φύλλων.

Ένας αντιπροσωπευτικός δείκτης της περιεκτικότητας σε υγρασία στον φυτικό ιστό είναι το ποσοστό % ξηρού βάρους, το οποίο υπολογίζεται ως: $[(\text{νωπό βάρος} / \text{ξηρό βάρος}) \times 100]$ (Mantovani, 1998). Με βάση τον δείκτη αυτόν μπορούν να εντοπιστούν αλλαγές στην περιεχόμενη στον φυτικό ιστό υγρασία, οι οποίες θα μπορούσαν να προκληθούν από διάφορους παράγοντες καταπόνησης, όπως διαταραχές στην εξατμισοδιαπνοή (Mantovani, 1998). Στο παρόν πείραμα, σημαντικές μεταβολές αυτού του δείκτη εντοπίζονται μόνο στο γεράνι και πιο συγκεκριμένα στα νεαρά, στα γηραιότερα φύλλα, στον βλαστό και στο συνολικό υπέργειο τμήμα (Πίνακας 18). Ειδικότερα, στα γηραιότερα φύλλα και στον βλαστό, επομένως και στο σύνολο του υπέργειου μέρους, παρατηρείται μείωση της τιμής του δείκτη. Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται στη διαταραχή της περιεκτικότητας σε υγρασία των φύλλων και του βλαστού.

Το μέγεθος της φυλλικής επιφάνειας και ο αριθμός των φύλλων παίζουν καθοριστικό ρόλο στο ρυθμό της διαπνοής, της φωτοσύνθεσης, επομένως και στην ανάπτυξη του φυτού. Στον Πίνακα 19 παρουσιάζονται το συνολικό εμβαδόν της φυτικής επιφάνειας, ο αριθμός των φύλλων και η μέση επιφάνεια φύλλων στην κάθε ομάδα των φύλλων των φυτικών μεταχειρίσεων καθώς και στο σύνολο των φύλλων τους, και στα δύο υπό μελέτη εδάφη. Στο μαρούλι οι τιμές των παραπάνω μετρήσεων έχουν πολύ μικρές διαφορές μεταξύ τους

χωρίς να σημειώνουν καμία σημαντική διαφορά. Στη γλιστρίδα παρατηρείται αξιοσημείωτη αύξηση στις τιμές του συνολικού εμβαδού, του αριθμού των φύλλων και της μέσης επιφάνειας φύλλων στην ομάδα των γηρασμένων φύλλων στα φυτά που αναπτύχθηκαν σε επιμολυσμένο έδαφος. Τέλος, στο γεράνι έχουμε σημαντικές διαφορές στην ομάδα των ώριμων φύλλων καθώς και στο σύνολο των φύλλων, όπου οι τιμές των παραπάνω μετρήσεων παρουσιάζουν μεγάλη αύξηση για τα φυτά που καλλιεργήθηκαν στο επιμολυσμένο έδαφος.

Για να προσδιοριστούν τυχόν διαταραχές στην φωτοσύνθεση των φυτών, πρέπει να γίνει μέτρηση της χλωροφύλλης, η οποία αποτελεί δείκτη προσδιορισμού καταπόνησης των φυτών, συνάρτηση της φωτοσύνθεσης. Η μέτρηση της χλωροφύλλης γίνεται με την τιμή SPAD (soilplantanalysisdevelopment)(Orcenetal., 2013). Στον Πίνακα 20 δίνονται οι τιμές του δείκτη SPAD παρουσιάζουν τη συγκέντρωση της ολικής χλωροφύλλης των φύλλων των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος. Στο μαρούλι, στη γλιστρίδα και στο γεράνι σημειώνεται μικρή αύξηση των τιμών στο επιμολυσμένο έδαφος σε σχέση με αυτές του εδάφους μάρτυρα, χωρίς, όμως, σημαντικές στατιστικές διαφορές.

Ο λόγος της ρίζας προς υπέργειο (Root/Shoot) των φυτών αποτελεί ένα δείκτη της ανάπτυξης του φυτού. Πιο συγκεκριμένα, όταν η τιμή της ρίζας είναι μεγαλύτερη από την τιμή του υπέργειου σημαίνει ότι το ριζικό σύστημα του φυτού αναπτύσσεται καλύτερα και είναι αρκετά ανταγωνιστικό στη λήψη θρεπτικών στοιχείων, ενώ όταν η τιμή του υπέργειου είναι μεγαλύτερη από αυτήν της ρίζας σημαίνει ότι το φυτό έχει αυξημένους ρυθμούς φωτοσύνθεσης (Allaby, 1998). Στον Πίνακα 21 καταγράφονται οι τιμές του λόγου υπέργειο προς υπόγειο για τα τρία φυτά στα δύο καλλιεργούμενα εδάφη. Οι τιμές του λόγου για το μαρούλι και τη γλιστρίδα που έχουν καλλιεργηθεί στο επιμολυσμένο έδαφος δεν παρουσιάζουν καμία διαφορά. Επομένως, η επιμόλυνση με βαρέα μέταλλα δεν έχει επηρεάσει σημαντικά την ανάπτυξη των φυτών με βάση το λόγο υπέργειο προς υπόγειο.

Ειδική μάζα του φύλλου (LeafSpecificMass), ή δείκτης ξηροφιλίας, υπολογίζεται ως ο λόγος του ξηρού βάρους φύλλου προς το εμβαδό του φύλλου και αποτελεί έναν από τους βασικότερους δείκτες παραγωγής βιομάζας και διατήρησης των θρεπτικών στοιχείων του φυτού (Garnieretal., 2001). Στον Πίνακα 22 παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη ξηροφιλίας για τα τρία φυτικά είδη του πειράματος. Οι τιμές του δείκτη ξηροφιλίας για τα φυτά που

καλλιεργήθηκαν σε επιμολυσμένο έδαφος είναι ελαφρώς υψηλότερες από αυτές των φυτών του εδάφους μάρτυρα αλλά χωρίς να σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Με σκοπό να εξακριβωθεί η ακριβής ποσότητα των βαρέων μετάλλων στο επιμολυσμένο έδαφος, ανεξαρτήτως του φυτού στο οποίο καλλιεργήθηκε, μετρήθηκαν τα βαρέα μέταλλα και στις εξήντα μεταχειρίσεις. Με βάση τις αναλύσεις aquaregia ανιχνεύθηκε παρόμοια ποσότητα βαρέων μετάλλων και στα τρία φυτικά είδη. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις των μετάλλων στο έδαφος, οδήγησαν σε αυξημένες συγκεντρώσεις στα φυτά, όπου ανιχνεύθηκαν υψηλές συγκεντρώσεις του Zn και Cd και στα τρία φυτικά είδη στο επιμολυσμένο έδαφος. Το αποτέλεσμα αυτό συμφωνεί με πολλές παρόμοιες εργασίες (Xiao *et al.*, 2015). Η μόνη διαφορά είναι στο Cd στη γλιστρίδα και το γεράνι, όπου δεν παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές μεταξύ εδαφών.

Παρόλο που οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στο έδαφος και το φυτό ήταν υψηλότερες στο έδαφος B σε σύγκριση με το έδαφος A, για την μετακίνηση των μετάλλων παρατηρήθηκε πτωτική τάση στο έδαφος B σε σχέση με το έδαφος A. Αυτό υποδεικνύει αργότερη πρόσληψη μετάλλων σε αυξημένες συγκεντρώσεις μετάλλων στο έδαφος. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως «φαινόμενο διάλυσης», σύμφωνα με το οποίο το φυτό μπορεί να προσλαμβάνει ταχύτερα ένα στοιχείο όταν αυτό βρίσκεται σε μικρές συγκεντρώσεις στο έδαφος, και όσο η συγκέντρωση του στοιχείου αυξάνεται, τόσο η πρόσληψή του από το φυτό γίνεται πιο αργή (Sandras and Lemaire, 2014 for nutrient N, and Guo *et al.*, 2014, for heavy metals such as Zn, Cd, and Pb). Παρόλα αυτά, αυτή η τάση ήταν σημαντική μόνο για τον Zn στο μαρούλι και στο γεράνι. Στο έδαφος B η μετακίνηση του Cd ήταν σημαντικά υψηλότερη και στα τρία φυτά σε σύγκριση με τη μετακίνηση του Zn και στο έδαφος A η μετακίνηση του Cd ήταν υψηλότερη από τη μετακίνηση του Zn στο μαρούλι και στο γεράνι. Αυτό δηλώνει ότι το Cd μετακινείται ευκολότερα μέσα στο έδαφος και είναι ευκολότερα προσβάσιμο από το φυτό (Alvarez-Ayuso *et al.*, 2013). Και στα δύο εδάφη, οι τιμές του παράγοντα μετακίνησης του Cd ήταν παρόμοιες και για τα τρία φυτά και η μετακίνηση του Zn είχε τις ίδιες τάσεις, γεγονός που σημαίνει ότι τα υπό μελέτη φυτά συμπεριφέρθηκαν το ίδιο υπό την καταπόνηση από βαρέα μέταλλα.

Παρόλα αυτά, εντοπίστηκαν διαφορές στη συμπεριφορά των φυτών, συσχετίζοντας τις τιμές της μετακίνησης των μετάλλων με τις τιμές των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων στο έδαφος από την ανάλυση aquaregia. Με βάση το «φαινόμενο της διάλυσης» θα έπρεπε να αναμένεται μία πτωτική τάση. Για να ερμηνευθούν το Σχήμα 5 και Σχήμα 6 υπάρχουν δύο ενδεχόμενα:

Τα φυτά να αποκλείουν τα μέταλλα: όταν η τάση γίνεται όλο και πιο αρνητική, υποδεικνύει το υπό μελέτη φυτό διατηρεί σταθερή τη συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων, παρόλο που η συγκέντρωσή του αυξάνεται στο έδαφος.

Τα φυτά συσσωρεύουν τα μέταλλα: δημιουργείται μία τάση που τείνει προς το μηδέν, γεγονός που δείχνει ότι οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στο φυτό αυξάνονται. Εάν η τάση γίνει μηδενική, τότε η αύξηση των μετάλλων στο φυτό είναι αναλογική με την αύξηση των μετάλλων στο έδαφος. Σε αυτήν την περίπτωση τα φυτά συσσωρεύουν μέταλλα.

