



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΖΙΖΑΝΙΟΛΟΓΙΑΣ

**«Χρήση της γλιστρίδας (*Portulaca oleracea*) για την
φυτοεξυγίανση ρυπασμένων με βαρέα μέταλλα εδαφών:
επίδραση της προσθήκης εδαφοβελτιωτικών υλικών σε
φυσιολογικά και αναπτυξιακά χαρακτηριστικά του φυτού»**

Ζινδριλής Γεώργιος

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Λεβίζου Ευθυμία

Βόλος, Φεβρουάριος 2024

«Χρήση της γλιστρίδας (*Portulaca oleracea*) για την φυτοεξυγίανση ρυπασμένων με βαρέα μέταλλα εδαφών: επίδραση της προσθήκης εδαφοβελτιωτικών υλικών σε φυσιολογικά και αναπτυξιακά χαρακτηριστικά του φυτού»

“Use of purslane (*Portulaca oleracea*) for the phytoremediation of heavy metal polluted soils: impact of soil amendments on plant physiological and growth characteristics”

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Λεβίζου Ευθυμία

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Φυσιολογίας Φυτών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Αντωνιάδης Βασίλειος

Καθηγητής Εφαρμοσμένη Εδαφολογίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Καρκάνης Ανέστης

Αναπληρωτής Καθηγητής Ζιζανιολογίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε σύμφωνα με τον Κανονισμό Εκπόνησης Πτυχιακής Εργασίας του ΤΓΦΠΑΠ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο "*Χρήση της γλιστρίδας (Portulaca oleracea)*
για την φυτοεξυγίανση ρυπασμένων με βαρέα μέταλλα εδαφών: επίδραση της
προσθήκης εδαφοβελτιωτικών υλικών σε φυσιολογικά και αναπτυξιακά χαρακτηριστικά

του φυτού " σηματοδοτεί την ολοκλήρωση των ακαδημαϊκών μου υποχρεώσεων στο τμήμα γεωπονίας φυτικής παραγωγής και αγροτικού περιβάλλοντος του πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Η τελική μορφή της εργασίας είναι αποτέλεσμα εκτεταμένης αναζήτησης, μέσω της καθοδήγησης και υποστήριξης συγκεκριμένων ανθρώπων. Στο σημείο αυτό αισθάνομαι την ανάγκη να τους ευχαριστήσω θερμά!

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα την επιβλέπουσα καθηγήτρια της διπλωματικής μου εργασίας Κυρία Ευθυμία Λεβίζου για τις γνώσεις που μου μετέφερε στα μαθήματα , τις πολύτιμες συμβουλές καθώς και τις ουσιαστικές παρατηρήσεις που μου πρόσφερε καθόλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους φίλους μου και κυρίως στον συμφοιτητή και πολύ καλό μου φίλο Κωνσταντίνο Ευθυμίου για τις γνώσεις και τις ιδέες που ανταλλάξαμε καθώς και για όλες τις ευχάριστες αλλά και δύσκολες στιγμές που μοιραστήκαμε.

Ακόμα ευχαριστώ πολύ την κοπέλα μου Αγγελική Στεργιοπουλου για την αμέτρητη συμπαράσταση, κατανόηση και βοήθεια που μου παρείχε μέχρι την ολοκλήρωση της εργασίας.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ χρωστάω επίσης στην αδερφή μου ,που πολλές φορές καθ' όλη την διάρκεια της ζωής μου έπαιρνε τον ρόλο της μητέρας για μένα αν και μόνο τέσσερα χρονιά μεγαλύτερη, την Ροδάνθη Ζινδριλή η οποία συμμετέχει ενεργά στην εκπαιδευτική μου πορεία από τις πρώτες τάξεις του δημοτικού έως σήμερα.

Τέλος ευχαριστώ θερμά τους γονείς μου , Λένα Ζαφείρη και Χριστόδουλο Ζινδριλή για την ατέρμονη στήριξη, εμπιστοσύνη και συμπαράσταση που μου πρόσφεραν μέχρι σήμερα.

Πίνακας περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1 Γενικές πληροφορίες για τα βαρέα μέταλλα	8
1.2 Βαρέα μέταλλα στο έδαφος	9
1.3 Βαρέα μέταλλα στο φυτό	12
1.3.1 Είσοδος και μεταφορά εντός του φυτού	12
1.3.2 Προβλήματα που προκαλούνται στο φυτό	13
1.3.3 Μηχανισμοί άμυνας του φυτού	14
1.4 Κατηγορίες φυτών με βάση την αφομοίωση των βαρέων μετάλλων	15
1.5 Τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών από βαρέα μέταλλα	16
1.5.1 Φυτοαποκατάσταση	17
1.5.2 Χρήση προσροφητικών υλικών	19
1.6 Το έδαφος του Λαυρίου	20
1.7 Η περίπτωση της γλιστρίδας	22
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	24
2.1 Γενικά	24
2.2 Πειραματικός Σχεδιασμός	24
2.1 Μετρήσεις-Αναλύσεις	25
2.1.1 Μετρήσεις κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου	25
2.1.2 Τελική συγκομιδή	27
2.2 Στατιστική Επεξεργασία των δεδομένων	28
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	29

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ	40
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	43
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	44

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η περιοχή του Λαυρίου αποτελεί μία από τις πιο ρυπασμένες περιοχές της ελληνικής επικράτειας, ρύπανση που οφείλεται στην έντονη παρουσία βαρέων μετάλλων για πολλούς αιώνες. Ο στόχος της παρούσας διατριβής ήταν να εξετάσει τις αναπτυξιακές και φυσιολογικές αποκρίσεις της γλιστρίδας (*Portulaca oleracea*) που καλλιεργήθηκε σε έδαφος προερχόμενο από το Λαύριο και στο οποίο έγινε η προσθήκη εδαφοβελτιωτικών. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε η δοκιμή δύο συγκεντρώσεων (2% και 4% επί ξηρού εδάφους) από τα εξής εδαφοβελτιωτικά: EDTA, ζεόλιθος και κομπόστ. Οι δοκιμές αποσκοπούσαν στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας αυτών των υλικών στη βελτίωση της ανάπτυξης και λειτουργίας της γλιστρίδας. Ως μάρτυρας χρησιμοποιήθηκαν φυτά η ανάπτυξη των οποίων έγινε στο ίδιο έδαφος χωρίς προσθήκη εδαφοβελτιωτικών. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια του πειράματος καταγράφονται οι παράμετροι του φθορισμού της χλωροφύλλης *a in vivo*, ο δείκτης SPAD ο οποίος συσχετίζεται με την συγκέντρωση των ολικών χλωροφυλλών και του δείκτη PRI μέσω του οποίου μπορούμε να συσχετίσουμε την αποδοτικότητα της χρήσης φωτός κατά τη φωτοσύνθεση. Κατά την τελική συλλογή των φυτών που πραγματοποιήθηκε 2,5 μήνες μετά τη μεταφύτευση μετρήθηκαν διάφορες αναπτυξιακές παράμετροι (ύψος και βάρος βλαστών, νωπό βάρος υπέργειου μέρους, καθώς και ξηρή βιομάζα αυτού και ριζών). Η χρήση του Compost ως εδαφοβελτιωτικού οδήγησε σε βελτιωμένη ανάπτυξη των φυτών και στις δύο συγκεντρώσεις. Το EDTA οδήγησε σε ελαφρώς βελτιωμένη ανάπτυξη των φυτών σε σύγκριση με το Control ωστόσο, εφαρμογή του EDTA-40 οδήγησε σε μείωση του βάρους των φύλλων. Η εφαρμογή Zeo-20 και Zeo-40 δεν υποστήριξε την αύξηση των υπέργειων τμημάτων του φυτού καθώς ήταν παρόμοιο με το Control, όμως φαίνεται

ότι είχε αρνητική επίδραση στην ανάπτυξη του ριζικού συστήματος. Η λειτουργία και απόδοση του φωτοσυστήματος II δεν βελτιώθηκε σημαντικά από την παρουσία των εδαφοβελτιωτικών υλικών, σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Τα χαμηλά επίπεδα αξιοποίησης του φωτός για φωτοσύνθεση υποδηλώνουν καταπονητικές συνθήκες που επιβάλλονται στη φωτοσυνθετική συσκευή από το έντονα ρυπασμένο έδαφος του Λαυρίου, οι οποίες δεν αναιρέθηκαν από την προσθήκη των εδαφοβελτιωτικών υλικών, με πιθανή εξαίρεση το Compost. Συμπερασματικά, μόνο το Compost έδειξε μία σχετική αποτελεσματικότητα στη βελτίωση αναπτυξιακών και φυσιολογικών παραμέτρων των φυτών γλιστρίδας, όμως περαιτέρω έρευνα απαιτείται ώστε να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συγκεντρώσεις του.

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικές πληροφορίες για τα βαρέα μέταλλα

Σε επιστημονικό επίπεδο ο όρος “βαρέα μέταλλα” περιλαμβάνει διάφορους και, σε ορισμένες περιπτώσεις, αντιφατικούς ορισμούς. Ο Καππάτος (2015), κατάφερε να συλλέξει τους τρεις πιο διαδεδομένους μεταξύ άλλων. Ο πρώτος ορισμός, όπως περιγράφεται από τους Ghosh και Singh (2005), αναφέρει τα βαρέα μέταλλα ως μέταλλα ή μεταλλοειδή με ατομικό βάρος μεγαλύτερο από εκείνο του σιδήρου (55,85). Αντίθετα, βάσει του δεύτερου ορισμού, τα βαρέα μέταλλα χαρακτηρίζονται αρχικά από σχετικά υψηλή πυκνότητα που κυμαίνεται πάνω από 5 g/cm³ αλλά και τοξικότητα σε χαμηλές συγκεντρώσεις που τα καθιστά ακόμη και δηλητηριώδη (Gardea-Torresdey et al., 2005). Ωστόσο, παρουσιάζεται διαφωνία μεταξύ των διαφορετικών ορισμών. Για παράδειγμα, βάσει του πρώτου ορισμού, το αρσενικό (As), το βηρύλλιο και το χρώμιο (Cr) δεν εντάσσονται στην κατηγορία των βαρέων μετάλλων, ενώ σύμφωνα με το δεύτερο ορισμό, κατατάσσονται σε αυτήν την κατηγορία. Ένας τρίτος ορισμός, αναφέρει πως βαρύ μέταλλο μπορεί να χαρακτηριστεί οποιοδήποτε χημικό στοιχείο με μεταλλικές ιδιότητες και ο ατομικός του αριθμός να είναι μεγαλύτερος από 20 (Raskin et al., 1994, Lasat, 2000).

Για να αναπτυχθούν οι φυτικοί οργανισμοί είναι απαραίτητη η παρουσία στο έδαφος ορισμένων θρεπτικών στοιχείων. Στην περίπτωση που κάποιο από αυτά υπάρχει σε συγκεντρώσεις στο έδαφος χαμηλότερες από αυτές που χρειάζεται το φυτό, δεν έχει κανονική ανάπτυξη με αποτέλεσμα να μην ολοκληρώνει φυσιολογικά τον βιολογικό του κύκλο. Τα θρεπτικά στοιχεία των φυτών χωρίζονται σε μακροστοιχεία και ιχνοστοιχεία με βάση την απαιτούμενη συγκέντρωσή τους στους φυτικούς ιστούς. Τα μακροστοιχεία είναι απαραίτητα σε ποσότητες που υπερβαίνουν τα 1000 ppm στον

ξηρό ιστό, ενώ τα ιχνοστοιχεία χρειάζονται σε συγκεντρώσεις μικρότερες από 100 ppm (Πίνακας 1).

Μακροστοιχεία	Ιχνοστοιχεία
C, N, H, O, S, K, P Ca ,Mg	Zn ,B, Mo, Ni, Fe, Cl, Cu, Mn

Πίνακας 1: Μακροστοιχεία και ιχνοστοιχεία (Kabata-Pendias and Pendias, 2011).

Επιπλέον, το έδαφος περιέχει πολλά στοιχεία που είναι μη απαραίτητα, τα οποία μπορεί να διεισδύσουν στους φυτικούς ιστούς, παρόλο την υψηλή εκλεκτικότητα στη διαπερατότητά τους που παρουσιάζουν οι μεμβράνες των φυτικών κυττάρων. Μεταξύ των στοιχείων αυτών το αρσενικό, ο υδράργυρος, το κάδμιο, ο μόλυβδος και άλλα μεταλλικά στοιχεία είναι ιδιαίτερα τοξικά. Στα βαρέα μέταλλα, εκτός από τα προαναφερθέντα, περιλαμβάνονται και ορισμένα στοιχεία όπως το νικέλιο, το κοβάλτιο, ο χαλκός, ο ψευδάργυρος και το μολυβδαίνιο. Αυτά τα στοιχεία, σε φυσιολογικές τιμές, είναι απαραίτητα ιχνοστοιχεία για βασικές λειτουργίες του φυτού, ωστόσο, όταν υπερβαίνουν αυτές τις τιμές, μπορούν να γίνουν ιδιαίτερα τοξικά και επικίνδυνα (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012).

Τα βαρέα μέταλλα κατατάσσονται με βάση την επικινδυνότητά τους σε μη τοξικά, σπάνια τοξικά, τοξικά και πολύ επικίνδυνα. (Πίνακας 2) (Duffus, 2002).

Μη τοξικά	Σπάνια Τοξικά	Τοξικά	Επικίνδυνα
Fe, Al, Ca, K, Li, Mg, Na, Sr	Ba, Ga, La, Nb, Ti, Zr, W, Hf, Ir, Os, Re, Rh, Ru	Ti, Zn, Cd, Co, Cu, Ni, Pt, Pd, Ag, Au, Hg, Pb, Bi, Sb, As, Se, Te, Be, Sn	Zn, Cd, Hg, Ni, Cu

Πίνακας 2: Κατάταξη Βαρέων Μετάλλων ανάλογα την τοξικότητά τους (Duffus, 2002).

Η ρύπανση των υπόγειων υδάτων και του εδάφους από βαρέα μέταλλα συνδέεται με δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία όπως καταστροφή οργάνων και εμφάνιση καρκινογενέσεων (Badeenezhad et al.,2023, Chowdhary et al.,2020). Λόγω των πιθανών αρνητικών επιπτώσεών τους στην ανθρώπινη υγεία, η παγκόσμια ανησυχία σχετικά με την παρουσία βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον έχει αυξηθεί σημαντικά. Ακόμη και τα Zn, Fe, Mn και Cu που είναι απαραίτητα στοιχεία για τον ανθρώπινο μεταβολισμό, μπορεί να γίνουν επικίνδυνα όταν τα επίπεδά τους υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια. Στην Ελλάδα, οι περιοχές που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ρύπανση

από βαρέα μέταλλα είναι οι βιομηχανικές περιοχές στην Αθήνα (Ελευσίνα), τη Θεσσαλονίκη, την Καβάλα (λόγω της βιομηχανίας φωσφορικών λιπασμάτων), το Λαύριο, ο Βόλος και άλλες παρόμοιες περιοχές.

1.2 Βαρέα μέταλλα στο έδαφος

Το έδαφος αποτελεί βασικό στοιχείο των χερσαίων οικοσυστημάτων, είτε πρόκειται για φυσικά περιβάλλοντα είτε για γεωργικές εκτάσεις. Αναπόσπαστο για την ανάπτυξη των φυτών και τη διάσπαση της νεκρής οργανικής ύλης, το έδαφος απαρτίζεται από ένα σύνθετο μείγμα ανόργανων και οργανικών υλικών σε μορφή στερεών, υγρών και αερίων στοιχείων. Αυτή η ποικιλόμορφη δομή παρέχει ιδανικό περιβάλλον για πολλούς οργανισμούς και αποτελεί το μέσο στο οποίο γίνεται η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των φυτών, εξασφαλίζοντας έτσι το οξυγόνο τα θρεπτικά συστατικά και το νερό για την ανάπτυξη τους. Το έδαφος είναι ένα δυναμικό σύστημα που υφίσταται συνεχείς διακυμάνσεις στην υγρασία, το pH και τις οξειδοαναγωγικές συνθήκες, αντιδρώντας στις αλλαγές του περιβάλλοντος με την πάροδο του χρόνου (Alloway, 1995). Η διαχείριση του εδάφους συνδέεται στενά με την ποιότητα του περιβάλλοντος, την οικονομική δραστηριότητα και τις κοινωνικοοικονομικές συνθήκες. Απαιτείται έτσι, η ανάπτυξη εθνικών και διεθνών πολιτικών για την προστασία του εδάφους (Αλιφραγκής, 2008). Τα κριτήρια για την αειφορική χρήση του εδάφους περιλαμβάνουν τη διασφάλιση μακροπρόθεσμης παραγωγικότητας, την αποτελεσματική χρήση των πόρων του εδάφους ώστε να υπάρχει ελάχιστο κόστος για το περιβάλλον, την πρόβλεψη των πιθανών αλλαγών των ιδιοτήτων λόγω της διαχείρισης του εδάφους καθώς και τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών του για τη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος μέσω συνεχούς προσαρμογής της διαχείρισης στις μεταβαλλόμενες συνθήκες (Αλιφραγκής, 2002).

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει πλέον η ρύπανση του περιβάλλοντος λόγω της αύξησης των δραστηριοτήτων του ανθρώπου που με την συνεχή ανάπτυξη της οικονομίας και της κοινωνίας, έχουν οδηγήσει σε αυξανόμενη ρύπανση με βαρέα μέταλλα στο έδαφος (Zhai et al., 2018). Η ρύπανση του εδάφους οδηγεί στη μείωση της ικανότητας του εδαφικού οικοσυστήματος να εκτελεί τις βασικές του λειτουργίες,

με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του εδάφους και την ανατροπή της ισορροπίας του οικοσυστήματος. Η τοξικότητα των μετάλλων και άλλων χημικών ενώσεων στο έδαφος εξαρτάται από πολλούς καίριους παράγοντες, που επηρεάζουν τις διάφορες χημικές αντιδράσεις και τις ιδιότητες των ενώσεων. Στο πλαίσιο αυτό, οι κύριοι παράγοντες είναι το pH, με το οποίο επιδρούν τα μεταλλικά ιόντα, η παρουσία οργανικής ύλης, το δυναμικό οξειδοαναγωγής και η περιεκτικότητα σε οξείδια και υδροξείδια αργιλίου, σιδήρου και μαγγανίου τα οποία επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα των μετάλλων στο έδαφος καθώς επίσης παίζουν ρόλο στην επίδραση των μετάλλων στο έδαφος και την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (Μήτσιος, 2004).

Οι ρυπασμένες περιοχές χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά υψηλές τιμές pH και αυξημένη τοξικότητα που οφείλεται στις υψηλές συγκεντρώσεις μεταλλοειδών και μετάλλων. Σημαντική είναι επίσης η απουσία λεπτόκοκκων υλικών καθώς και η κατανομή των κόκκων που εμποδίζει την ανάπτυξη των φυτών. Χαρακτηριστική επίσης είναι η πενία θρεπτικών στοιχείων (άζωτο, φώσφορος) που μπορεί να οδηγήσει σε παντελή έλλειψη οργανικών ουσιών. Αυτά έχουν ως απόρροια καλλιεργούμενα ειδή φυτών να μην μπορούν να αναπτυχθούν κανονικά, με αποτέλεσμα η γεωργική παραγωγή να είναι φθίνουσα όπως και η ποιότητα των προϊόντων (Zhao et al., 2022). Τέλος, μια ακόμα επίπτωση είναι η μειωμένη δραστηριότητα των μικροοργανισμών του εδάφους, με αποτέλεσμα οι βιολογικές διεργασίες όπως αμμωνιοποίηση, η χουμοποίηση και η νιτροποίηση να επιβραδύνονται. Αποτέλεσμα αυτού είναι οι φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους να επηρεάζονται. Η κίνηση των θρεπτικών στοιχείων, η αποικοδόμηση τοξικών ουσιών όπως τα γεωργικά φάρμακα να είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα (Alifragkis et al., 2012, Αλιφραγκής, 2014).

Ως συγκέντρωση βαρέων μετάλλων σε ένα έδαφος ορίζεται το άθροισμα των συγκεντρώσεων των στοιχείων προερχόμενα από ορυκτά του μητρικού υλικού πάνω στο οποίο έχει αναπτυχθεί το έδαφος καθώς και τις προσθήκες που προέρχονται από δραστηριότητες του ανθρώπου (Alloway, 2010). Τα βαρέα μέταλλα εμφανίζονται φυσικά στο έδαφος από τις διεργασίες της αποσάθρωσης του μητρικού υλικού σε επίπεδα που μπορεί να θεωρηθούν ίχνη ($<1000 \text{ mg kg}^{-1}$) έως και τοξικά (KabataPendias, 2001). Αυτό που ξεχωρίζει τις ανθρωπογενείς πηγές βαρέων μετάλλων

από τις φυσικές είναι το γεγονός πως τα εδάφη αυτά τείνουν να έχουν μεγαλύτερη κινητικότητα και ως εκ τούτου έχουν μεγαλύτερη βιοδιαθεσιμότητα σε σχέση με αυτά της λιθογενούς προέλευσης (Kaasalainen και Yli-Halla, 2003). Η εξόρυξη και η μεταφορά ορυκτών, η σύντηξη και ο εξευγενισμός των μεταλλευμάτων αποτελούν σημαντικές πηγές ρύπανσης. Σημαντικό μέρος σε αυτές είναι η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από ορυκτά καύσιμα. Μεγάλες ποσότητες Pd, Zn και Cu προέρχονται από τις χαλυβουργίες, καθώς και από τις βιομηχανίες παραγωγής μετάλλων (Khan et al., 2008). Σημαντικό ποσοστό προέρχεται από τις γεωργικές πρακτικές, που έχουν εφαρμογές με βάση τα ορυκτά λιπάσματα, την εφαρμογή φυτοφαρμάκων και ζιζανιοκτόνων.

Διακρίνονται διάφορες περιπτώσεις αναφορικά με τη βιοδιαθεσιμότητα των βαρέων μετάλλων και την απορρόφηση τους από τα φυτά. Κάποια μπορεί να βρίσκονται σε διαλυτή μορφή ή σε ανταλλάξιμες μορφές, επιτρέποντας την εύκολη απορρόφησή τους από τα φυτά. Άλλα, μέσω της δέσμευσης τους στις οργανικές ουσίες του εδάφους μπορεί να μην είναι άμεσα διαθέσιμα για απορρόφηση, αλλά με την παρέλευση του χρόνου και τη δράση των μικροβιακών κοινοτήτων και άλλων φυσικοχημικών διεργασιών να γίνονται διαθέσιμα. Τέλος, κάποια βαρέα μέταλλα σχηματίζουν σύμπλοκα με συστατικά του εδάφους, καθιστώντας τα μη διαθέσιμα για απορρόφηση.

1.3 Βαρέα μέταλλα στο φυτό

1.3.1 Είσοδος και μεταφορά εντός του φυτού

Η μετακίνηση των βαρέων μετάλλων προς το ριζικό σύστημα των φυτών επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως οι φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους, η ποσότητα των τοξικών μετάλλων, η μορφή τους, οι συνθήκες pH, θερμοκρασίας, υγρασίας, αερισμού, καθώς και το είδος του φυτού και το στάδιο ανάπτυξής του (Μήτσιος, 2004).

Η ριζόσφαιρα είναι η στενή περιοχή του εδάφους που περιβάλλει τις ρίζες του φυτού και επηρεάζεται άμεσα από τις φυτικές εκκρίσεις. Περιέχει μικροοργανισμούς (βακτήρια και μύκητες), ορισμένοι από τους οποίους μπορούν να δημιουργήσουν

συμβιωτική σχέση με το φυτό και μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες: (i) μικροοργανισμοί που επηρεάζουν τόσο την κινητικότητα των μετάλλων όσο και τη βιοδιαθεσιμότητα τους επηρεάζοντας την ποσότητα των μετάλλων που προσλαμβάνουν τα φυτά και (ii) μικροοργανισμοί που βελτιώνουν την φυσική κατάσταση των φυτών απελευθερώνοντας ουσίες που προάγουν την ανάπτυξη (Q. Yang et al., 2012), (S. Luo et al., 2012). Τα βακτήρια επηρεάζουν τη βιοδιαθεσιμότητα και την κινητικότητα των μετάλλων τροποποιώντας το pH του εδάφους, παράγοντας σιδηροφόρα και οργανικά οξέα (Rajkumar et al., 2012). Τα σιδηροφόρα είναι ενώσεις χαμηλού μοριακού βάρους (400–1000 kDa) που σχηματίζουν σύμπλοκα με μέταλλα όπως Fe, Zn, Pb, Al και Cd και διαλυτοποιούν μη διαθέσιμες μορφές μετάλλων, κάνοντας τα διαθέσιμα για πρόσληψη από τα μικροβιακά κύτταρα και, έμμεσα, από φυτά (I. J. Schalk et al., 2011).

Τα μέταλλα εισέρχονται στα φυτικά κύτταρα μέσω διαδικασιών όπως η απλή διάχυση μέσα από μη εξειδικευμένους πόρους ή ιοντικών καναλιών που μεταφέρουν ιόντα όπως το ασβέστιο, το κάλιο και το νάτριο. Επιπλέον, είναι εφικτή η είσοδος μετάλλων μέσω δευτερογενούς ενεργού μεταφοράς, με τη χρήση πρωτεϊνικών μεμβρανικών μεταφορέων (Taiz et al., 2016). Οι διαλυτοποιημένες ουσίες απορροφώνται από το έδαφος και μέσω αποπλαστικής μεταφοράς εισχωρούν στο εσωτερικό της ρίζας. Όταν πρέπει να μετακινηθούν προς τα πάνω στα υψηλότερα σημεία του φυτού, η μεταφορά τους συνήθως συνδυάζεται με συμπλαστική μεταφορά (Taiz et al., 2016). Για τη μεταφορά των μετάλλων τρεις διαδικασίες είναι αυτές που επιτελούν τη διαδικασία στα φυτικά κύτταρα: η αποπλαστική μετακίνηση στα κύτταρα του φλοιού της ρίζας, η μετάπτωση σε συμπλαστική μετακίνηση κατά τη διαδρομή μέσα στη ρίζα, και η είσοδος των ιόντων στο ξύλωμα που εμπλέκει πρωτεϊνικούς μεταφορείς (Taiz et al., 2016). Οι μεμβράνες και οι αντίστοιχοι μεταφορείς επιτελούν τον έλεγχο της διαδρομής των μετάλλων από το έδαφος ως τα υψηλότερα τμήματα των φυτών και τα οποία είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα. Η συσσώρευση στο χυμοτόπιο διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στους εν λόγω ιστούς λόγω του μεγάλου αριθμού μεμβρανικών μεταφορέων στον τονοπλάστη (Καραμπουρνιώτης et al., 2012).

1.3.2 Προβλήματα που προκαλούνται στο φυτό

Άμεσες τοξικές επιδράσεις περιλαμβάνουν παρεμβάσεις στο μεταβολισμό των φυτών και τη βλάβη των κυτταρικών δομών λόγω οξειδωτικού στρες (Asati et al., 2016). Από την άλλη, η έμμεση τοξική επίδραση αφορά στην αντικατάσταση των ουσιαστικών θρεπτικών στοιχείων στους ιστούς των φυτών στις θέσεις ανταλλαγής κατιόντων. Επίσης, η αρνητική επίδραση στους μικροοργανισμούς του εδάφους επηρεάζει έμμεσα την ανάπτυξη των φυτών καθώς λόγω της μείωσης του πληθυσμού τους μειώνεται και ο ρυθμός αποσύνθεσης της οργανικής ύλης, με αποτέλεσμα τη μειωμένη γονιμότητα του εδάφους. Άλλες μεταβολικές δυσλειτουργίες προκύπτουν από προβλήματα στην είσοδο και έξοδο ιόντων όπως Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- και K^+ μέσω των μεμβρανών. Αυτά τα τοξικά αποτελέσματα, οδηγούν σε μη αποτελεσματική αύξηση των φυτών, με αποτέλεσμα πολλές φορές τον θάνατο τους (Schaller et al., 1991).