4. Συμπεράσματα

- Με βάση τα αποτελέσματα παρατηρείται μεγάλη συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων στο εδαφικό δείγμα, ειδικότερα του καδμίου. Αντιθέτως, οι ρυθμοί μεταφοράς και μετακίνησής τους μέσα στα φυτά είναι πολύ μικροί, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα φυτά αναπτύσσουν αμυντικούς μηχανισμούς στα βαρέα μέταλλα.
- Και τα τρία φυτικά είδη σημειώνουν μόλυνση από τα βαρέα μέταλλα σε μεγάλο βαθμό με το κάδμιο να εντοπίζεται σε σημαντική ποσότητα στον φυτικό τους ιστό. Στο μαρούλι και στο γεράνι η μείωση της ξηράς ουσίας του φυτικού ιστού δηλώνει ότι έχουν επηρεαστεί από τα βαρέα μέταλλα. Αντίθετα, στη γλιστρίδα, η ξηρά ουσία έχει μείνει αμετάβλητη και επιπλέον έχουν αυξηθεί οι πλάγιοι βλαστοί και το συνολικό της εμβαδόν, γεγονός που δηλώνει πως όχι μόνο δεν έχει επηρεαστεί αρνητικά από τα βαρέα μέταλλα, αλλά έχει ωφεληθεί στην ανάπτυξή της.

5. Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Allaby, M. (1998). *A Dictionary of Plant Sciences*. Oxford University Press, Oxford

Alvarez-Ayuso, E., Otones, V., Murciego, A., Garcia-Sanchez, A., Santa Regina, I. (2013). *Zinc, cadmium and thallium distribution in soils and plants of an area impacted by sphalerite-bearing mine wastes*. *Geoderma* 207-208, 25-34.

Amer, N., Al Chami, Z., Al Bitar, L., Mondelli, D., and Dumontet, S. (2012). *Evaluation of Atriplex Halimus, Medicago Lupulina and Portulaca Oleracea For Phytoremediation of Ni, Pb, and Zn*. *International Journal of Phytoremediation* 15, 498-512.

Arshad, M., Silvestre, J., Pinelli, E., Kallerhoff, J., Kaemmerer, M., Tarigo, A., Shahid, M., Guiresse, M., Pradere, P., and Dumat, C. (2008). *A field study of lead phytoextraction by various scented Pelargonium cultivars*. *Chemosphere* 71, 2187–2192.

Ashraf, M., Ozturk, M., and Ahmad, M.S.A. (2010). *Plant Adaption and Phytoremediation*. Springer, New York

Baghour, M., Moreno D.A., Villora, G., Hernández, J., Castilla, N., and Romero, L. (2001). *Phytoextraction of Cd and Pb and physiological effects in potato plants (Solanum tuberosum var. spunta): importance of root temperature*. *Food Chemistry* 49, 5356-5363.

Borovik, A.S. (1990). *Characterizations of metal ions in biological systems*. In: *Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects*. A. J. Shaw, Ed. CRC Press, Boca Raton, pp. 3-5.

Chami, Al Z., Amer, N., Al Bitar, L., Mondelli, D., and Dumontet, S. (2013). *Evaluation of three endemic Mediterranean plant species Atriplex halimus, Medicago lupulina and Portulaca oleracea for phytoremediation of Ni, Pb and Zn*. European Geosciences Union, General Assembly, Vienna, Austria, April 7 – 12 April 2013. *Geophysical Research Abstracts*, 15

Dan, T., KrishnaRaj S. and Saxena P. (2000). *Metal Tolerance of Scented Geranium*

(Pelargonium sp. 'Frensham'): Effects of Cadmium and Nickel on Chlorophyll Fluorescence Kinetics. *International Journal of Phytoremediation* 2, 91–104.

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 adsorption spectroscopy*. *Coord. Chem. Rev.* 249, 1797-1810.

Garnier, E., Shipley, B., Roumet, C., Laurent, G. (2001). *A standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content*. Functional Ecology 15, 688-695.

Gunduz, S., Uygur, N., F. and Kahramanoglu, I. (2012). *Heavy metal Phytoremediation potentials of Lepidum sativum L., Lactuca saliva L., Spinacia oleracea L. and Raphanus sativus L.* Herald Journal of Agriculture and Food Science Research. 1, 001 – 005.

Guo, J., Feng, R., Ding, Y., Wang, R. (2014). *Applying carbon dioxide, plant-growth promoting rhizobacterium and EDTA can enhance the phytoremediation efficiency of ryegrass in a soil polluted with zinc, arsenic, cadmium, and lead*. Journal of Environmental Management 141, 1-8.

Kabata -Pendias A., Dudka S., Chlopecka A. and Gawinowska T., 1992. *Background levels and environmental influences on trace metals in soil of the temperate humid zone of Europe*. In: Adriano D.C., Biochemistry of trace metals. Lewis Publications, Boca Raton, 19-60

Lasat, M.M. (2000). *Phytoextraction of metals from contaminated soil: a review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues*. Journal of Hazardous Substance Research 2, 1-25.

Liu, W., Zhao, J., Ouyang, Z., Soderlund, L., and Liu, G. (2005). *Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing, China*. Environmental international 31, 805-812.

Mganga, N., Manoko, MLK., and Rulangaranga, ZK. (2011). *Classification of Plants According to Their Heavy Metal Content Around North Mara Gold Mine, Tanzania: Implication For Phytoremediation*. Tanz. J. Sci. 37.

Orcen, N., Nazarian, G., and Gharibkhani, M. (2013). *The Responses of Stomatal Parameters and SPAD Value in Asian Tobacco Exposed to Chromium*. Pol. J. Environ. Stud. 22, 1441-1447.

Rodrigues, T.A., Abreu, C.H., Ferracciu, L.R., Borges, A.L. and Lee, Z. (2010). *Uptake of cadmium by lettuce in tropical contaminated soils*, 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia, August 1-6 2010.

Sandras, V.O., Lemaire, G. (2014). *Quantifying crop nitrogen status for comparisons of agronomic practices and genotypes*. Field Crops Research 164, 54-64.

Tiwari, K.K., Dwivedi, S., Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R.D., Singh, N.K., Chakraborty, S. (2008). *Phytoremediation efficiency of Portulaca tuberosa rox and Portulaca oleracea L. naturally growing in an industrial effluent irrigated area in Vadodra, Gujrat, India*. Environ Monit Assess 147, 15–22.

Thangavel, P., Shahira, A., and Subburam, V. (1999). *Interactive effects of selenium and mercury on the restoration potential of leaves of the medicinal plant, Portulaca oleracea Linn*. The Science of the Total Environment, 243/244, 1-8.

Xiao, R., Bai, I., Lu, Q., Zhao, Q., Gao, Z., Wen, X., Liu, X. (2015). *Fractionation, transfer, and ecological risks of heavy metals in riparian and ditch wetlands across a 100-year chronosequence of reclamation in an estuary of China*. *Science of the Total Environment* 517, 66-75.

Ελληνική βιβλιογραφία

Ανθουσάκη, Α. (2009). *Βιοδιαθεσιμότητα βαρέων μετάλλων σε εδάφη*. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Κρήτης, Χανιά, Κρήτη

Βάββας, Δ., Παπαδάτος, Π., Θεοχαράτος, Γ., Μαυράκη, Α., Χρηστίδης, Α. (2009). *Συγκεντρώσεις των διαλυμένων βαρέων μετάλλων στον κόλπο της Ελευσίνας*. 9^ο Πανελλήνιο Συμπόσιο Ωκεανογραφίας και Αλιείας 2009, Τόμος 1.

Δήμος Ελευσίνας. (2012). Τμήμα Περιβάλλοντος, Ανακύκλωσης και Πολιτικής Προστασίας, Ελευσίνα

Καραμπουρνιώτης, Γ.Α., (2003). *Φυσιολογία καταπονήσεων των φυτών*. 1η έκδοση, Εκδόσεις Έμβρυο, Αθήνα

Καραμπουρνιώτης, Γ.Α., Λιακόπουλος, Γ., και Νικολόπουλος, Δ. (2012). *Φυσιολογία καταπονήσεων των φυτών*. 3η έκδοση, Εκδόσεις Έμβρυο, Αθήνα

Κουϊμτζής, Θ., Φυτιάνος, Κ. και Σαμαρά-Κωνσταντινίδου, Κ. (1998). *Χημεία Περιβάλλοντος*. University Studio Press, Θεσσαλονίκη.

Κωστοπούλου, Π. (2007). *Οικοφυσικοί δείκτες αξιολόγησης παραγωγικής αποτελεσματικότητας λιβαδικών ειδών σε υποβαθμισμένα από βαρέα μέταλλα και ξηρασία περιβάλλοντα*. Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη

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

Μεγαδούκα, Δ. (2011). *Προσδιορισμός και στατιστική επεξεργασία βιοδιαθεσιμων*

βαρεων μεταλλων σε επιβαρουμενα εδαφη της περιοχης Βαρης – Κορωπιου. Συγκριση των αποτελεσματος με αντιστοιχα αλλης περιοχης της Αττικής. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα

Μπλάνας, Γ. (2013). *Φυτοεξυγίανση με το αλόφυτο *Limonium cornariatum* ρυπασμένων εδαφών με κάδμιο (Cd)*. Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Κρήτη

6. Παράρτημα

Πίνακας 1. Προέλευση κυριότερων ρυπογόνων μετάλλων (πηγή: Κωστοπούλου, 2007).