Η επίδραση στα φυτά διαφέρει ανάλογα με το χημικό στοιχείο. Μέταλλα όπως το Hg, As, Pb και Cd οδηγούν σε σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις, ακόμα και όταν βρίσκονται σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις στο έδαφος. Χαρακτηριστικά, παρατηρήθηκε σημαντικός περιορισμός του ύψους φυτών ρυζιού που αναπτύσσονταν σε χώμα που είχε μολυνθεί με μόλις 1 mg Hg/kg, ενώ το Cd μειώνει την ανάπτυξη των φύλλων και των ριζών φυτών σιταριού ακόμα και σε συγκεντρώσεις μόλις 5 mg/L στο έδαφος (Ahmad et al., 2012).

Η ελάττωση της ανάπτυξης των φυτών που αναπτύσσονται σε ρυπασμένα εδάφη οφείλεται κυρίως στη δυσλειτουργία της φωτοσυνθετικής αλυσίδας μεταφοράς ηλεκτρονίων αλλά και της αναπνοής με την ανάλογη πτώση της διαθέσιμης ενέργειας, και της μειωμένης δραστηριότητας ορισμένων ενζύμων. Τόσο η έλλειψη όσο και η υπερβολική διαθεσιμότητα ορισμένων ιόντων βαρέων μετάλλων ως ουσιώδη μικροθρεπτικά στοιχεία έχουν αρνητικές επιπτώσεις, ενώ σε υψηλότερες συγκεντρώσεις είναι ιδιαίτερα επιβλαβή για τις μεταβολικές δραστηριότητες.

1.3.3 Μηχανισμοί άμυνας του φυτού

Πολλά φυτά είναι δυνατό να επιβιώσουν και να πολλαπλασιαστούν ακόμα και υπό τις υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων (Orcutt και Nilsen, 2000), μέσω δύο στρατηγικών:

- Στρατηγική της αποφυγής: Τα φυτά αναπτύσσουν μηχανισμούς που επιτρέπουν τη δέσμευση και εξουδετέρωση των τοξικών μεταλλικών ιόντων στο περιβάλλον της ριζόσφαιρας. Αυτό συμβαίνει είτε με τη χρήση χηλικών ενώσεων που εκκρίνονται από τα κύτταρα της ρίζας είτε με την απόκλιση των μετάλλων στο εξωτερικό περιβάλλον, λόγω της υψηλής εκλεκτικότητας των κυττάρων της ρίζας (Καππάτος, 2015, Καραμπουρνιώτης, 2003)
- Στρατηγική της ανθεκτικότητας: Ορισμένα φυτά, γνωστά ως μεταλλόφυτα, αναπτύσσουν γενετικά καθορισμένους μηχανισμούς για να αντιμετωπίσουν τα προβλήματα που προκαλούνται από τις υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων. Αυτοί οι μηχανισμοί περιλαμβάνουν την ενεργοποίηση γενετικών διαδικασιών που βοηθούν στη μείωση της εσωτερικής επίδρασης των μετάλλων στο φυτό (McGrath et al. 2002, Καραμπουρνιώτης, 2003).

1.4 Κατηγορίες φυτών με βάση την αφομοίωση των βαρέων μετάλλων

Ορισμένα φυτά, γνωστά ως μεταλλόφυτα, αναπτύσσονται αποκλειστικά σε εδάφη που περιέχουν μεγάλες συγκεντρώσεις μετάλλων, ενώ άλλα μπορούν να αναπτύσσονται και σε μη μεταλλοφόρα εδάφη (Orcutt, 2000). Η κατηγοριοποίηση των μεταλλόφυτων βασίζεται στις συγκεντρώσεις μετάλλων στα υπέργεια μέρη τους και την αύξηση των συγκεντρώσεων αυτών στο έδαφος. Η πρώτη ομάδα, οι απαγορευτές, απορροφούν μέταλλα και τα κατανέμουν στα υπέργεια τμήματα του φυτού μέχρι ενός συγκεκριμένου ορίου. Στη δεύτερη ομάδα, τους δείκτες, η απορρόφηση μετάλλων είναι συνδεδεμένη γραμμικά με την εδαφική συγκέντρωση. Τέλος, οι συσσωρευτές, μπορούν να συσσωρεύσουν υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων που υπερβαίνουν αυτές που υπάρχουν στο έδαφος (Κελεπερτζής και Μητρόπουλος, 1995; Orcutt, 2000, Lasat, 2000, Ghosh, 2005).

Αυτά τα φυτά είναι ικανά να συγκεντρώνουν σημαντικές ποσότητες βαρέων μετάλλων στους ιστούς τους, ορισμένες φορές ακόμα και πάνω από το 2% της ξηρής βιομάζας τους. Αυτές οι συγκεντρώσεις υπερβαίνουν σημαντικά τις φυσιολογικές ανάγκες για την ανάπτυξη τους. (Αλιφραγκής, 2015). Αυτά ονομάζονται υπερσυσσωρευτές ή υπερβιοσυσσωρευτές και πρωτοανακαλύφθηκαν σε περιοχές με έντονη μεταλλευτική δραστηριότητα. Για τον χαρακτηρισμό των ειδών ως υπερβιοσυσσωρευτές, εκτός από τη συσσώρευση μετάλλων στους ιστούς, χρησιμοποιούνται τα κριτήρια του συντελεστή βιοσυσσώρευσης και του συντελεστή μεταφοράς. Ο συντελεστής βιοσυσσώρευσης αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης ενός στοιχείου στους φυτικούς ιστούς και στο έδαφος, ενώ ο συντελεστής μεταφοράς μετρά τη συγκέντρωση του στοιχείου στο υπέργειο μέρος σε σχέση με τις ρίζες (Zhao et al., 2003; Αλιφραγκής, 2015). Οι υπερσυσσωρευτές έχουν συνήθως υψηλές τιμές στους συντελεστές αυτούς, που μπορεί να φτάσουν ακόμη και το 50-100 σε ακραίες περιπτώσεις (Zhao et al., 2003). Επίσης να έχουν προσαρμοστικότητα στο περιβάλλον, εύκολη αναπαραγωγή και μεγάλο ριζικό σύστημα, την αυξημένη βιομάζα, ανθεκτικότητα στις τοξικές επιδράσεις των βαρέων μετάλλων και μεγάλο συντελεστή μεταφοράς των μετάλλων από τις ρίζες προς το υπέργειο τμήμα του φυτού. (Mahar et al., 2016; Evangelou et al., 2007).

1.5 Τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών από βαρέα μέταλλα

Τα βαρέα μέταλλα αποτελούν σοβαρό πρόβλημα διότι δεν μπορούν να καταστραφούν μέσω αποσύνθεσης στο έδαφος. Για το λόγο αυτό γίνεται αναγκαία η αποκατάστασή του εδάφους. Τα ρυπασμένα εδάφη μπορούν να αποκατασταθούν με ex-situ φυσικές και χημικές μεθόδους όπως έκπλυση του εδάφους, φυσική ή μηχανική απομάκρυνση του ρυπαντή, ηλεκτροχημική επεξεργασία, χημική επεξεργασίας θερμική ή πυρομεταλλουργικής απομάκρυνσης και βιοχημικών διαδικασιών (Cunningham et al., 1995, Mulligan et. al., 2001, Hashim et. al., 2011, Tangahu et. al., 2011). Η χρήση των περισσότερων από αυτές τις τεχνικές απαιτεί υψηλό κόστος, μεγάλο χρονικό διάστημα, και έχει τεχνική πολυπλοκότητα. Πολλές από αυτές προκαλούν και εδαφολογικές διαταραχές (Ghosh and Singh, 2005, Khan, 2005). Λύση σε όλα αυτά έρχεται να δώσει

η βιοεξυγίανση, μια καινοτόμος τεχνολογία που είναι διαθέσιμη για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων με πολλά οφέλη.

Η μέθοδος της βιοεξυγίανσης ή βιοαπορρύπανσης για την αποκατάσταση των εδαφών είναι βασισμένη στη δράση οργανισμών καθώς και των προϊόντων που προκύπτουν από το μεταβολισμό τους. Απώτερος σκοπός είναι η μετατροπή ουσιών που είναι επικίνδυνες για το περιβάλλον σε ακίνδυνα προϊόντα (Vidali, 2001, Prasad και Freitas, 2003).

Τεχνολογίες	Εφαρμοσιμότητα
Επεξεργασίες Συγκράτησης	
Φυσικές	Καλύμματα ΧΥΤΑ και φράγματα
Ενθυλάκωση	Έκχυση στερεοποιητικών χημικών ουσιών
Υαλοποίηση	Ρηχά εδάφη, χαμηλής πτητικότητας μέταλλα
Ex- situ επεξεργασίες	
Φυσικός διαχωρισμός	Για υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων
Πλύση εδάφους	Για υδατοδιαλυτούς ρύπους
Πυρομεταλλουργικός διαχωρισμός	Για ιδιαίτερα ρυπασμένα εδάφη 5-20%
In –situ επεξεργασίες	
Ενεργά φράγματα	Ρόφηση ή αποδόμηση των ρύπων στο φράγμα
Εδαφική έκπλυση	Για διαλυτούς ρύπους
Ηλεκτροκινητικές μέθοδοι	Για κορεσμένα εδάφη με χαμηλή ροή υπόγειων υδάτων
Φυτοεξυγίανση	Ρηχά εδάφη και αυξημένη ποσότητα νερού

Πίνακας 3: Διάφορες μέθοδοι αποκατάστασης του εδάφους από βαρέα μέταλλα (Mulligan et al., 2001)
Αναλόγως τη συνθήκη εδάφους, ρύπου, ρύπανσης, περιοχής και οικονομικής κατάστασης, επιλέγεται και η κατάλληλη τεχνική.

1.5.1 Φυτοαποκατάσταση

Η φυτοεξυγίανση, ή αλλιώς φυτοαποκατάσταση, είναι μία από τις τεχνικές της βιοεξυγίανσης. Οικονομική, αποτελεσματική, περιβαλλοντικά φιλική και «πράσινη» τεχνολογία, προσφέρει τα οφέλη μιας in situ τεχνικής. Βασίζεται στη χρήση φυτών και

των συνδεδεμένων με αυτά μικροοργανισμών (Kadukova et al., 2008) για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων και τοξικών ενώσεων από τη βιόσφαιρα. Στους μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται συγκαταλέγονται η ριζοαποδόμηση, η ριζοδιήθηση, η φυτοαποδόμηση, η φυτοεξάτμιση, η φυτοεξαγωγή και η φυτοσταθεροποίηση. Μέσω αυτών των μηχανισμών, είναι δυνατό να αντιμετωπιστούν ραδιενεργά στοιχεία, βαρέα μέταλλα και οργανικές ενώσεις.

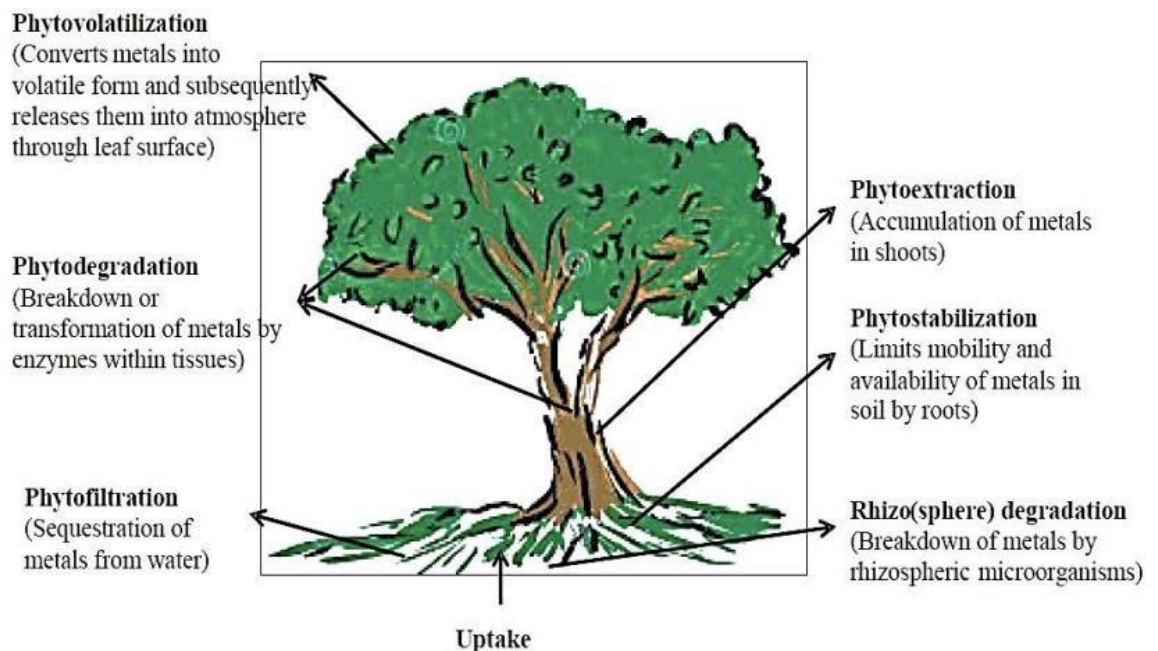
Η φυτοσταθεροποίηση βασίζεται σε φυτικά είδη που ακινητοποιούν ρύπους του εδάφους (συνήθως μετάλλων). Αυτό γίνεται μέσω της εισόδου και της συσσώρευσής τους στις ρίζες των φυτών όπου και ακινητοποιούνται (Αλιφραγκής, 2015). Στην περίπτωση αυτή γίνεται στα κυτταρικά οργανίδια του φυτικού κυττάρου όπως τα χυμοτόπια (Baker, 1987), (Wu et al., 1975). Ένας άλλος μηχανισμός ακινητοποίησης είναι ο σχηματισμός οργανομεταλλικών συμπλόκων (Curvetto and Rauser, 1979). Στην περίπτωση αυτή τα φυτά παράγουν στις ρίζες οργανικές ενώσεις (πρωτεΐνες και ένζυμα) και ενώνονται με τα μέταλλα. Οι ενώσεις αυτές είναι αδιάλυτες, μη βιοδιαθέσιμες μορφές και συνήθως ακινητοποιούνται στη ριζόσφαιρα. Τα φυτά επίσης βοηθούν, σε ορισμένες περιπτώσεις έμμεσα, στην καταβύθιση των μετάλλων ή ακόμη και στην οξείδωσή τους, με αποτέλεσμα στις περισσότερες περιπτώσεις να μειώνεται η τοξικότητά τους (Pivetz, 2001).

Κατά τη διαδικασία της ριζοδιήθησης, επιλέγονται φυτά των οποίων οι ρίζες απορροφούν και ακινητοποιούν τους ρύπους που υπάρχουν είτε στο έδαφος είτε σε υδάτινα οικοσυστήματα. Εφαρμόζεται κυρίως για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων με χαμηλές συγκεντρώσεις ρύπων και είναι αποτελεσματική σε περιβάλλοντα όπου δημιουργούνται τεχνητοί υγρότοποι. (Prasad και Freitas, 2003). Είναι οικονομικά αποδοτική στην εφαρμογή της για την απομάκρυνση χαμηλών αλλά σημαντικών ποσοτήτων βαρέων μετάλλων όπως ψευδάργυρου (Zn), μόλυβδου (Pb) και χρώμιου (Cr) από εδαφικά διαλύματα ή υδάτινα οικοσυστήματα. (Ensley, 2000).

Η φυτοεξαγωγή είναι μια τεχνική φυτοεκκαθάρισης των εδαφών, η οποία βασίζεται στη χρήση φυτών που μπορούν να υπερσυσσωρεύσουν μέταλλα και μεταλλοειδή στα υπέργεια μέρη τους. Αυτά τα μέταλλα στη συνέχεια μπορούν να

ανακτηθούν και να απομακρυνθούν από το περιβάλλον. (Kidd et al., 2009). Παρόλο που η τεχνική της φυτοεξαγωγής είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για την απορρύπανση των εδαφών, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι απαιτεί χρόνο λόγω της χαμηλής διαθεσιμότητας των μετάλλων στο έδαφος.

Για την επιτυχή εφαρμογή ενός συστήματος φυτοαποκατάστασης είναι απαραίτητο να πληρούνται ορισμένα κριτήρια, όπως το μικρό βάθος ρύπανσης. Επιπλέον, είναι κρίσιμης σημασίας η σωστή επιλογή και καλλιέργεια των φυτών, η συνεχής παρακολούθηση του συστήματος και η αποτελεσματική διαχείριση της ρυπασμένης βιομάζας. Κατά τη διαδικασία αυτή, τα φυτά λειτουργούν ως συσσωρευτές των ρύπων, συγκρατώντας ή απομακρύνοντας μέταλλα ή οργανικές ουσίες από το έδαφος, τα οποία συγκεντρώνονται στα ανακτηθέντα τμήματα των φυτών (Kadukova et al., 2008).



Εικόνα 1: Μηχανισμοί φυτοαποκατάστασης εδαφών από βαρέα μέταλλα (Sumiahadi et al., 2018)

1.5.2 Χρήση προσροφητικών υλικών

Τα μέταλλα συνήθως παρουσιάζονται σε χημικές μορφές με χαμηλή διαλυτότητα, κάτι που καθιστά δύσκολη την πρόσληψή τους από τα φυτά. Για να βελτιωθεί η διαδικασία της φυτοεξαγωγής, έχουν εφαρμοστεί διάφοροι παράγοντες/ουσίες στο έδαφος, με στόχο την αύξηση της διαλυτότητας των μετάλλων (Sheoran et al. 2011, McGrath et

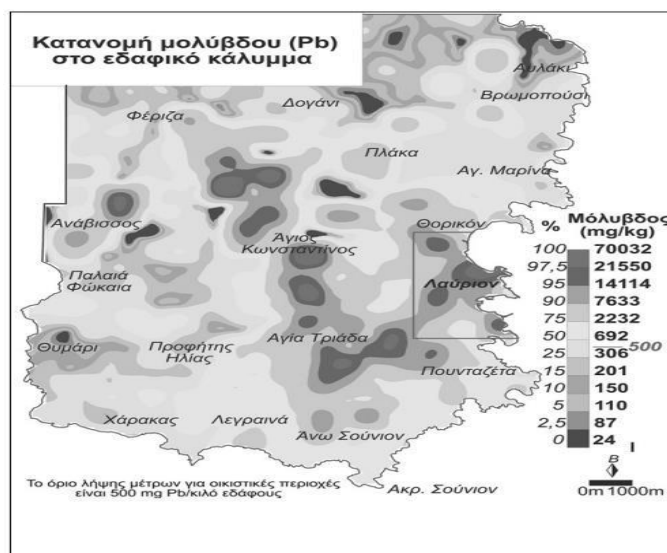
al. 2002). Ένας από αυτούς είναι και το EDTA. Το EDTA είναι ένα είδος αμινοπολυκαρβοξυλικού οξέος με ιδιαίτερα ισχυρή ικανότητα σχηματισμού σύμπλοκων, το οποίο αποτελεί αποτελεσματικό εργαλείο για την εξαγωγή των τοξικών μετάλλων από τις επιφάνειες του εδάφους. Επιπλέον, η χρήση του κομπόστ ως εδαφοβελτιωτικού παίζει ένα κρίσιμο ρόλο στη διαδικασία της φυτοεξυγίανσης. Το κομπόστ είναι το προϊόν της ελεγχόμενης διαδικασίας αποδόμησης οργανικών υλικών μέσω της αερόβιας αναγωγής από ετερότροφους μικροοργανισμούς. Η προσθήκη κομπόστ σε εδάφη που έχουν ρυπανθεί από βαρέα μέταλλα μπορεί να επιφέρει θετικές αλλαγές στη βιολογική τους κατάσταση. Αυτό συμβαίνει μέσω μιας ποικιλίας χημικών, φυσικών και βιολογικών διεργασιών, όπως η δημιουργία αναερόβιων συνθηκών, η διευκόλυνση της ανάπτυξης αναγωγικών βακτηρίων και μικροοργανισμών, καθώς και η προσφορά ενός πλούσιου οργανικού υποστρώματος (Τσιτσέλης, 2009). Τέλος, ο ζεόλιθος χρησιμοποιείται ευρέως ως οικονομικό απορροφητικό υλικό. Από χημική άποψη ανήκει σε μια ειδική κατηγορία υδροξυλικών ορυκτών, που περιλαμβάνουν αργίλιο και αλκαλικές γαίες. Ο ζεόλιθος έχει εφαρμοστεί σε ποικίλες περιβαλλοντικές εφαρμογές, όπως και η απορρόφηση βαρέων μετάλλων, λόγω της μεγάλης του ικανότητας για ιοντοανταλλαγή (Τσιτσέλης, 2009).

1.6 Το έδαφος του Λαυρίου

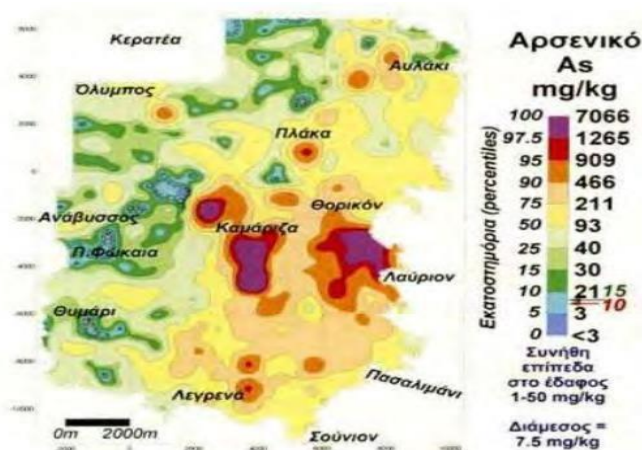
Η Λαυρεωτική Χερσόνησος, μια βιομηχανική περιοχή που απέχει 55 χιλιόμετρα από την Αθήνα, βρίσκεται στο νότιο άκρο του Νομού Αττικής και έχει πληθυσμό άνω των 25.000 κατοίκων, σύμφωνα με την απογραφή του 2021 (ΕΛΣΤΑΤ, 2021), καλύπτοντας μια έκταση 176 τ.χλμ. Κατά κύριο λόγο είναι μία άνυδρη περιοχή με λόφους και σχεδόν άγονη. Αποτελεί μια από τις πιο μολυσμένες βιομηχανικές περιοχές της χώρας, προκαλώντας έντονα το ερευνητικό ενδιαφέρον. Η ρύπανση στη Λαυρεωτική ξεκίνησε πριν από το 3500 π.Χ., από τότε που ξεκίνησαν οι μεταλλευτικές και μεταλλουργικές δραστηριότητες στη χερσόνησο, τελειώνοντας το 1989 μ.Χ. (Demetriades, 2011). Η μεγαλύτερη ρύπανση σημειώθηκε από τις αρχές του 1865 επιφέροντας σημαντικές μεταβολές στο γεωλογικό περιβάλλον της Λαυρεωτικής Χερσονήσου μέσω της έντονης παρουσίας σωρών απορριμμάτων, περιλαμβανομένων θειούχων και ανθρακικών ενώσεων, καθώς και μεταλλουργικών σκωριών και πυρίτη. Η πόλη του Λαυρίου είναι

χτισμένη πάνω σε υλικά και αποθέσεις που παρήχθησαν κατά την πολυετή εκμετάλλευση των ορυχείων. Επιπλέον, η θραύση βαρέων μετάλλων και η είσοδος τους στα υπόγεια και επιφανειακά νερά, συνολικά με τη μεταφορά σκόνης με την επίδραση των ανέμων, ενίσχυσαν τη διαδικασία εξάπλωσης της ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή.

Σύμφωνα με επιδημιολογικές μελέτες και έρευνες που πραγματοποιήθηκαν τη δεκαετία του 1980, το 80% της εκτάσεως του Λαυρίου παρουσιάζει ρύπανση από κάδμιο (Cd), νικέλιο (Ni), αρσενικό (As), χαλκό (Cu), χρώμιο (Cr), μόλυβδο (Pb), αντιμόνιο (Sb) και ψευδάργυρο (Hg) σε συγκεντρώσεις πολύ μεγαλύτερες των παγκόσμια θεσπισμένων ορίων και ταυτόχρονα το 90% των παιδιών της περιοχής έχει παρουσιάσει υψηλά ποσοστά μόλυβδου στο αίμα τους, υπέρ του ανώτατου αποδεκτού ορίου. Πιο συγκεκριμένα, στο 95% των δειγμάτων τα όρια ασφαλείας είχαν ξεπεραστεί. Το όριο ασφαλείας είναι 10mg/100ml, με μέση τιμή τα 19.24mg/100ml (διακύμανση 5.98-60.49mg/100 ml). Στο αίμα των παιδιών από περιοχή-μάρτυρα (Λουτράκι) καταγράφηκε μία μέση τιμή 5.14 mg/100 ml (διακύμανση 1.33-13.58 mg/100ml) (Makropoulos et al., 1991) .



Εικόνα 2: Παρατηρούμε στην εικόνα την κατανομή του ολικού μόλυβδου (Pb) που υπάρχει στο επιφανειακό έδαφος (0- 10 cm) της Λαυρεωτικής χερσονήσου (Δημητριάδη 2000, Σχ. 1.3, σελ. 1.3).



Εικόνα 3: Παρατηρούμε τις συγκεντρώσεις του αρσενικού που υπάρχουν στο έδαφος της περιοχής του Λαυρίου (Μαρμάνη & Μαρμάνη, 2007)



Εικόνα 4: Παρατηρείται η γεωγραφική κατανομή του μολύβδου στο αίμα που πάρθηκε από παιδιά του Λαυρίου (n=235) (Δημητριάδη 2000).

Αυτά τα υψηλά ποσοστά στην περιοχή του Λαυρίου έχουν συσχετιστεί μέσω μελετών με νοητικές και αναπτυξιακές δυσλειτουργίες των παιδιών της περιοχής (Δημητριάδης, 2000).

1.7 Η περίπτωση της γλιστρίδας

Η γλιστρίδα ή αντράκλα (*Portulacaoleracea*) είναι μέλος της οικογένειας *Portulacaceae* και ανήκει στην τάξη Καρυοφυλλώδη (*Caryophyllales*) και στην Ελλάδα είναι γνωστή με πολλές ονομασίες όπως αντραχλίδα, χοιροβότανο ή σκλιμίτσα

και τρευλό. Αναπτύσσεται σε όλους τους τύπους εδάφους, ιδίως στα άγονα. Παρουσιάζει ανθεκτικότητα στην ξηρασία και τις ασθένειες. Το φυτό ανθίζει και καρποφορεί καθ' όλη τη διάρκεια της ανάπτυξής του. Είναι ετήσιο φυτό με σαρκώδη βλαστούς που φτάνουν έως τα 30 εκατοστά σε ύψος. Τα φύλλα της γλιστρίδας είναι γυαλιστερά και παχιά με χαρακτηριστικό σκούρα πράσινα χρώματα και ωοειδές σχήμα και τοποθετούνται αντίθετα και κατ' εναλλαγή. Οι βλαστοί του είναι είτε πολύκλαδοι και ερπυστικοί σε ορισμένες περιπτώσεις είτε όρθιοι, και χαρακτηρίζονται από τη λεία τους επιφάνεια και τον χαρακτηριστικό κόκκινο χυμό που παράγουν (Καλαϊτζή, 2004).

Η γλιστρίδα ήταν γνωστή για τις ιατρικές της ιδιότητες εδώ και πολλά χρόνια. Προτείνεται η χρήση της γλιστρίδας ως φαρμακευτικό μέσο για πολλές παθήσεις, όπως η καρδιακή ανεπάρκεια, το σκορβούτο, ο πονόλαιμος και ο πόνος στα αφτιά. Θεωρείται ιδιαίτερα θρεπτική, καθώς περιέχει σημαντικές ποσότητες ωμέγα-3 φυτικών λιπαρών οξέων, το άλφα-λινολεϊνικό ή LNA, σε ποσότητες που είναι περίπου 15 φορές περισσότερες από ό,τι τα μαρούλια. Μια μερίδα γλιστρίδας μπορεί να καλύψει τις ημερήσιες ανάγκες σε βιταμίνη E και γλουταθειόνη, η οποία έχει ισχυρή αντιοξειδωτική δράση. Επιπλέον, η βιταμίνη E και τα ωμέγα-3 λιπαρά οξέα είναι γνωστά για την προστασία ενάντια σε καρδιαγγειακά προβλήματα, φλεγμονώδεις παθήσεις και ακόμα και καρκίνο. Περιέχει επίσης, φώσφορο, μαγνήσιο, σίδηρο, ασβέστιο κάλιο, βιταμίνη A, C, B και καροτενοειδή (Καλαϊτζή, 2004).

Σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα, η γλιστρίδα ενώ έχει μικρή βιομάζα και σύντομο κύκλο ζωής, παρουσιάζει σημαντική βιοσυσσωρευτική ικανότητα από το έδαφος (Chami et al, 2013).

Σκοπός της Εργασίας

Η φυτοαποκατάσταση αποτελεί μια οικονομικά αποδοτική και περιβαλλοντικά βιώσιμη λύση, ενώ ταυτοχρόνως είναι ένα παράδειγμα πράσινης τεχνολογίας που συμβάλλει στη βιώσιμη διαχείριση των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Το πείραμά μας εντάχθηκε στο πλαίσιο της φυτοαποκατάστασης, καθώς εξετάσαμε την επίδραση συγκεκριμένων

εδαφοβελτιωτικών υλικών στην ανάπτυξη της γλιστρίδας, η οποία καλλιεργήθηκε σε χώμα προερχόμενο από την Βιομηχανική Περιοχή του Λαυρίου το οποίο είναι έντονα ρυπασμένο. Στόχος ήταν η διερεύνηση της αποτελεσματικότητάς τους ως προς την βελτίωση της ανάπτυξης και ευρωστίας της γλιστρίδας στο συγκεκριμένο έδαφος. Τα υλικά που εξετάστηκαν ήταν ο ζεόλιθος, το κομπόστ και το EDTA. Η σημαντικότητα αυτού του πειράματος έγκειται στο γεγονός ότι αυτά τα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζικά σε διαδικασίες αποκατάστασης εδαφών, προάγοντας έτσι μια αειφόρο γεωργική παραγωγή η οποία έχει όφελος προς το περιβάλλον και παρέχει ασφάλεια για την ανθρώπινη υγεία.

2. Υλικά και Μέθοδοι

2.1 Γενικά

Οι πειραματικές διαδικασίες πραγματοποιήθηκαν στο θερμοκήπιο της Γεωπονικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην πόλη του Βόλου, και ξεκίνησαν στα μέσα Οκτωβρίου του 2020 και έλειξαν στις αρχές του Ιανουαρίου του 2021.

2.2 Πειραματικός Σχεδιασμός

Η εδαφοληψία (100 Kg) έγινε στα τέλη Αυγούστου εδάφους από την βιομηχανική ζώνη του Λαυρίου. Το έδαφος μεταφέρθηκε στον χώρο του θερμοκηπίου, υπέστη αεροξήρανση και στη συνέχεια κοσκινίστηκε και τοποθετήθηκε σε σακούλες χωρητικότητας 2 lt (η κάθε μία περιείχε 1080gr εδάφους και 800 ml περλίτη). Στις 17/10/2020 έγινε η ανάμιξη του εδαφικού μίγματος και των κατάλληλων ποσοτήτων εδαφοβελτιωτικών (Compost, Ζεόλιθος, EDTA), όπως φαίνεται παρακάτω με την βοήθεια 250ml νερού για κάθε σακουλάκι.

Στις 18/10/2020 έγινε η μεταφύτευση φυτών γλιστρίδας. 100 φυτά γλιστρίδας μεταφυτεύθηκαν σε γλάστρες χωρητικότητας 2 lt. Κάθε εδαφοβελτιωτικό δοκιμάστηκε σε δύο δόσεις των 20gr και 40gr/γλάστρα. Ο μάρτυρας ήταν φυτά που αναπτύσσονταν στο ίδιο εδαφικό μίγμα, χωρίς καμία προσθήκη εδαφοβελτιωτικών. Σε κάθε

μεταχείριση αντιστοιχούν 5 γλάστρες και 2 φυτά/γλάστρα. Ακολουθούν οι μεταχειρίσεις και η κωδικοποίησή τους που χρησιμοποιείται στα γραφήματα.

- 1) Μάρτυρας
- 2) Εδαφικό μίγμα και 20gr EDTA (EDTA20)
- 3) Εδαφικό μίγμα και 40gr EDTA (EDTA40)
- 4) Εδαφικό μίγμα και 20gr Ζεόλιθος (Zeo20)
- 5) Εδαφικό μίγμα και 40gr Ζεόλιθος (Zeo40)
- 6) Εδαφικό μίγμα και 20gr Compost (Compost20)
- 7) Εδαφικό μίγμα και 40gr Compost (Compost40)

Στο επόμενο δεκαπενθήμερο πραγματοποιήθηκαν 4 ψεκασμοί με πιρεθρίνη (σύνολο 4 ml). Ακολούθησαν στο επόμενο δεκαήμερο δύο εφαρμογές βασικής λίπανσης: στην 1η έγινε η προσθήκη 10 μονάδων αζώτου, 18,8 φωσφόρου και 21,2 καλίου και στη 2η 10 μονάδες αζώτου με τη μορφή νιτρικής αμμωνίας.



Εικόνα 5: Μετά την μεταφύτευση των νεαρών φυτών γλιστρίδας.

2.1 Μετρήσεις-Αναλύσεις

2.1.1 Μετρήσεις κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου

Οι μετρήσεις στα φυτά των διάφορων μεταχειρίσεων έγιναν στις 6/11, 17/11, 28/11, 5/12, 12/12 και 20/12 στα φύλλα και των 2 φυτών που αναπτύσσονταν σε κάθε γλάστρα. Ακολουθούν οι φυσιολογικές παράμετροι που μετρούνταν κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου.

Συγκέντρωση ολικών χλωροφυλλών:



Εικόνα 6: Όργανο μέτρησης SPAD-502 για μέτρηση της χλωροφύλλης στα φύλλα.

Η συγκέντρωση των ολικών χλωροφυλλών στα φυτά γλιστρίδας μετρήθηκε με το όργανο SPAD. Πρόκειται για φορητό όργανο που μετράει με μη καταστροφικό τρόπο τον δείκτη SPAD με βάση μετρήσεις της ανακλαστικότητας του φύλλου και σχετίζεται με τη συγκέντρωση της ολικής χλωροφύλλης στο φύλλο.

Φθορισμός της χλωροφύλλης *a in vivo*

Ο φθορισμός της χλωροφύλλης μετρήθηκε με το φορητό φθορισμόμετρο PAM-2100 (Walz Instruments) (Εικόνα 7).



Εικόνα 7: Όργανο Chlorophyll Fluorimeter PAM-1200 για μέτρηση του φθορισμού της χλωροφύλλης a.

Καταγράφηκαν οι παράμετροι ETR και Yield, όπως αναλύεται παρακάτω.

- ETR (Electron Transport Rate): Είναι ο ρυθμός μεταφοράς ηλεκτρονίων στη φωτοσυνθετική αλυσίδα και υπολογίζεται με βάση τις μετρούμενες τιμές του Yield (βλ. παρακάτω) και του PAR (φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία, Photosynthetically Active Radiation) με την εξίσωση:

$$ETR = Yield \times PAR \times 0.5 \times 0.84$$

- *Yield*: Η παράμετρος του Yield (Απόδοση) δίνει την πραγματική κβαντική απόδοση του φωτοσυστήματος II και υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$Y = (Fm' - Ft) : Fm' = \Delta F : Fm'$$

Δείκτης PRI

Ο δείκτης PRI (Photochemical Reflectance Index) είναι ένας δείκτης που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της φωτοχημικής απόδοσης και της υγείας των φυτών. Ο PRI βασίζεται σε μετρήσεις φασματικής ανάκλασης σε συγκεκριμένα μήκη κύματος και είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος στις αλλαγές στην ενεργειακή ισορροπία και την απόδοση της φωτοσυνθετικής διαδικασίας. Ο PRI είναι επίσης σχετικός με την φωτοσυνθετική απόδοση και μπορεί να επηρεαστεί από τους ίδιους παράγοντες που επηρεάζουν τον ETR.

- Υψηλές τιμές ETR δείχνουν υψηλή φωτοσυνθετική απόδοση, η οποία θα πρέπει να συνοδεύεται από θετικές τιμές PRI.
- Χαμηλές τιμές ETR μπορεί να υποδεικνύουν στρες στα φυτά, κάτι που θα αντικατοπτρίζεται και σε αρνητικές ή μειωμένες τιμές PRI.

Οι μετρήσεις στα φυτά των διάφορων μεταχειρίσεων έγιναν στις 6/11, 17/11, 28/11, 5/12, 12/12 και 20/12. Όλη αυτή τη περίοδο έχει σημασία να αναφερθεί ότι η ηλιοφάνεια ήταν ελάχιστη, ενώ τις περισσότερες ημέρες επικρατούσε συννεφιά.

2.1.2 Τελική συγκομιδή

Στις 21/12/2021 έγινε η συγκομιδή των φυτών. Το υπέργειο τμήμα των φυτών κόπηκε σύριζα και γρήγορα μεταφέρθηκε στο εργαστήριο, όπου τα φύλλα κόπηκαν από τους βλαστούς. Στη συνέχεια καταγράφηκε το νωπό βάρος φύλλων και βλαστών, ενώ στους τελευταίους μετρήθηκε το ύψος και ο αριθμός τους. Ακολούθησε η ξήρανσή τους σε φούρνο (70°C για 3 ημέρες) και μετά η καταγραφή του ξηρού βάρους και των δύο φυτικών μερών. Ίδια διαδικασία (70°C για 3 ημέρες) ακολουθήθηκε για τις ρίζες αφού ξεπλύθηκαν ώστε να απομακρυνθεί το έδαφος.



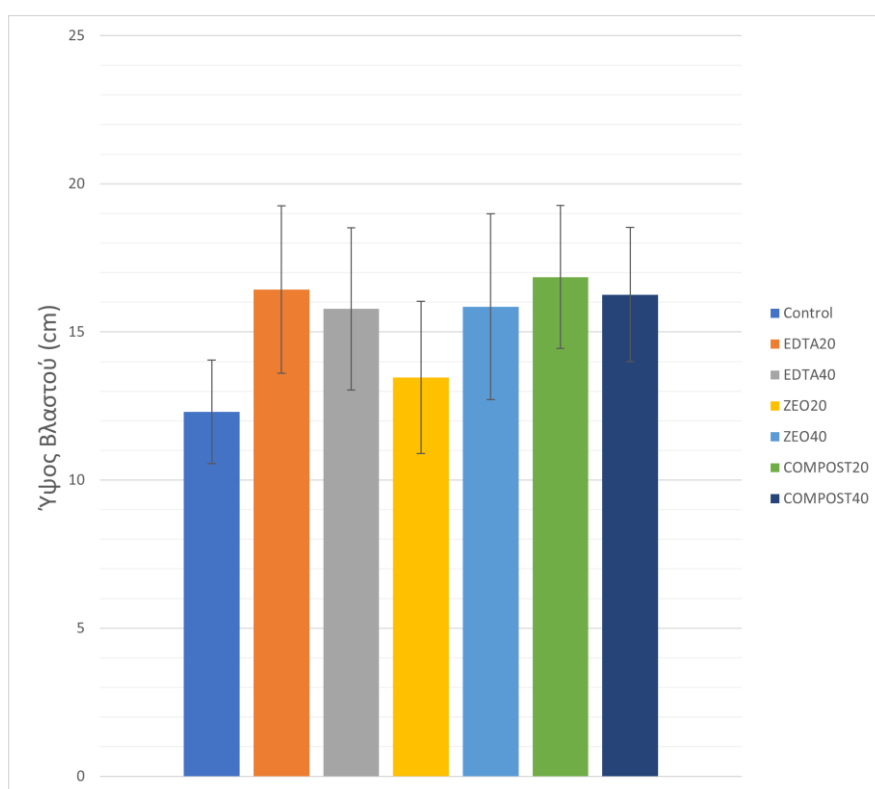
Εικόνα 8: Η εικόνα των φυτών του πειράματος στις 28/11

2.2 Στατιστική Επεξεργασία των δεδομένων

Για τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε One Way-ANOVA και το post-hoc test Tukey. Το μη παραμετρικό τεστ (Kruskal-Wallis) και το αντίστοιχο post-hoc test (Dunn) χρησιμοποιήθηκε σε εκείνες τις παραμέτρους που δεν καλύπτονταν οι προϋποθέσεις της ANOVA. Το ελεύθερο πρόγραμμα JASP (JASPTeam2021, v.0.13.1.0, for Windows) χρησιμοποιήθηκε για όλες τις παραπάνω αναλύσεις.

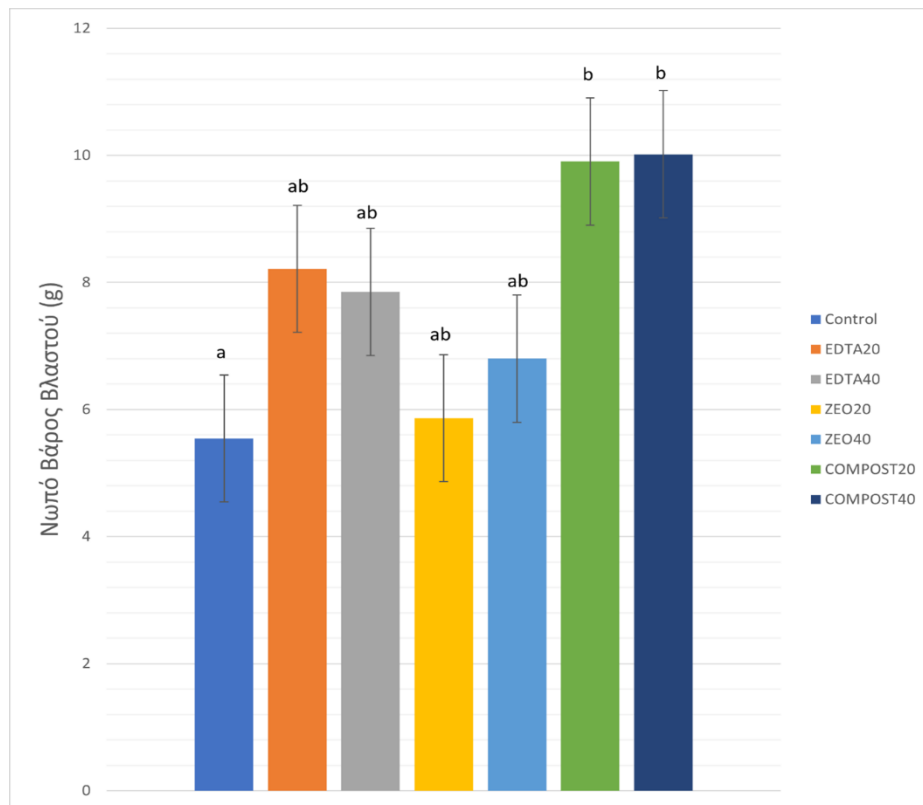
3. Αποτελέσματα

Παρουσιάζονται αρχικά οι αναπτυξιακές παράμετροι που μετρήθηκαν κατά την τελική συγκομιδή των φυτών.