| Ανθρωπογενείς πηγές ρύπανσης του περιβάλλοντος με βαρέα μέταλλα | Σημαντικότερα μέταλλα |
|---|------------------------|
| <hr/> | |
| Αστικά και βιομηχανικά συγκροτήματα | |
| Απορρίμματα | Cd, Pb, Cu, Zn, Ni |
| Αστικά λύματα | Cd, Pb, Cu, Zn, Ni |
| Μεταλλεία | Zn, Pb, Cu, Cd, Ni |
| Χυτήρια | Zn, Cu, Cd, Pb, Sn, Ni |
| Υψικάμιντοι | Fe, Zn, Mn |
| Ηλεκτρόλυση | Hg |
| Βιομηχανία τσιμέντου | Tl |
| Καύση μηχανών | |
| Βενζίνη με μόλυβδο | Pb |
| Καταλύτες | Al |
| Εκπομπές από τα λάστιχα | Ni |
| Παραγωγή ενέργειας | |
| Καύση λιγνίτη | Se, B, Mn, Cd |
| Καύση πετρελαίου | V, Ni |
| Πυρηνικά εργοστάσια | U, Cs, Pu |
| Γραμμές υψηλής τάσεως | Cu, Zn |
| Γεωργία | |
| Πρόσθετα τροφών | Cu, Zn |
| Φωσφορικά λιπάσματα | Cd |
| Ζιζανιοκτόνα | Cu, Hg, As, Sn |

Πίνακας 2. Εύρος συγκεντρώσεων και οριακές τιμές στο έδαφος ορισμένων τοξικών μετάλλων (πηγή: Μανουσάκη 2008).

| Μέταλλο | Εύρος συγκεντρώσεων στο έδαφος (mg/kg) | Συγκέντρωση σε μεταλλοφόρα εδάφη (mg/kg) | Οριακές τιμές συγκέντρωσης (mg/kg) (πηγή:EU Directive 86/278/EC) |
|---------|--|--|---|
| Pb | 1.00-6900 | 3870-49910 | 50-300 |
| Cd | 1.1-345 | 11-317 | 1-3 |
| Cr | 0.05-3950 | 47-8450 | - |
| Hg | <0.01-1800 | 100-400 | 1-1.5 |
| Zn | 150-5000 | 109-70480 | 150-300 |

Πίνακας 3. Εκπομπές ρύπων λόγω παραγωγικών διαδικασιών (πηγή: Καμινάρη, 1994).

| | | | |
|--------------------------------|--------------------|----------------------|------------|
| Βιομηχανίες γεωργικών φαρμάκων | Pb, Zn | Τσιμεντοβιομηχανίες | Cr, Pb |
| Βιομηχανίες Σιδήρου και Χάλυβα | Cr, Pb, Zn, Mn, Fe | Υαλουργίες | Pb |
| Βιομηχανίες Χρωμάτων | Cr, Pb | Υφαντουργίες, Βαφεία | Cr |
| Διυλιστήρια πετρελαίου | Cr | Χαρτοβιομηχανίες | Cr, Pb, Zn |
| Ναυπηγεία, Διαλυτήρια πλοίων | Cr, Pb, Zn, Ni, Cu | Χημικές βιομηχανίες | Cr, Pb, Zn |
| | Cr, Pb, Zn, Mn, Fe | | |

Πίνακας 4. Παράγοντες καταπόνησης φυτών (πηγή: Καραμπουρνιώτης, 2003).

| Αβιοτικοί | | | Βιοτικοί |
|---|---|---|--|
| <i>Φυσικοί</i> | <i>Χημικοί</i> | <i>Ανθρωπογενείς</i> | |
| <u>Ορατή ακτινοβολία</u> Έλλειψη Περίσσεια UV-ακτινοβολία | <u>Θρεπτικά συστατικά</u> Έλλειψη Περίσσεια Μη ισορροπημένη σύσταση | Ρύπανση Φυτοφάρμακα Υποβάθμιση εδαφών Ιονίζουσες ακτινοβολίες Ηλεκτρομαγνητικά πεδία Πυρκαγιές | <u>Φυτά</u> Επικάλυψη Αλληλοπάθεια Παρασιτισμός |
| <u>Θερμοκρασία</u> Υπερθέρμανση Ψύχος Παγετός | <u>Αλατότητα</u> Βαρέα μέταλλα Όξινο pH Βασικό pH | | <u>Παθογόνα</u> Προσβολές ιών, μυκήτων, βακτηρίων |
| <u>Υδατικό περιβάλλον</u> Ξηρή ατμόσφαιρα Ξηρό έδαφος Κατάκλιση | <u>Αέριο περιβάλλον</u> Έλλειψη οξυγόνου Αλλαγές στη σύσταση της ατμόσφαιρας | | <u>Ζώα</u> Κατανάλωση Τραυματισμοί |
| <u>Μηχανική καταπόνηση</u> Άνεμος Κάλυψη Κάλυψη από χιόνι Σχηματισμός πάγου Τραυματισμοί | | | |

Πίνακας 5.Εύρος συγκεντρώσεων και οριακές τιμές τοξικών μετάλλων στο έδαφος και στα φύλλα (πηγή: Μανουσάκη, 2008).

| Μέταλλο | Φυσιολογικό εύρος στο έδαφος | Φυσιολογικό επίπεδο στα φύλλα | Τοξικό επίπεδο στα φύλλα |
|---------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Cd | 0.01-2 | 0.05-0.2 | 5-30 |
| Cr | 5-1500 | 0.1-0.5 | 5-30 |
| Cu | 2-250 | 5-30 | 20-100 |
| Hg | 0.01-0.5 | - | 1-3 |
| Ni | 2-750 | 0.1-5 | 10-100 |
| Pb | 2-300 | 5-10 | 30-300 |
| Zn | 1-900 | 27-150 | 100-400 |

Πίνακας 6. Παραδείγματα υπερσυσσωρευτών (πηγή: Pletsch, 2004, Qadir et al., 2004).

| Μέταλλο | Φυτό | Οικογένεια |
|-------------|---------------------------------|----------------|
| Κάδμιο | <i>Thlaspi caerulescens</i> | Brassicaceae |
| Κοβάλτιο | <i>Haumaniastrum robertii</i> | Lamiaceae |
| Μόλυβδος | <i>Thlaspi rotundifolium</i> | Brassicaceae |
| Μαγγάνιο | <i>Macadamia neurophylla</i> | Proteaceae |
| | <i>Maytenus bureaviana</i> | Celastraceae |
| Νικέλιο | <i>Alyssum bertolonii</i> | Brassicaceae |
| | <i>Phyllomedea coronate</i> | Rubiaceae |
| Ουράνιο | <i>Atriplex confertifolia</i> | Chenopodiaceae |
| Σελήνιο | <i>Astragalus recemosus</i> | Fabaceae |
| | <i>Lecythis ollaria</i> | Lecythidaceae |
| Χαλκός | <i>Haumaniastrum katangense</i> | Lamiaceae |
| Ψευδάργυρος | <i>Thlaspi caerulescens</i> | Brassicaceae |

Πίνακας 7. Αναλύσεις χαρακτηρισμού των δύο εδαφών που μελετήσαμε.

| | Έδαφος A | ΈδαφοςB |
|------------------------|-------------|---------|
| pH | 7.5 | 8,03 |
| EC, mScm ⁻¹ | 190 | 122 |
| CaCO ₃ , % | 10 | 11.5 |
| OC, % | 2 | 5,94 |
| Sand, % | 50 | 67 |
| Silt, % | 25 | 20 |
| Clay, % | 25 | 13 |

Πίνακας 8. Μέταλλα του εκχυλίζονται με DTPA και *aqua regia* στις μεταχειρίσεις του πειράματος. Η σημαντικότητα ("Sign.") δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 .

| | | DTPA | | | AR | | |
|----|-----------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| | | Soil A | Soil B | Sign. | Soil A | Soil B | Sign. |
| Zn | Μαρούλι | 5.47 | 29.36 | 0.0 | 54.29 | 896.58 | 0.0*** |
| | Γλιστρίδα | 4.46 | 21.94 | 0.2 | 57.74 | 592.46 | 0.1*** |
| | Γεράνι | 3.71 | 23.28 | 0.0 | 61.60 | 632.55 | 0.0*** |
| | Sign. | 468 | 169 | | 463 | 98.5 | |
| Cd | Μαρούλι | 0.064 | 0.373 | 0.3 | 0.626 | 3.020 | 0.0*** |
| | Γλιστρίδα | 0.065 | 0.534 | 0.4 | 0.735 | 2.766 | 0.2*** |
| | Γεράνι | 0.046 | 0.632 | 0.0 | 0.879 | 2.259 | 0.2*** |
| | Sign. | 2.53** | 177 | | 198 | 312 | |
| Pb | Μαρούλι | 5.82b | 39.31 | 19.5 | 12.49 | 198.50 | 0.0*** |
| | Γλιστρίδα | 5.67b | 43.14 | 0.0 | 13.12 | 195.21 | 0.0*** |
| | Γεράνι | 4.50a | 50.60 | 0.0 | 11.09 | 170.74 | 0.0*** |
| | Sign. | 11.4* | 632 | | 629 | 622 | |

*για τιμές σημαντικότητας $p=10-50 \times 10^3$

**για τιμές σημαντικότητας $p=1-10 \times 10^3$

***για τιμές σημαντικότητας $p<1 \times 10^3$

Πίνακας 9. Ξηρή ουσία των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος. Η σημαντικότητα ("Sign.") δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 .

| | | Εδ. Α | Εδ. Β | Sign. |
|-----------|-------------|-------|-------|--------|
| Μαρούλι | Φύλλα | 34.33 | 34.44 | 770 |
| | Βλαστός | 80.08 | 7.62 | 12.1** |
| | Σ(υπέργειο) | 42.50 | 42.07 | 400 |
| | Ρίζα | 11.41 | 10.75 | 206 |
| | Σ(φυτό) | 54.07 | 52.81 | 170 |
| Γλιστρίδα | Φύλλα | 18.40 | 17.79 | 401 |
| | Βλαστός | 10.30 | 10.89 | 261 |
| | Σ(υπέργειο) | 28.61 | 28.69 | 946 |
| | Ρίζα | 7.29 | 7.28 | 967 |
| | Σ(φυτό) | 33.04 | 35.97 | 362 |
| Γεράνι | Φύλλα | 20.42 | 21.10 | 20.3* |
| | Βλαστός | 10.47 | 10.12 | 512 |
| | Σ(υπέργειο) | 30.89 | 31.22 | 646 |
| | Ρίζα | - | - | - |
| | Σ(φυτό) | - | - | - |

*για τιμές σημαντικότητας $p=10-50 \times 10^3$

**για τιμές σημαντικότητας $p=1-10 \times 10^3$

***για τιμές σημαντικότητας $p < 1 \times 10^3$

Πίνακας 10α. Συντελεστής μεταφοράς μετάλλων (transfercoefficient, TC) από το έδαφος στο φυτικό ιστό στα δυο υπό μελέτη εδάφη (σύγκριση μεταξύ εδαφών). Η σημαντικότητα ("Sign.") δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 .

| | | Soil A | Soil B | Sign. |
|-----------|----|--------|--------|--------|
| Μαρούλι | Zn | 0.851 | 0.145 | 0.0*** |
| | Cd | 6.70 | 5.51 | 358 |
| | Pb | 0.254 | 0.040 | 65.3 |
| Γλιστρίδα | Zn | 1.032 | 0.238 | 182 |
| | Cd | 1.063 | 0.604 | 467 |
| | Pb | 0.258 | 0.029 | 13.2* |
| Γεράνι | Zn | 0.83 | 0.16 | 0.1*** |
| | Cd | 1.261 | 0.357 | 198 |
| | Pb | 0.350 | 0.036 | 1.0** |

*για τιμές σημαντικότητας $p=10-50 \times 10^3$

**για τιμές σημαντικότητας $p=1-10 \times 10^3$

***για τιμές σημαντικότητας $p < 1 \times 10^3$

Πίνακας 10b. Συντελεστής μεταφοράς (transfercoefficient, TC) των μετάλλων (σύγκριση μεταξύ φυτών και μετάλλων). Η σημαντικότητα ("Sign.") δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 .

| | Soil A | | | | Soil B | | | |
|-------|---------|-----------|--------|-------|---------|-----------|---------|-------|
| | Μαρούλι | Γλιστρίδα | Γεράνι | Sign. | Μαρούλι | Γλιστρίδα | Γεράνι | Sign. |
| Zn | 0.851ab | 1.032a | 0.83b | 696 | 0.145a | 0.238a | 0.16a | 138 |
| Cd | 6.70b | 1.063a | 1.261b | 891 | 5.51b | 0.604b | 0.35b | 258 |
| Pb | 0.254a | 0.258a | 0.350a | 470 | 0.040aB | 0.029aAB | 0.036aA | 74.1 |
| Sign. | 29.5* | 617 | 6.4** | | 0.6*** | 19.0* | 0.2*** | |

*για τιμές σημαντικότητας $p=10-50 \times 10^3$

**για τιμές σημαντικότητας $p=1-10 \times 10^3$

***για τιμές σημαντικότητας $p<1 \times 10^3$

Πίνακας 11α. Συντελεστής μετακίνησης ρίζα-υπέργειο μετάλλων (translocationfactor, TF) (σύγκριση μεταξύ εδαφών). Η σημαντικότητα ("Sign.") δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 .

| | | Soil A | Soil B | Sign. |
|-----------|----|--------|--------|--------|
| Μαρούλι | Zn | 1.610 | 1.143 | 0.0*** |
| | Cd | 2.102 | 1.469 | 503 |
| | Pb | 1.090 | 0.318 | 0.3*** |
| Γλιστρίδα | Zn | 2.333 | 1.854 | 144 |
| | Cd | - | - | - |
| | Pb | - | - | - |
| Γεράνι | Zn | 2.57 | 1.55 | 116 |
| | Cd | 0.65 | 0.54 | 694 |
| | Pb | 0.50 | 1.09 | 280 |

*για τιμές σημαντικότητας $p=10-50 \times 10^3$

**για τιμές σημαντικότητας $p=1-10 \times 10^3$

***για τιμές σημαντικότητας $p<1 \times 10^3$

Πίνακας 11b. Συντελεστής μετακίνησης ρίζα-υπέργειο μετάλλων (translocation factor, TF) (σύγκριση μεταξύ μετάλλων και φυτών). Η σημαντικότητα ("Sign.") δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 .

| | Soil A | | | | Soil B | | | |
|-------|---------|-----------|--------|-------|---------|-----------|--------|--------|
| | Μαρούλι | Γλιστρίδα | Γεράνι | Sign. | Μαρούλι | Γλιστρίδα | Γεράνι | Sign. |
| Zn | 1.610A | 2.333B | 2.57bC | 0.0 | 1.143bA | 1.854B | 1.55A | 0.0*** |
| Cd | 2.102 | - | 0.65a | 125 | 1.469b | - | 0.54 | 167 |
| Pb | 1.090B | - | 0.50aA | 5.7 | 0.318a | - | 1.09 | 165 |
| Sign. | 139 | - | 0.3*** | | 0.7*** | - | 651 | |

*για τιμές σημαντικότητας $p=10-50 \times 10^3$

**για τιμές σημαντικότητας $p=1-10 \times 10^3$

***για τιμές σημαντικότητας $p<1 \times 10^3$

Πίνακας 12α. Δείκτης μόλυνσης φυτών (plantpollutionindex , PPI) του Zn (PPI_{Zn}), του Cd (PPI_{Cd}), και του Pb (PPI_{Pb}), όπως επίσης και ο PPI τριών μετάλλων (PPI_{3M}) στα δύο εδάφη που μελετώνται (σύγκριση μεταξύ εδαφών). Η σημαντικότητα ("Sign.") δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 .

| | | Soil A | Soil B | Sign. |
|-----------|------------|--------|--------|--------|
| Μαρούλι | PPI_{Zn} | 38.44 | 87.90 | 0.0*** |
| | PPI_{Cd} | 166.41 | 332.23 | 44.4* |
| | PPI_{Pb} | 26.89 | 55.91 | 10.8** |
| | PPI_{3M} | 66.31 | 159.67 | 2.4** |
| Γλιστρίδα | PPI_{Zn} | 23.51 | 86.80 | 0.0*** |
| | PPI_{Cd} | 144.68 | 205.77 | 215 |
| | PPI_{Pb} | 27.37 | 48.92 | 62.4 |
| | PPI_{3M} | 55.27 | 129.71 | 56.7 |
| Γεράνι | PPI_{Zn} | 42.76 | 74.32 | 0.0*** |
| | PPI_{Cd} | 135.49 | 122.24 | 846 |
| | PPI_{Pb} | 14.32 | 24.65 | 2.7** |
| | PPI_{3M} | 64.46 | 74.23 | 667 |

*για τιμές σημαντικότητας $p=10-50 \times 10^3$

**για τιμές σημαντικότητας $p=1-10 \times 10^3$

***για τιμές σημαντικότητας $p<1 \times 10^3$

Πίνακας 12b. Δείκτης μόλυνσης φυτών (plantpollutionindex , PPI) του Zn (PPI_{Zn}), του Cd (PPI_{Cd}), και του Pb (PPI_{Pb}), όπως επίσης και ο PPI τριών μετάλλων (PPI_{3M}) στα δύο εδάφη που μελετώνται (σύγκριση μεταξύ μετάλλων και φυτών). Η σημαντικότητα ("Sign.") δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 .

| | Soil A | | | | Soil B | | | |
|------------|---------|-----------|---------|-------|----------|-----------|----------|-------|
| | Μαρούλι | Γλιστρίδα | Γεράνι | Sign. | Μαρούλι | Γλιστρίδα | Γεράνι | Sign. |
| PPI_{Zn} | 38.44aB | 23.51aA | 42.76aC | 0.0 | 87.90aB | 86.80aAB | 74.32abA | 70.8 |
| PPI_{Cd} | 166.41b | 144.68b | 135.49b | 674 | 332.23bB | 205.77bAB | 122.24bA | 47.4* |
| PPI_{Pb} | 26.89a | 27.37a | 14.32a | 152 | 55.91aB | 48.92aB | 24.65aA | 3.3** |
| Sign. | 0.1*** | 3.3** | 0.0*** | | 0.0*** | 2.4** | 64.2 | |
| PPI_{3M} | 66.31 | 55.27 | 64.46 | 792 | 159.67B | 129.71AB | 74.23A | 54.3 |

*για τιμές σημαντικότητας $p=10-50 \times 10^3$

**για τιμές σημαντικότητας $p=1-10 \times 10^3$

***για τιμές σημαντικότητας $p<1 \times 10^3$

Πίνακας 13. Δείκτης φόρτου μόλυνσης (metallpollutionloadindex, PLI) των μετάλλων. Η σημαντικότητα ("Sign.") δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 .

| | Μαρούλι | Γλιστρίδα | Γεράνι | Sign. |
|-------|---------|-----------|--------|-------|
| Zn | 15.23b | 11.65 | 9.68 | 483 |
| Cd | 5.18aB | 3.63AB | 2.62aA | 54.9 |
| Pb | 15.34b | 14.48 | 15.55c | 993 |
| Sign. | 4.5** | 125 | 0.0*** | |

*για τιμές σημαντικότητας $p=10-50 \times 10^3$

**για τιμές σημαντικότητας $p=1-10 \times 10^3$

***για τιμές σημαντικότητας $p < 1 \times 10^3$

Πίνακας 14α. Συντελεστές συσχέτισης, R^2 , της ξηρής ουσίας μέρους των φυτών σε σχέση με τις συγκεντρώσεις μετάλλων στο μαρούλι. Η σημαντικότητα ("Sign.") δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 .

| | Zn-D | Cd-D | Pb-D | Zn-AR | Cd-AR | Pb-AR |
|---------|--------------------|--------------------|--------|----------------------|--------|---------------------|
| Φύλλα | -0.003 | -0.203 | -0.031 | -0.245 | -0.057 | -0.061 |
| Βλαστός | -0.300 (0.028*) | -0.283 (0.0502) | -0.068 | -0.403 (0.0035**) | -0.161 | -0.209 (0.0488*) |
| Ρίζα | -0.087 | -0.014 | -0.003 | -0.145 | -0.069 | -0.107 |

*για τιμές σημαντικότητας $p=10-50 \times 10^3$

**για τιμές σημαντικότητας $p=1-10 \times 10^3$

***για τιμές σημαντικότητας $p < 1 \times 10^3$

Πίνακας 14b. Συντελεστές συσχέτισης, R^2 , της ξηρής ουσίας μέρους των φυτών σε σχέση με τις συγκεντρώσεις μετάλλων στη γλιστρίδα.