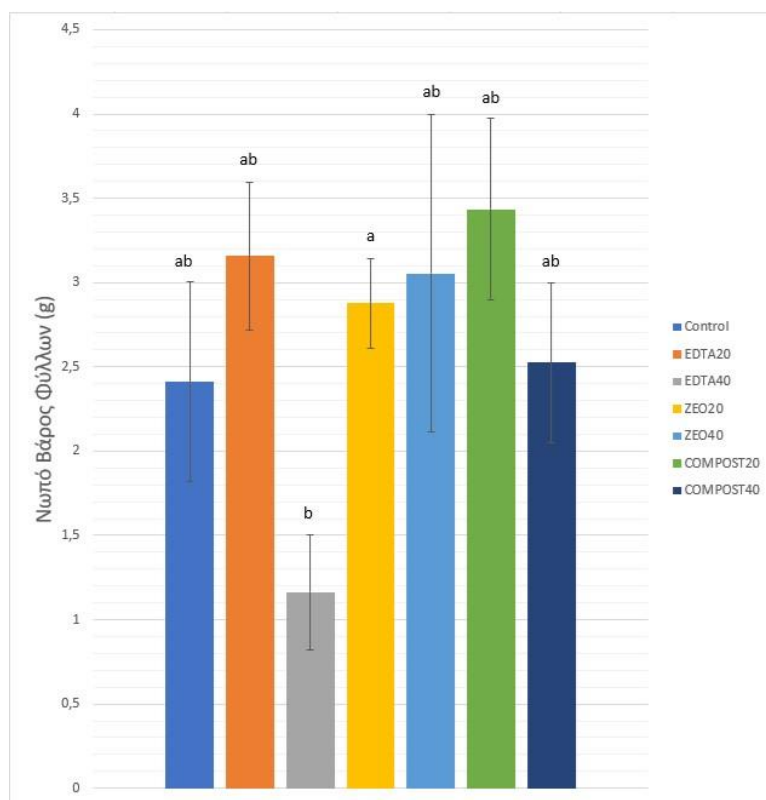
Γράφημα 1: Το ύψος των βλαστών μετρημένο σε cm ενώ παρουσιάζεται ως M.O. $\pm$ SE. Η απουσία σημάτων στατιστικής καταδεικνύει ότι δεν καταγράφηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων.

Παρότι η χρήση εδαφοβελτιωτικών σε όλες τις περιπτώσεις προκάλεσε τάση για μεγαλύτερο ύψος βλαστών συγκριτικά με το Control, οι διαφορές δεν ήταν στατιστικώς σημαντικές (Γράφημα 1).



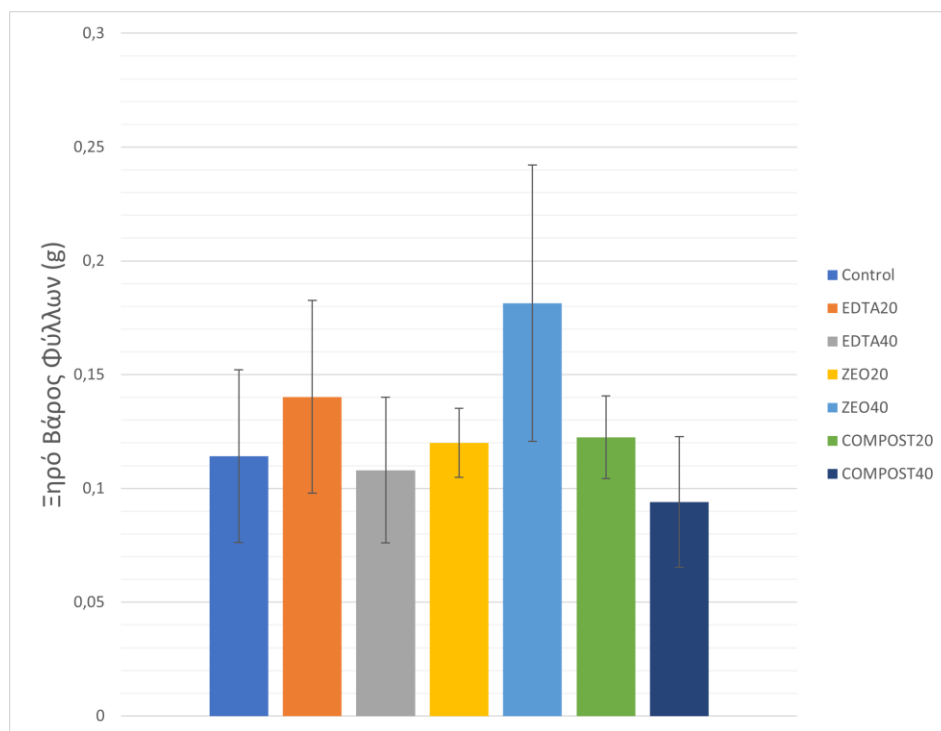
Γράφημα 2: Νωπό βάρος του βλαστού μετρημένο σε g και παρουσιάζεται ως M.O. ± SE. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p \leq 0.05$) μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Όσον αφορά το νωπό βάρος των βλαστών (Γράφημα 2) παρατηρούμε πως και σε αυτή την περίπτωση τα φυτά όπου εφαρμόσαμε εδαφοβελτιωτικά είχαν μεγαλύτερο βάρος στους βλαστούς από το Control. Στατιστικώς σημαντικές αυξήσεις παρατηρήθηκαν μόνο στα φυτά όπου χρησιμοποιήθηκε Compost τόσο στα 20 όσο και στα 40 gr. Οι επεξεργασίες με EDTA και ζεόλιθο παρουσιάζουν επίσης αύξηση αλλά δεν είναι τόσο αποτελεσματικές όσο το Compost στην ανάπτυξη των βλαστών, με τιμές που βρίσκονται ενδιάμεσα των Compost και Control.



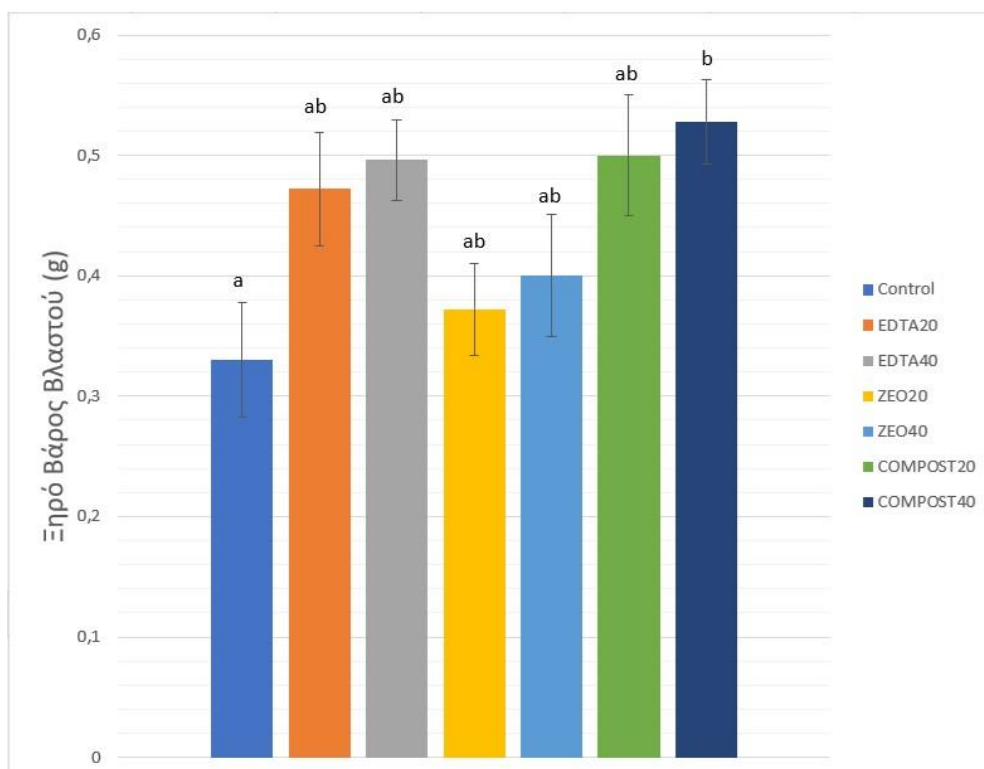
Γράφημα 3: Νωπό βάρος των φύλλων μετρημένο σε g και παρουσιάζεται ως M.O. $\pm$ SE. Η απουσία γραμμάτων υποδεικνύει ότι δεν εμφανίστηκαν στατιστικές σημαντικές διαφορές.

Όσον αφορά το νωπό βάρος παρατηρούμε πως σχεδόν όλα τα φύλλα είχαν λίγο περισσότερο βάρος από Control με εξαίρεση το EDTA-40 το οποίο είχε εμφανώς χαμηλότερο βάρος από τα υπόλοιπα (Γράφημα 3). Εντούτοις, δεν καταγράφηκαν στατιστικές σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων.



Γράφημα 4: Ξηρό βάρος φύλλων σε g εκφρασμένο ως Μ.Ο. $\pm$ SD.

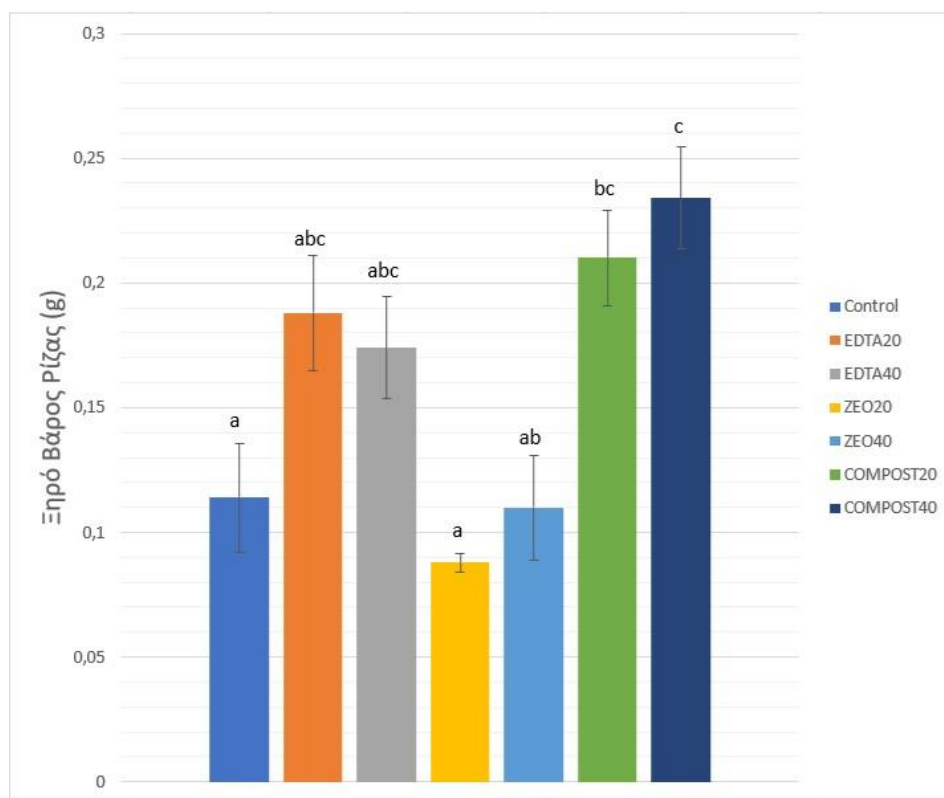
Το μεγαλύτερο ξηρό βάρος των φύλλων εμφανίζεται στο Zeo-40 με περίπου 0,18 g (Γράφημα 4). Ακολουθεί το EDTA-20 με βάρος περίπου 0,14 g. Το Control έχει βάρος περίπου 0,11 g. Το μικρότερο βάρος αντιστοιχεί στο Compost-40 με 0,9 g περίπου. Και στην περίπτωση του ξηρού βάρους των φύλλων δεν εμφανίστηκαν σημαντικές στατιστικές διαφορές πιθανότατα λόγω μεγάλης διασποράς γύρω από τη μέση τιμή.



Γράφημα 5: Ξηρό βάρος βλαστού σε g εκφρασμένο ως M.O. $\pm$ SE. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p \leq 0.05$) μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Όπως ήταν αναμενόμενο το ξηρό βάρος του βλαστού (Γράφημα 5), αποτύπωσε πλήρως τις διαφορές που καταγράφηκαν και στο νωπό βάρος, δηλαδή την ίδια στατιστικά σημαντική υπεροχή των φυτών που αναπτύχθηκαν με Compost-40.

Πιο συγκεκριμένα, το ξηρό βάρος του βλαστού είναι το χαμηλότερο στο Control, με περίπου 0,3 g. Το Compost-40 έχει το υψηλότερο βάρος με περίπου 0,52 g και διαφέρει σημαντικά από το Control. Το Compost-20 είναι παρόμοιο με το EDTA40, υψηλότερο από το Control, αλλά δεν διαφέρει σημαντικά από καμία μεταχείριση.