| | Zn-D | Cd-D | Pb-D | Zn-AR | Cd-AR | Pb-AR |
|---------|-------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| Φύλλα | 0.034 | 0.002 | 0.063 | 0.005 | 0.006 | 0.007 |
| Βλαστός | 0.186 (0.0652) | 0.412 (0.0098**) | 0.049 | 0.113 | 0.047 | 0.067 |
| Ρίζα | 0.009 | 0.002 | 0.009 | 0.025 | 0.008 | 0.009 |

Πίνακας 14c. Συντελεστές συσχέτισης, R^2 , της ξηρής ουσίας μέρους των φυτών σε σχέση με τις συγκεντρώσεις μετάλλων στο γεράνι.

| | Zn-D | Cd-D | Pb-D | Zn-AR | Cd-AR | Pb-AR |
|---------|---------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------------------|
| Φύλλα | 0.333 (0.0077**) | 0.106 | 0.195 (0.0512) | 0.124 | 0.191 (0.0694) | 0.245 (0.0367*) |
| Βλαστός | -0.005 | -0.012 | -0.042 | -0.045 | -0.116 | -0.038 |
| Ρίζα | --- | --- | --- | --- | --- | --- |

Πίνακας 15. Μήκος βλαστών των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος. Η σημαντικότητα ("Sign.") δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 .

| | Μήκος Βλαστού | Εδ. Α (cm) | Εδ. Β (cm) | Sign. |
|-----------|---------------|------------|------------|-------|
| Μαρούλι | Κεντρικού | 5,74 | 5,31 | NS |
| Γλιστρίδα | Κεντρικού | 41,80 | 40,30 | NS |
| | Πλάγιων | 186,10 | 255,20 | 46* |
| | Σύνολο | 227,90 | 295,50 | 50* |
| Γεράνι | Κεντρικού | 28,70 | 32,70 | NS |

NS = μη σημαντική διαφορά.

*για τιμές σημαντικότητας $p=10-50 \times 10^3$

**για τιμές σημαντικότητας $p=1-10 \times 10^3$

***για τιμές σημαντικότητας $p<1 \times 10^3$

Πίνακας 16. Πάχος φύλλων των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος. Οι ομάδες είναι χωρισμένες με βάση την ηλικία φύλλων, κατά αύξουσα ηλικία: ομάδα 1 < ομάδα 2 < ομάδα 3 < ομάδα 4 < ομάδα 5. Η σημαντικότητα ("Sign.") δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 .

| | Πάχος φύλλου | Εδ. Α (mm) | Εδ. Β (mm) | Sign. |
|-----------|--------------|------------|------------|-------|
| Μαρούλι | Ομάδα 1 | 0,45 | 0,44 | N.S. |
| | Ομάδα 2 | 0,48 | 0,41 | 50* |
| | Ομάδα 3 | 0,43 | 0,43 | N.S. |
| | Ομάδα 4 | 0,53 | 0,46 | 46* |
| | Ομάδα 5 | 0,48 | 0,43 | N.S. |
| | Σύνολο | 0,47 | 0,43 | N.S. |
| Γλιστρίδα | Ομάδα 1 | 1,03 | 0,94 | N.S. |
| | Ομάδα 2 | 1,14 | 1,01 | 23* |
| | Ομάδα 3 | 1,01 | 0,95 | N.S. |
| | Σύνολο | 1,06 | 0,96 | 13* |
| Γεράνι | Ομάδα 1 | 0,88 | 1,08 | 15* |
| | Ομάδα 2 | 0,95 | 0,88 | N.S. |
| | Ομάδα 3 | 0,79 | 0,80 | N.S. |
| | Σύνολο | 0,88 | 0,92 | N.S. |

NS = μη σημαντική διαφορά.

*για τιμές σημαντικότητας $p=10-50 \times 10^3$

**για τιμές σημαντικότητας $p=1-10 \times 10^3$

***για τιμές σημαντικότητας $p < 1 \times 10^3$

Πίνακας 17. Ξηρό βάρος των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος. Οι ομάδες είναι χωρισμένες με βάση την ηλικία φύλλων, αύξουσα ηλικία: ομάδα 1 < ομάδα 2 < ομάδα 3 < ομάδα 4 < ομάδα 5. Η σημαντικότητα ("Sign.") δίνεται από το *p*, ο οποίος καταγράφεται σε 10³.

| | Ξηρό βάρος | Εδ.Α(g) | Εδ.Β(g) | Sign. |
|-----------|----------------|---------|---------|-------|
| Μαρούλι | Ομάδα 1 | 0,57 | 0,69 | N.S. |
| | Ομάδα 2 | 0,78 | 0,87 | N.S. |
| | Ομάδα 3 | 0,96 | 0,96 | N.S. |
| | Ομάδα 4 | 0,94 | 0,82 | N.S. |
| | Ομάδα 5 | 1,16 | 1,39 | N.S. |
| | Σύνολο φύλλων | 4,42 | 4,74 | N.S. |
| | Βλαστός | 2,14 | 1,68 | 12* |
| | Συν. υπέργειου | 6,56 | 6,43 | N.S. |
| | Ρίζα | 5,47 | 4,81 | N.S. |
| Γλιστρίδα | Ομάδα 1 | 0,34 | 0,34 | N.S. |
| | Ομάδα 2 | 0,26 | 0,17 | N.S. |
| | Ομάδα 3 | 0,19 | 0,25 | N.S. |
| | Σύνολο φύλλων | 0,63 | 0,63 | N.S. |
| | Βλαστός | 4,36 | 4,95 | N.S. |
| | Συν. υπέργειου | 4,99 | 5,58 | N.S. |
| | Ρίζα | 1,35 | 1,34 | N.S. |
| Γεράνι | Ομάδα 1 | 0,72 | 1,14 | 34* |
| | Ομάδα 2 | 0,50 | 0,89 | 3** |
| | Ομάδα 3 | 1,37 | 1,26 | N.S. |
| | Σύνολο φύλλων | 2,60 | 3,28 | 2** |
| | Βλαστός | 4,53 | 4,18 | N.S. |
| | Συν. υπέργειου | 7,13 | 7,46 | N.S. |

Πίνακας 18. Ποσοστό ξηρού βάρους επί του νωπού βάρους των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος. Οι ομάδες είναι χωρισμένες με βάση την ηλικία φύλλων, αύξουσα ηλικία: ομάδα1< ομάδα 2< ομάδα 3< ομάδα 4< ομάδα 5. Η σημαντικότητα ("Sign.") δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 .

| | % Ξηρό βάρος (%) | Εδ. Α (%) | Εδ. Β (%) | Sign. |
|-----------|------------------|-----------|-----------|--------|
| Μαρούλι | Ομάδα 1 | - | - | N.S. |
| | Ομάδα 2 | - | - | N.S. |
| | Ομάδα 3 | - | - | N.S. |
| | Ομάδα 4 | - | - | N.S. |
| | Ομάδα 5 | - | - | N.S. |
| | Σύνολο φύλλων | - | - | N.S. |
| | Βλαστός | - | - | N.S. |
| | Συν. υπέργειου | - | - | N.S. |
| | Ρίζα | - | - | N.S. |
| Γλιστρίδα | Ομάδα 1 | 5,98 | 7,64 | N.S. |
| | Ομάδα 2 | 5,73 | 4,92 | N.S. |
| | Ομάδα 3 | 4,80 | 6,92 | N.S. |
| | Σύνολο φύλλων | 5,34 | 6,61 | N.S. |
| | Βλαστός | 12,00 | 11,36 | N.S. |
| | Συν. υπέργειου | 10,21 | 10,45 | N.S. |
| | Ρίζα | | | N.S. |
| Γεράνι | Ομάδα 1 | 13,53 | 15,63 | 42* |
| | Ομάδα 2 | 12,98 | 13,20 | N.S. |
| | Ομάδα 3 | 14,52 | 13,03 | 0,1*** |
| | Σύνολο φύλλων | 13,92 | 13,03 | N.S. |
| | Βλαστός | 22,04 | 18,31 | 6** |
| | Συν. υπέργειου | 18,10 | 15,56 | 7** |

NS = μη σημαντική διαφορά.

*για τιμές σημαντικότητας $p=10-50 \times 10^3$

**για τιμές σημαντικότητας $p=1-10 \times 10^3$

***για τιμές σημαντικότητας $p<1 \times 10^3$

Πίνακας 19. Εμβαδό των φύλλων των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος. Οι ομάδες είναι χωρισμένες με βάση την ηλικία φύλλων, αύξουσα ηλικία: ομάδα1< ομάδα 2< ομάδα 3< ομάδα 4< ομάδα 5. Η στατιστική σύγκριση σημαντικότητας γίνεται μεταξύ των στηλών MeanLA^c (Εδ. Α) και MeanLA^c (Εδ. Β). Η σημαντικότητα ("Sign.") δίνεται από το *p*, ο οποίος καταγράφεται σε 10³.

| | Εμβαδόν (cm ²) | | Εδ. Α (cm ²) | | | Εδ. Β (cm ²) | | |
|-----------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------------|-------------------------|-------|
| | | Sum A ^a | Leaf Num ^b | Mean LA ^c | Sum A ^a | Leaf Num ^b | Mean LA ^c | Sign. |
| Μαρούλι | Ομάδα 1 | 90,13 | 5,90 | 15,27 | 99,19 | 5,50 | 18,07 | N.S. |
| | Ομάδα 2 | 189,21 | 6,20 | 30,46 | 181,15 | 6,10 | 29,65 | N.S. |
| | Ομάδα 3 | 205,58 | 5,70 | 36,09 | 213,70 | 6,10 | 35,08 | N.S. |
| | Ομάδα 4 | 178,76 | 5,80 | 31,01 | 194,97 | 5,70 | 34,85 | N.S. |
| | Ομάδα 5 | 253,29 | 5,90 | 42,62 | 275,11 | 6,00 | 45,82 | N.S. |
| | Σύνολο φύλλων | 916,95 | 29,50 | 31,04 | 936,61 | 28,80 | 32,31 | N.S. |
| Γλιστρίδα | Ομάδα 1 | 69,64 | 86,22 | 0,83 | 67,41 | 82,88 | 0,79 | N.S. |
| | Ομάδα 2 | 40,32 | 16,66 | 2,33 | 33,16 | 13,75 | 2,76 | N.S. |
| | Ομάδα 3 | 38,12 | 37,77 | 1,15 | 53,45 | 49,13 | 1,19 | 50* |
| | Σύνολο φύλλων | 153,04 | 143,00 | 1,11 | 147,68 | 148,40 | 1,01 | N.S. |
| Γεράνι | Ομάδα 1 | 125,43 | 34,90 | 3,69 | 165,38 | 41,10 | 3,91 | N.S. |
| | Ομάδα 2 | 89,43 | 7,80 | 11,43 | 149,17 | 12,40 | 13,12 | 6** |
| | Ομάδα 3 | 225,78 | 11,70 | 20,03 | 224,61 | 9,60 | 24,83 | N.S. |
| | Σύνολο φύλλων | 440,64 | 54,40 | 8,33 | 539,17 | 63,10 | 8,68 | 25 * |

a = SumA: Συνολικό εμβαδόν φυτικής επιφάνειας,

b = LeafNum: Αριθμός φύλλων,

c = MeanLeafArea (LA): Μέση επιφάνεια φύλλων.