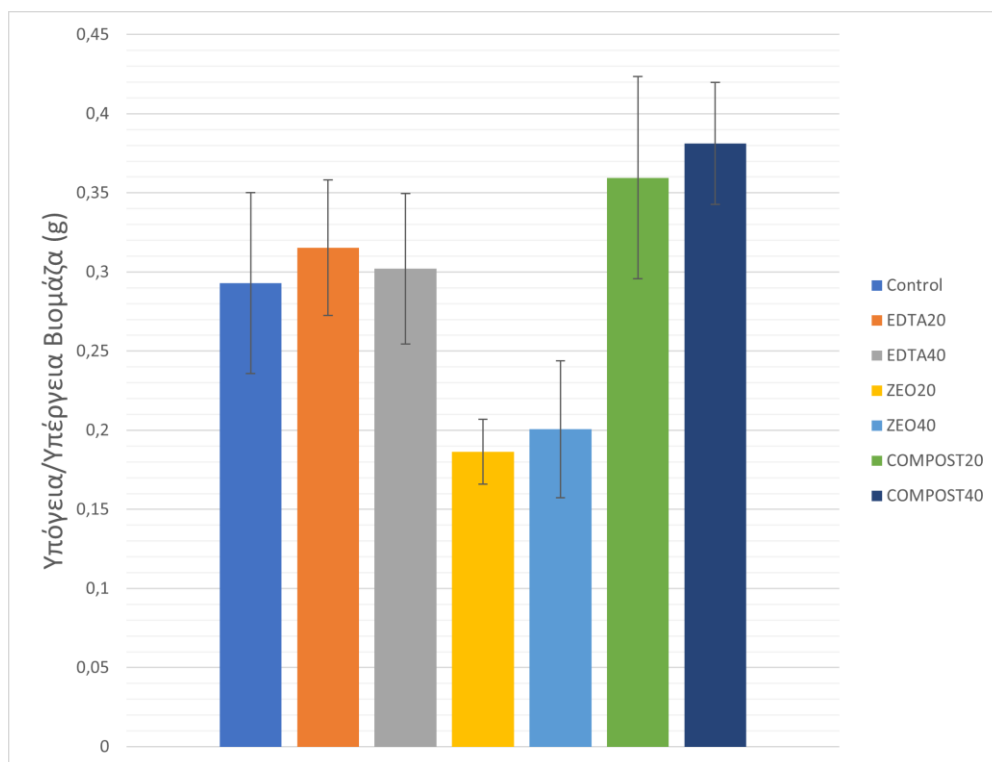


Γράφημα 6: Ξηρό βάρος ριζών σε g εκφρασμένο ως M.O. $\pm$ SD. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p < 0.05$) μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Η ανάπτυξη της ρίζας φάνηκε να επηρεάζεται σημαντικά από τις διάφορες μεταχειρίσεις (Γράφημα 6). Η εφαρμογή του Compost-20 και Compost-40 οδήγησε σε μεγαλύτερη αύξηση του βάρους. Το Compost-20 με περίπου 0,21 g διαφέρει σημαντικά από το Control και τους δύο χειρισμούς με ζεόλιθο. Το Compost-40 οδήγησε στην υψηλότερη ανάπτυξη της ρίζας και διαφέρει σημαντικά από το Control και τα υπόλοιπα δείγματα πλην του Compost-20.

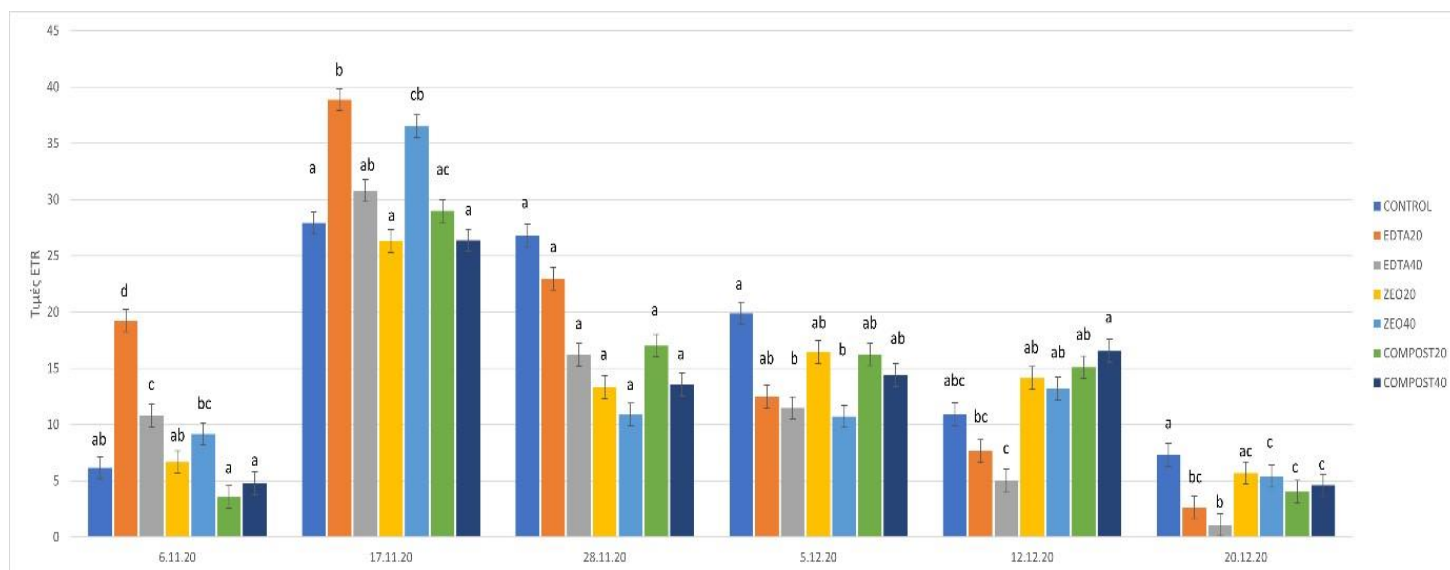
Η εφαρμογή τόσο του Zeo-20 όσο και του Zeo-40 οδήγησε σε ανάπτυξη ρίζας παρόμοια με το Control, ενώ και οι τρεις αυτές μεταχειρίσεις ήταν σημαντικά μειωμένες ως προς όλες τις υπόλοιπες.

Η εφαρμογή EDTA-20 και EDTA-40 οδηγούν σε αυξημένο βάρος σε σύγκριση με το Control, όμως δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά με καμία μεταχείριση, πλην της διαφοράς του EDTA-40 από το Compost-40.



Γράφημα 7: Υπόγεια/Υπέργεια Βιομάζα σε g εκφρασμένο ως M.O. $\pm$ SE.

Ο λόγος υπόγειας προς υπέργειας βιομάζας (Γράφημα 7) εμφανίζεται αυξημένος κατά την εφαρμογή του Compost-20 και κυρίως του Compost-40 που εμφανίζει τον μεγαλύτερο αριθμό με περίπου 0,4. Μειωμένος σε σχέση με το Control και τα υπόλοιπα δείγματα είναι ο λόγος υπόγειας προς υπέργειας στο Zeo-20 και Zeo40 που έχουν τιμές περίπου 0,2. Τα δείγματα στο EDTA-20 και EDTA-40 έχουν παρόμοιο λόγο με το Control κοντά στο 0,3. Μεταξύ μεταχειρίσεων δεν εμφανίστηκαν σημαντικές στατιστικές διαφορές πιθανότατα λόγω μεγάλης διασποράς γύρω από τη μέση τιμή.



Γράφημα 4: Τιμές ETR σε $\mu\text{mole}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ εκφρασμένο ως M.O. $\pm$ SE. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p \leq 0.05$) μεταξύ των μεταχειρίσεων σε κάθε πειραματική ημέρα.

Σε ότι αφορά το ETR (Γράφημα 8), στις 6/11/20 παρατηρούμε ότι το EDTA-20 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή από τα υπόλοιπα δείγματα υποδεικνύοντας ότι τα αντίστοιχα φυτά είχαν τη ταχύτερη ροή ηλεκτρονίων σε αυτή τη χρονική στιγμή. Τα EDTA-40 και Zeo-40 είχαν καλές τιμές ETR, δείχνοντας καλή φωτοσυνθετική δραστηριότητα. Το Control και το Zeo-20 είχαν παρόμοια τιμή. Τα Compost-20 και Compost-40 παρουσίασαν τις χαμηλότερες τιμές από όλα τα δείγματα.

Στις 17/11/20 παρατηρήθηκαν οι υψηλότερες τιμές όλου του πειράματος. Το EDTA-20 παρουσιάζει ξανά τη μεγαλύτερη τιμή ETR από τα υπόλοιπα δείγματα. Το Control και το Compost-40 δείχνουν παρόμοιες υψηλές τιμές, ενώ τη χαμηλότερη τιμή σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα εμφανίζει το Zeo-20. Υψηλή τιμή παρουσίασε και το Zeo-40 σε σχέση με τα άλλα δείγματα.

Στις 28/11/20 άρχισε η πτώση των τιμών ETR συνολικά. Υψηλότερη τιμή είχε το Control και δεύτερη υψηλότερη το EDTA-20. Ωστόσο όλα τα δείγματα δεν παρουσίασαν σημαντικές στατιστικές διαφορές.

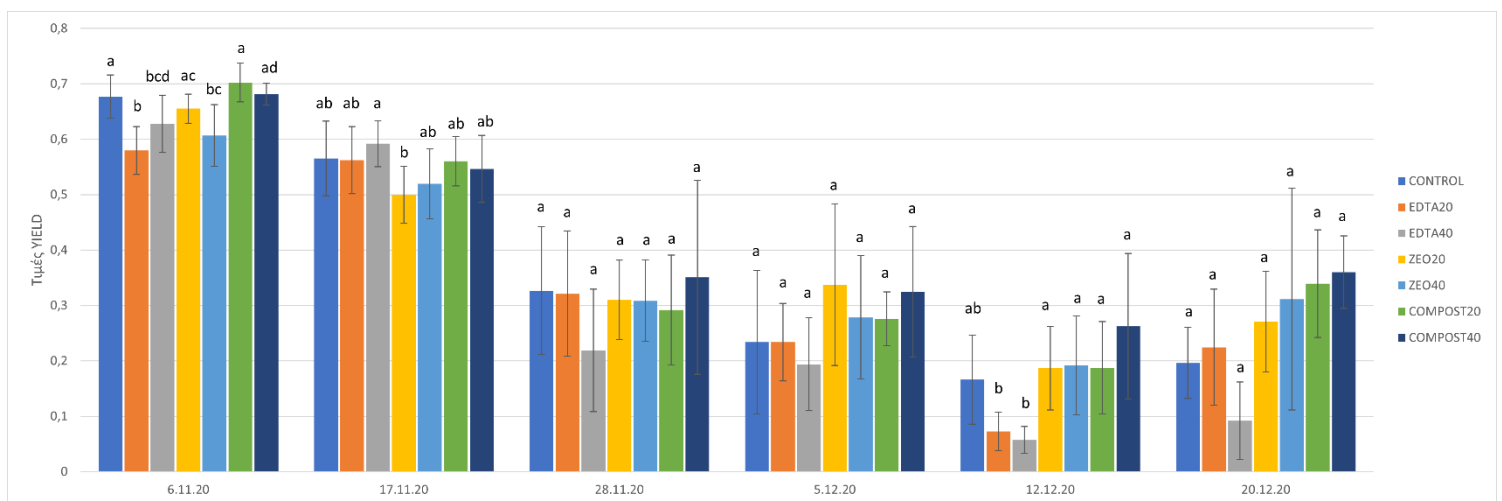
Στις 5/12/20 συνεχίστηκε η πτώση στις τιμές του ETR σε όλα τα δείγματα. Την υψηλότερη τιμή την είχε ξανά το Control. Το Zeo-20 και το Compost-20 και το

Compost-40 είχαν και αυτά υψηλές τιμές, ενώ τις χαμηλότερες είχαν το Zeo-40 και EDTA-40.

Στις 12/12/20 καταγράφηκε πτώση στο Control , EDTA-20, EDTA-40, με τα EDTA-20 και EDTA-40 να έχουν τις χαμηλότερες τιμές. Αντίθετα τα Compost-20 και Compost-40 παρουσίασαν τις υψηλότερες τιμές ειδικά το Compost-40 είχε την υψηλότερη. Ακολούθως και τα Zeo-20 και Zeo-40 είχαν και αυτά υψηλές τιμές.

Στην τελευταία μέρα μετρήσεων στις 20/12/20 την υψηλότερη τιμή την είχε το Control. Τα EDTA-20 και EDTA-40 παρουσίασαν τις χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα. Τα Zeo-20 και Zeo-40 και τα Compost-20 και Compost-40 είχαν παρόμοιες τιμές πιο χαμηλές από το Control ωστόσο.

Στις 6/11/20 οι κβαντικές αποδόσεις του φωτοσυστήματος II είναι γενικά υψηλές για όλες τις μεταχειρίσεις, με τιμές γύρω από το 0.6 έως 0.7. Το Compost-20



έχει την υψηλότερη απόδοση με 0,7 ενώ το Compost-40 κυμαίνεται κοντά στο 0,7 και αυτό. Μαζί με αυτά τα δύο και το Control αποτελούν τις υψηλότερες τιμές. Όλες οι τιμές παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.