NS = μη σημαντική διαφορά.

*για τιμές σημαντικότητας $p=10-50 \times 10^3$

**για τιμές σημαντικότητας $p=1-10 \times 10^3$

***για τιμές σημαντικότητας $p<1 \times 10^3$

Πίνακας 20. Οι τιμές δείκτη SPAD παρουσιάζουν τη συγκέντρωση της ολικής χλωροφύλλης των φύλλων των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος. Οι ομάδες είναι χωρισμένες με βάση την ηλικία φύλλων, αύξουσα ηλικία: ομάδα 1 < ομάδα 2 < ομάδα 3 < ομάδα 4 < ομάδα 5. Η σημαντικότητα ("Sign.") δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 .

| | Τιμές Δείκτη SPAD | Εδ. Α | Εδ. Β | Sign. |
|-----------|-------------------|-------|-------|-------|
| Μαρούλι | Ομάδα 1 | 35,45 | 38,51 | N.S. |
| | Ομάδα 2 | 32,78 | 34,50 | N.S. |
| | Ομάδα 3 | 30,55 | 31,90 | N.S. |
| | Ομάδα 4 | 23,20 | 24,15 | N.S. |
| | Ομάδα 5 | 13,91 | 14,30 | N.S. |
| | Σύνολο φύλλων | 27,18 | 28,67 | N.S. |
| Γλιστρίδα | Ομάδα 1 | 28,44 | 27,86 | N.S. |
| | Ομάδα 2 | 26,57 | 27,33 | N.S. |
| | Ομάδα 3 | 17,40 | 16,73 | N.S. |
| | Σύνολο φύλλων | 24,14 | 23,97 | N.S. |
| Γεράνι | Ομάδα 1 | 44,90 | 51,90 | N.S. |
| | Ομάδα 2 | 53,50 | 51,70 | N.S. |
| | Ομάδα 3 | 38,60 | 35,00 | N.S. |
| | Σύνολο φύλλων | 45,70 | 46,20 | N.S. |

NS = μη σημαντική διαφορά.

Πίνακας 21. Ο λόγος της ρίζας προς υπέργειο (Root/Shoot) των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος. Η σημαντικότητα ("Sign.") δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 .

| | Εδ. Α | Εδ. Β | Sign. |
|-----------|-------|-------|-------|
| Μαρούλι | 0,84 | 0,77 | N.S. |
| Γλιστρίδα | 0,27 | 0,25 | N.S. |
| Γεράνι | - | - | - |

NS = μη σημαντική διαφορά.

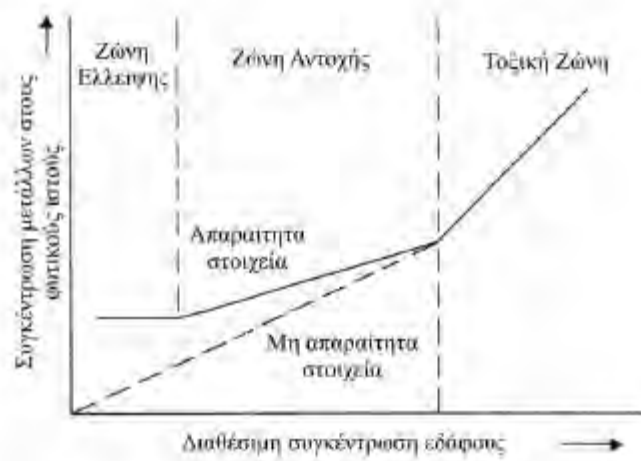
Πίνακας 22. Ειδική μάζα του φύλλου (LeafSpecificMass), ή δείκτης ξηροφιλίας, των φυτών των μεταχειρίσεων του πειράματος. Ο δείκτης υπολογίζεται ως ο λόγος του ξηρού βάρους φύλλου προς το εμβαδό του φύλλου. Η σημαντικότητα ("Sign.") δίνεται από το p , ο οποίος καταγράφεται σε 10^3 .

| | Εδ. Α $g\Xi B/dm^2$ | Εδ. Β $g\Xi B/dm^2$ | Sign. |
|-----------|------------------------|------------------------|-------|
| Μαρούλι | 0,48 | 0,53 | N.S. |
| Γλιστρίδα | 0,40 | 0,41 | N.S. |
| Γεράνι | 0,59 | 0,61 | N.S. |

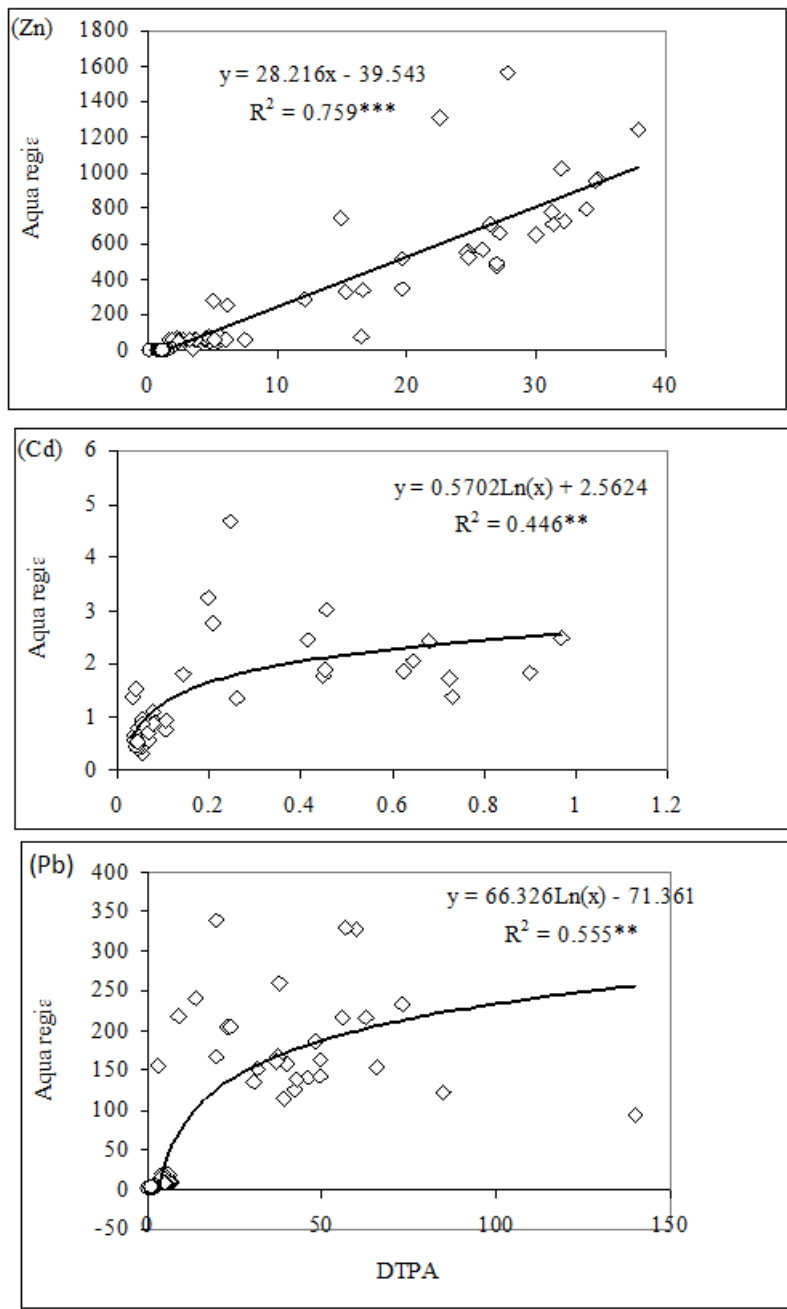
NS = μη σημαντική διαφορά.



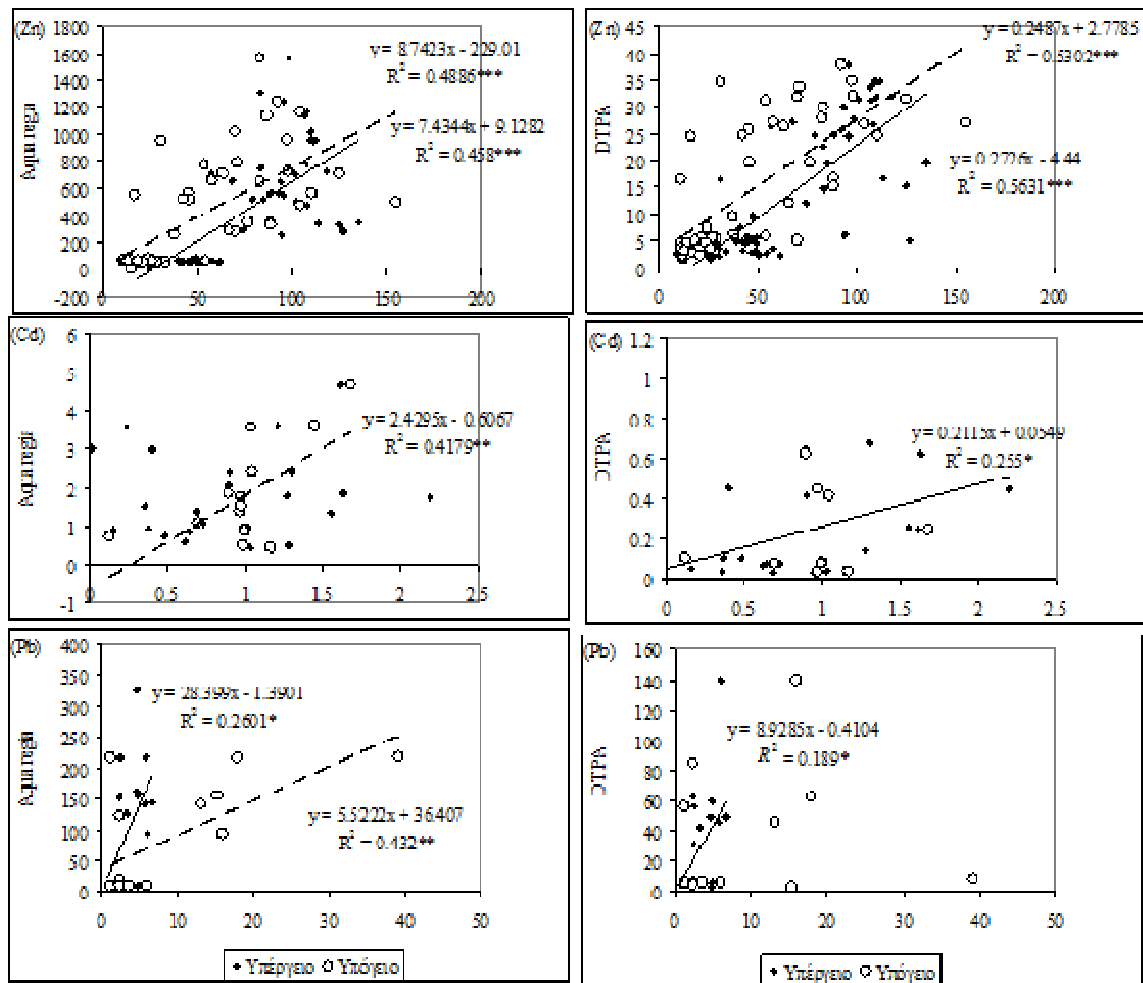
Σχήμα 1. Τα βέλτιστα όρια ανάπτυξης ενός φυτικού οργανισμού και η εμφάνιση συμπτωμάτων καταπόνησης όταν αυξάνεται ή ελαττώνεται πέραν ορισμένων ορίων η ένταση του παράγοντα καταπόνησης (πηγή: Καραμπουρνιώτης, 2003).



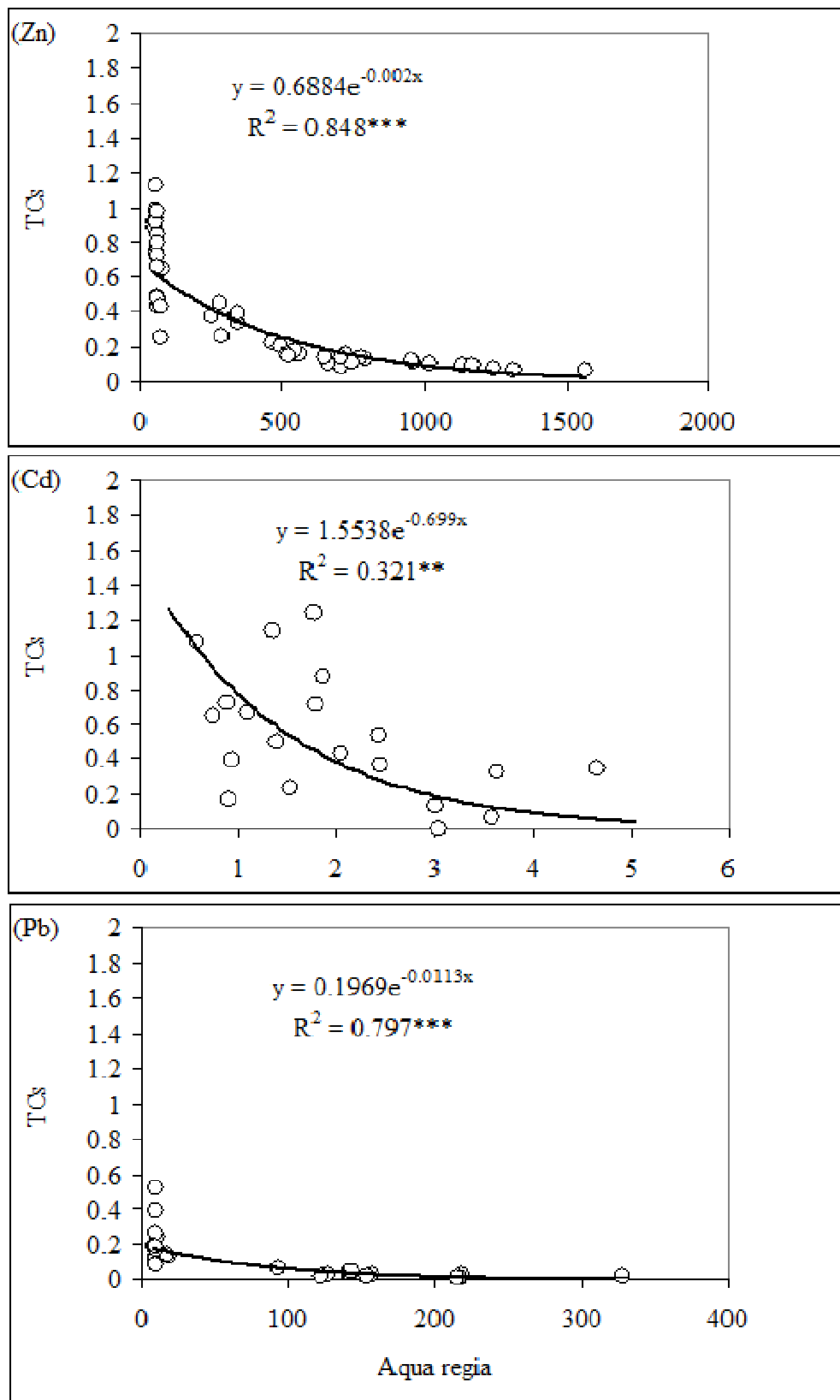
Σχήμα 2. Καμπύλη πρόσληψης μεταλλικών στοιχείων, απαραίτητων και μη (πηγή: Baker and Walker 1990).



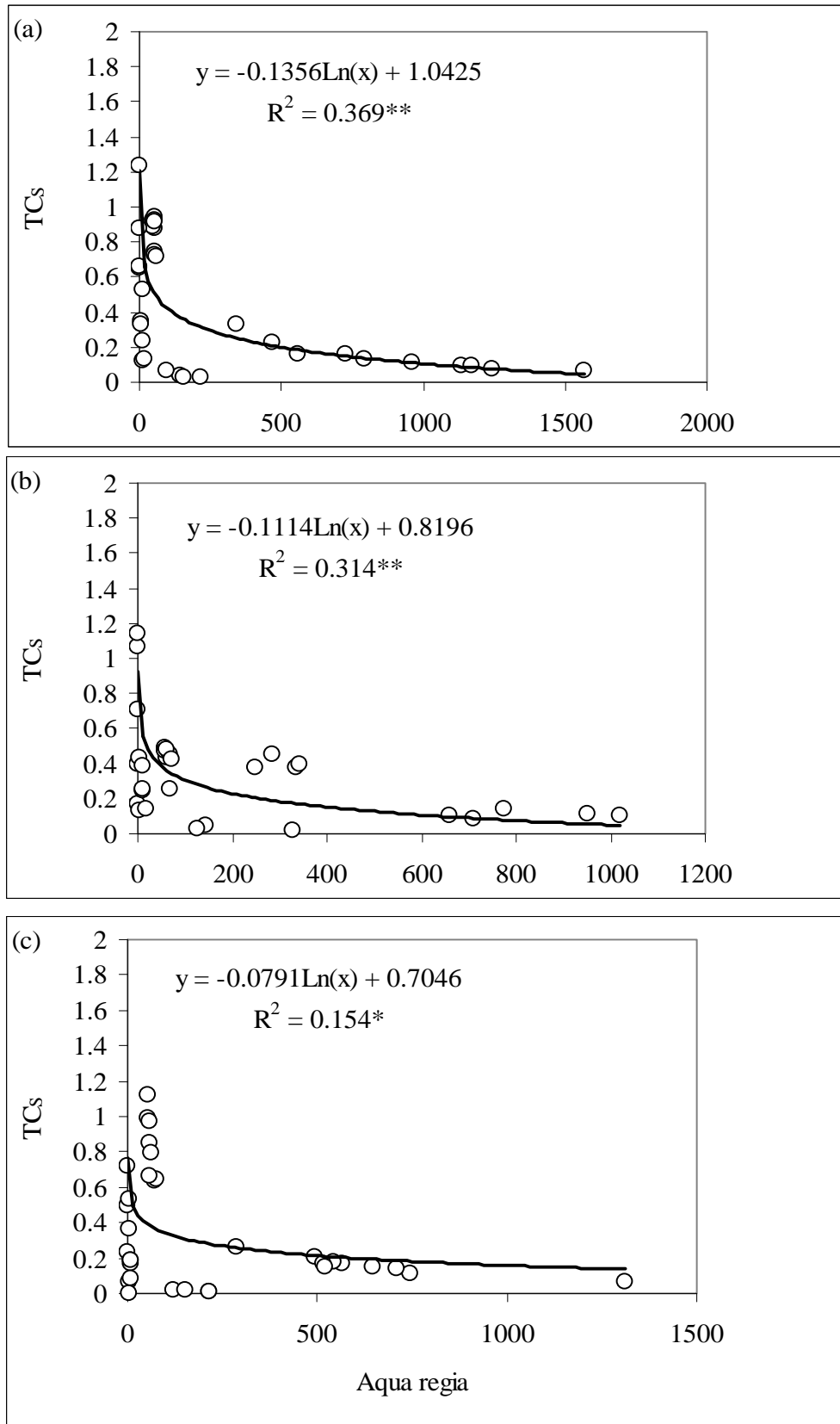
Σχήμα 3. Σχέση μεταξύ μετάλλων εκχυλισμένων με *aqua regia* και DTPA για (a) Zn, (b) Cd, και (c) Pb για όλα τα δεδομένα του πειράματος μαζί.



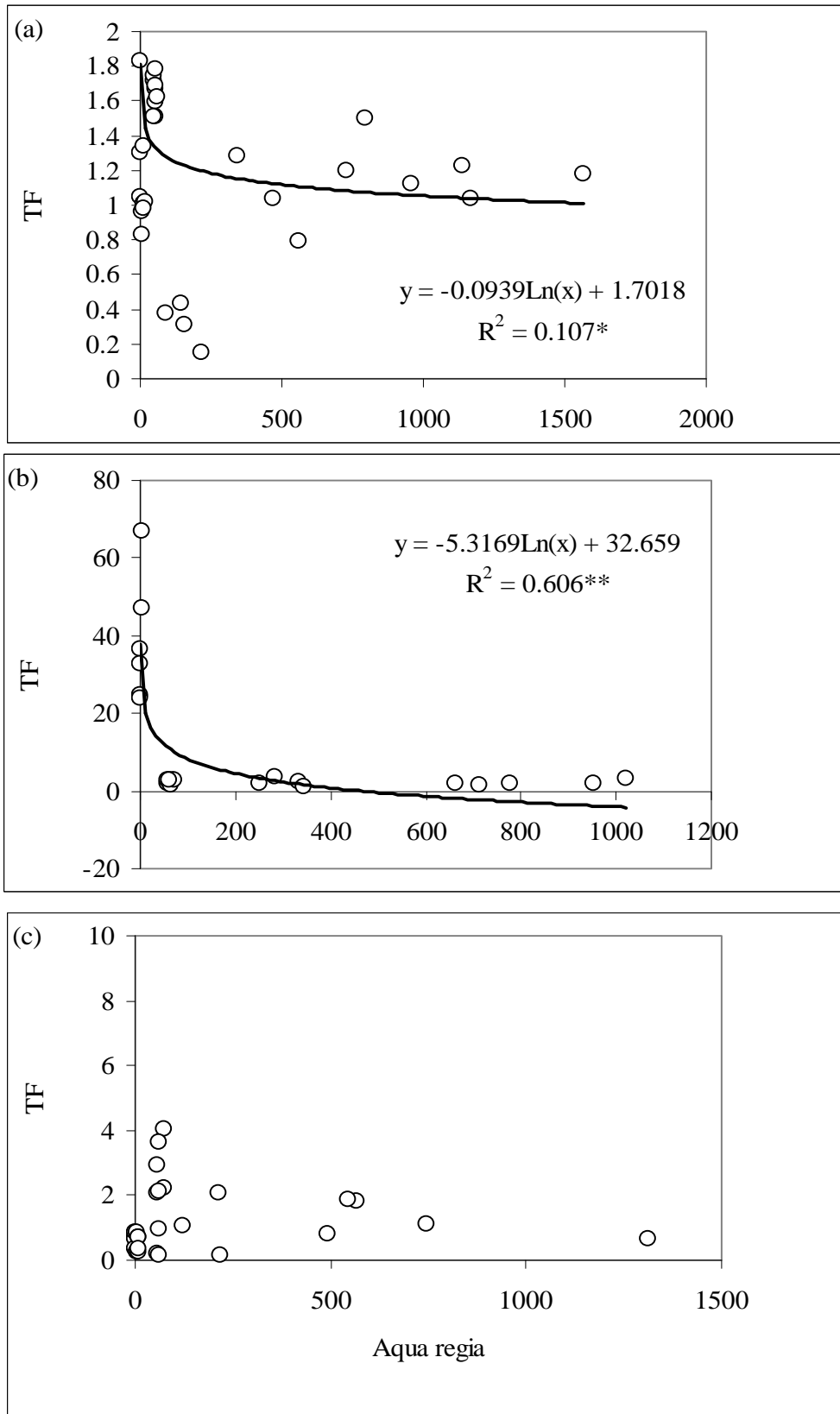
Σχήμα 4. Σχέση μεταξύ μετάλλων εκχυλισμένων με *aquaregia* στο έδαφος και συγκέντρωσης μετάλλων στην υπέργεια (ανοιχτά σημεία) και την υπόγεια (κλειστά σημεία) βιομάζα, και σχέση μεταξύ μετάλλων εκχυλισμένων με DTPA στο έδαφος και συγκέντρωσης μετάλλων στην υπέργεια (ανοιχτά σημεία) και την υπόγεια (κλειστά σημεία) βιομάζα. Οι διακεκομμένες γραμμές τάσεις αφορούν στην υπόγεια βιομάζα, ενώ οι συνεχείς γραμμές αφορούν στην υπέργεια βιομάζα.



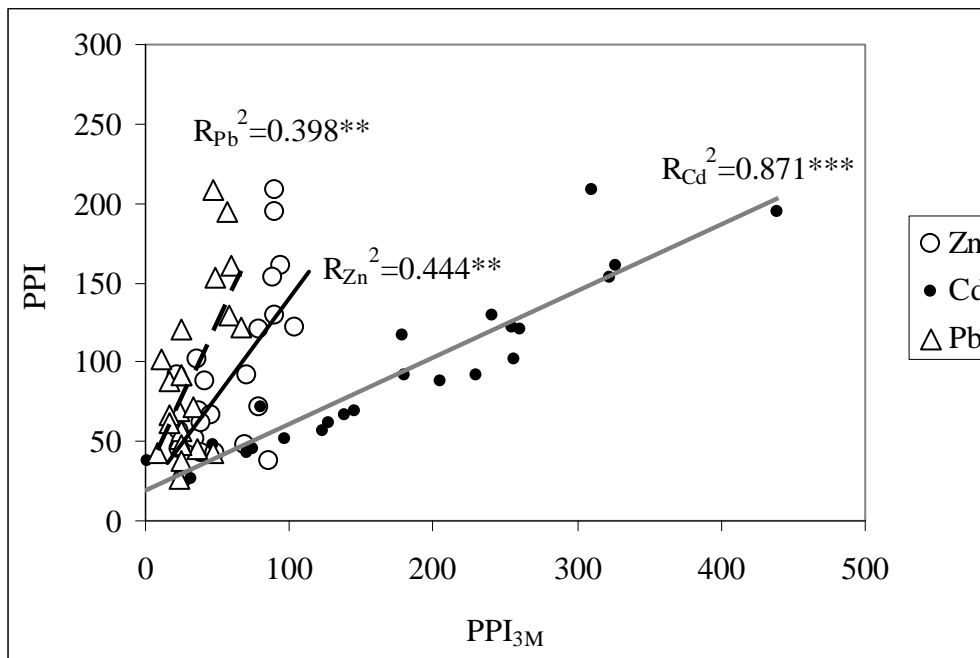
Σχήμα 5. Σχέση μεταξύ συντελεστών μεταφοράς μετάλλων (transfercoefficient, TC_s) από το έδαφος στο φυτικό ιστό και συγκεντρώσεις Zn, Cd και Pb στο aquaregia.



Σχήμα 6. Σχέση μεταξύ συντελεστών μεταφοράς μετάλλων (transfercoefficient, TC_s) από το έδαφος στο φυτικό ιστό και συγκεντρώσεων σε aquaregia για (a) μαρούλι, (b) γλιστρίδα, (c) γεράνι.



Σχήμα 7. Σχέση μεταξύ παράγοντα μετακίνησης μετάλλων (TF) από τη ρίζα στο βλαστό και συγκεντρώσεων σε aquaregia για (a) μαρούλι, (b) γλιστριδα, (c) γεράνι.



Σχήμα 8. Σχέση μεταξύ του plantpollutionindex καθενός μετάλλου χωριστά με το plantpollutionindex και των τριών μετάλλων μαζί και για τα 3 φυτά μαζί. Η διακεκομμένη είναι η γραμμή τάσης του Pb, η σταθερή είναι η γραμμή τάσης του Zn, και η αχνή είναι η γραμμή τάσης του Cd.



Εικόνα 1: Μαρούλι στο αρχικό στάδιο ανάπτυξης. Αριστερά είναι τα φυτά μάρτυρες και δεξιά είναι τα φυτά σε επιμολυσμένο έδαφος.



Εικόνα 2: Γλιστρίδα στο αρχικό στάδιο ανάπτυξης. Αριστερά είναι τα φυτά μάρτυρες και δεξιά είναι τα φυτά σε επιμολυσμένο έδαφος.



Εικόνα 3:Γεράνι στο αρχικό στάδιο ανάπτυξης. Αριστερά είναι τα φυτά μάρτυρες και δεξιά είναι τα φυτά σε επιμολυσμένο έδαφος.



Εικόνα 4: Μαρούλι, γλιστρίδα, γεράνι στα αρχικά στάδια ανάπτυξης.



Εικόνα 5:Μαρούλι στο τελικό στάδιο ανάπτυξης. Αριστερά είναι τα φυτά μάρτυρες και δεξιά είναι τα φυτά σε επιμολυσμένο έδαφος.



Εικόνα 6: Γλιστρίδα στο τελικό στάδιο ανάπτυξης. Αριστερά είναι τα φυτά μάρτυρες και δεξιά είναι τα φυτά σε επιμολυσμένο έδαφος.



Εικόνα 7:Γεράνι στο τελικό στάδιο ανάπτυξης. Αριστερά είναι τα φυτά μάρτυρες και δεξιά είναι τα φυτά σε επιμολυσμένο έδαφος.



Εικόνα 8: Μαρούλι, γλιστρίδα, γεράνι στο τελικό στάδιο ανάπτυξης.