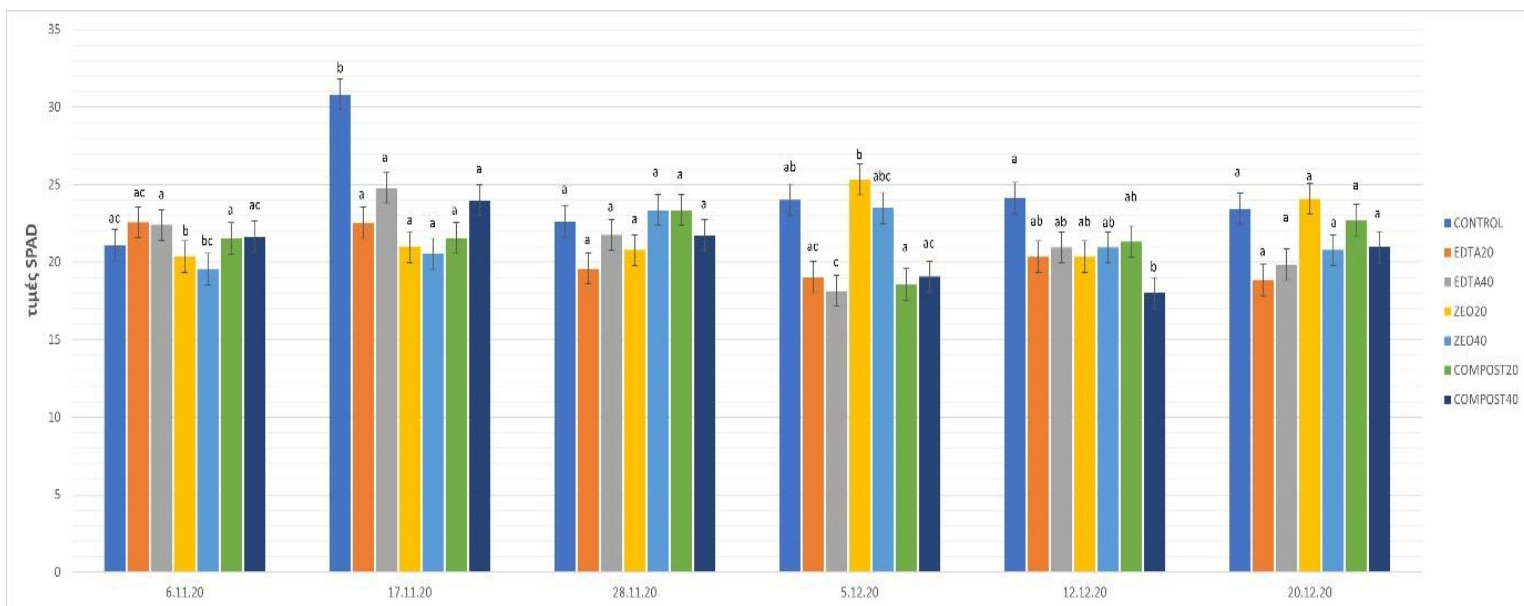
Γράφημα 9: Τιμές YIELD εκφρασμένες ως M.O. $\pm$ SE. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p \leq 0.05$) μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Στις 17/11/20 οι αποδόσεις εξακολουθούν να είναι υψηλές κοντά στο 0,7 και χωρίς σημαντικές στατιστικές διαφορές μεταξύ των δειγμάτων εκτός από το EDTA-40

που έχει την υψηλότερη τιμή και το Zeo-20 που έχει την χαμηλότερη. Στις 28/11/20 τα δείγματα παρουσιάζουν μια ανισοκατανομή στις τιμές τους χωρίς ωστόσο να έχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές. Στις 5/12/20 τα δείγματα εμφανίζουν διαφορές στις τιμές τους χωρίς στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Στις 12/12/20 οι αποδόσεις κυμαίνονται από 0.05 έως 0.4, με το Compost-40 να έχει και πάλι την υψηλότερη απόδοση. Τα δείγματα EDTA έχουν τις χαμηλότερες αποδόσεις. Το Control, το Zeo-20 και το Zeo-40 έχουν ενδιάμεσες αποδόσεις, αλλά οι διαφορές δεν είναι στατιστικά σημαντικές μεταξύ τους.

Στις 20/12/20 οι αποδόσεις όλων των δειγμάτων παρουσιάζουν διακυμάνσεις μεταξύ τους με το Compost-40 και πάλι να έχει την υψηλότερη απόδοση μαζί με το Compost-20 και το Zeo-20 και το Zeo-40. Την χαμηλότερη την είχε ξανά το EDTA-40.

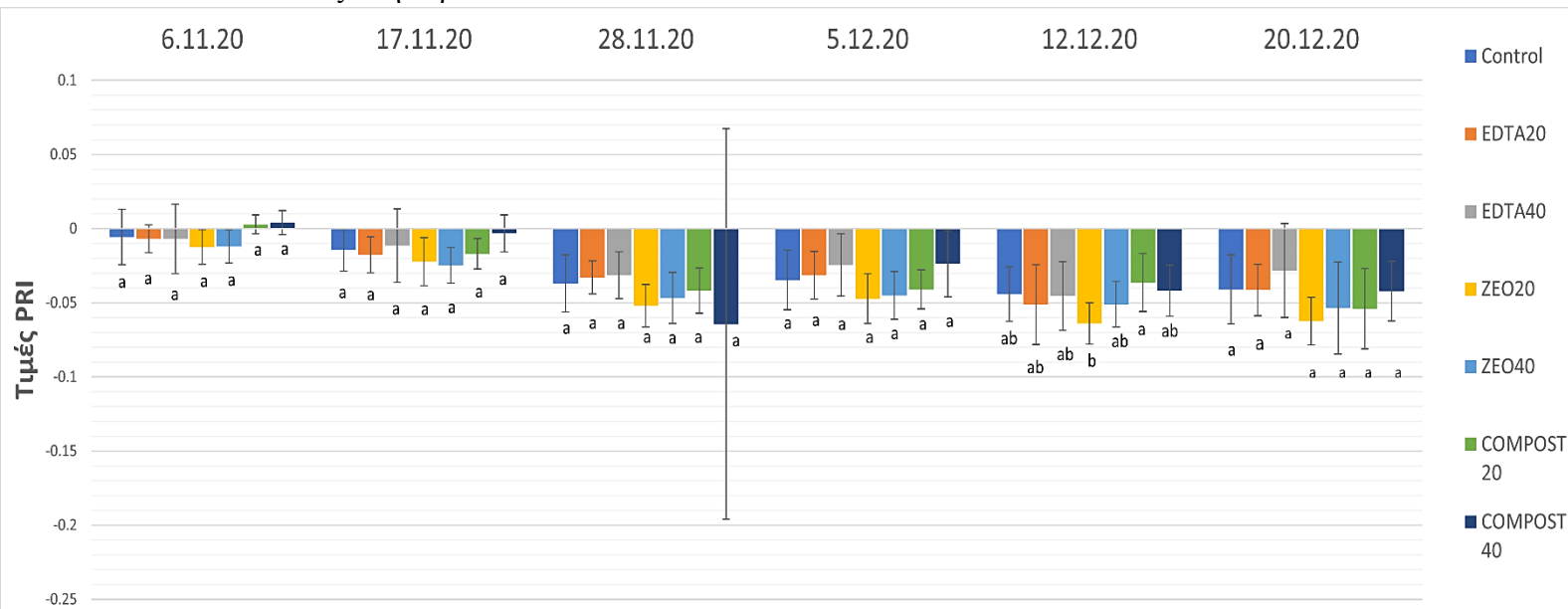


Γράφημα 10: Τιμές SPAD εκφρασμένες ως M.O. ± SE. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p \leq 0.05$) μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Ο δείκτης SPAD εμφανίζει κάποιες μικρές διακυμάνσεις κατά την εξέλιξη του πειράματος, με λίγες στατιστικώς σημαντικές διαφορές, οι οποίες εμφανίζονται στην αρχή και στο μέσον της αναπτυξιακής περιόδου.

Αρχικά στις 6/11/20 παρατηρούμε ότι υπάρχει μια μικρή διακύμανση στις τιμές του Zeo-40 και Zeo-20 που είναι λίγο χαμηλότερες από τις υπόλοιπες όπως και του Control. Τα υπόλοιπα δείγματα είχαν παρόμοιες τιμές. Στις 17/11/20 μόνο στο Control παρατηρείται μεγάλη διαφορά σε σχέση με τα υπόλοιπα που έχουν παρόμοιες τιμές. Το Control εμφανίζει τη μεγαλύτερη τιμή σε αυτή τη χρονική στιγμή. Στις 28/11/20 όλα τα δείγματα έχουν παρόμοιες τιμές.

Η γενική εικόνα είναι ότι το Control διατηρεί υψηλές τιμές SPAD σε όλη της αναπτυξιακή περίοδο και ακολουθείται από το Zeo-20.



Ο δείκτης PRI εμφάνισε σταθερά αρνητικές τιμές σε όλη την αναπτυξιακή περίοδο, με μόνη εξαίρεση τις τιμές του Compost-20 και Compost-40 στην αρχική μέτρηση στις 6/11/20. Σε όλες τις υπόλοιπες ημέρες μετρήσεων δεν υπήρξε σημαντική διαφορά μεταξύ μεταχειρίσεων. Μόνο κατά τη μέτρηση στις 12/12 καταγράφηκε μία σημαντική διαφορά μεταξύ Zeo-20 και Compost-20, η οποία όμως αναιρέθηκε στην επόμενη τελική μέτρηση.

4. Συζήτηση

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη της ανταπόκρισης του φυτού γλιστρίδας σε έδαφος που περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων. Η προσθήκη εδαφοβελτιωτικών υλικών εξετάστηκε για να διαπιστωθεί εάν επηρεάζει θετικά την ανάπτυξη του φυτού. Για να αναλύσουμε τα αποτελέσματα και να διαπιστώσουμε εάν τα υλικά δέσμευσης που ενσωματώθηκαν στο έδαφος που πάρθηκε από το Λαύριο βοήθησαν στην καλή ανάπτυξη της γλιστρίδας, θα πρέπει να αξιολογήσουμε τις θετικές και αρνητικές επιδράσεις των εν λόγω υλικών. Αυτό περιλαμβάνει τη σύγκριση μεταξύ τους, αλλά και με τα φυτά-μάρτυρες που αναπτύχθηκαν μόνο στο ρυπασμένο έδαφος χωρίς προσθήκη εδαφοβελτιωτικών.

Σε ότι αφορά τα αναπτυξιακά χαρακτηριστικά του φυτού, δηλαδή το ύψος του βλαστού, το νωπό και ξηρό βάρος των φύλλων και των ριζών τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι μεταχειρίσεις Compost-20 και Compost-40 αυξάνουν σημαντικά όλες τις αναπτυξιακές παραμέτρους των φυτών σε σύγκριση με το Control. Το EDTA οδήγησε και αυτό σε καλύτερη αύξηση των φυτών σε σύγκριση με το Control ωστόσο η εφαρμογή του EDTA-40 οδήγησε σε μείωση του βάρους των φύλλων. Η εφαρμογή Zeo -20, Zeo-40 όσον αφορά τα υπέργεια τμήματα του φυτού δεν έδειξε αξιοσημείωτη αύξηση και ήταν παρόμοιο με το Control μας, όμως φαίνεται ότι η εφαρμογή του είχε αρνητικό αντίκτυπο στην ανάπτυξη του ριζικού συστήματος καθώς ήταν το χαμηλότερο από όλα τα δείγματα ακόμα και από το Control. Αξίζει να σημειωθεί όμως πως η διασπορά των τιμών γύρω από τις μέσες τιμές στις περισσότερες μεταχειρίσεις είναι υψηλή, γεγονός που δυσκολεύει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Σύμφωνα με τους Amer et al. (2012), η γλιστρίδα μπορεί να αναπτύσσεται καλά σε εδάφη ρυπασμένα με βαρέα μέταλλα. Η Παπαθεοδώρου (2015) πειραματίστηκε με γλιστρίδα που αναπτύσσονταν σε έδαφος ρυπασμένο με Zn και Cd. Ανέφερε ότι η παρουσία αυτών των μετάλλων δεν επηρέασε την ανάπτυξη τόσο του υπέργειου, όσο και του υπόγειου μέρους του φυτού. Βρήκε μόνο επιδράσεις στην αρχιτεκτονική διάταξη του βλαστού. Τα αποτελέσματά της δεν μπορούν εύκολα να συγκριθούν με αυτά της παρούσας μελέτης διότι αφορούσαν άλλα βαρέα μέταλλα και προσθήκη αυτών στο έδαφος πριν το πείραμά. Αντίθετα, το έδαφος του Λαυρίου που

χρησιμοποιήθηκε στο παρόν πείραμα είναι έντομα ρυπασμένο από πολλών ειδών βαρέα μέταλλα που βρίσκονται εκεί για αιώνες.

Η ανάλυση των τιμών ETR μας δίνει πληροφορίες για τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα των φυτών κάτω από τις διαφορετικές εφαρμογές εδαφοβελτιωτικών. Εμφάνισε διακυμάνσεις καθόλη τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου και σχετικά μεγάλη διασπορά των τιμών γύρω από τη μέση τιμή. Οι εφαρμογές EDTA, ιδιαίτερα το EDTA-20, φαίνεται να έχουν αξιοσημείωτο αντίκτυπο αρχικά, ενώ τα Compost-20 και Compost-40 παρουσιάζουν μια αυξητική τάση με την πάροδο του χρόνου. Οι προσθήκες ζεόλιθου έχουν γενικά μικρότερο αντίκτυπο σε σύγκριση με τις άλλες θεραπείες. Σε ότι αφορά την ανά φωτόνιο μέγιστη απόδοση της φωτοχημείας του φωτοσυστήματος II (YIELD) επιβεβαιώνει τα προηγούμενα αποτελέσματα ως προς τις υψηλότερες αποδόσεις των Compost-20 και Compost-40 είχαν τις. Η προσθήκη EDTA οδήγησε στις χαμηλότερες αποδόσεις, με ενδιάμεση κατάσταση να εμφανίζεται μετά την προσθήκη ζεόλιθου. Πειραματιζόμενος με γλιστρίδα σε έδαφος Λαυρίου με προσθήκη υλικών δέσμευσης βαρέων μετάλλων, ο Μπράτσος (2021) ανέφερε ότι μόνο τα αποχωρήματα εντόμων (frass) αποδείχθηκαν αποτελεσματικά στην βελτίωση των παραμέτρων του φθορισμού της χλωροφύλλης. Βρήκε υψηλότερους ρυθμούς της φωτοσυνθετικής ροής ηλεκτρονίων σε σύγκριση με τον μάρτυρα που ήταν έδαφος χωρίς προσθήκες υλικών και αυτό θεώρησε ότι δικαιολογεί και την καλύτερη ανάπτυξη των φυτών αυτών.

Οι τιμές SPAD χρησιμοποιούνται για να εκτιμήσουν την περιεκτικότητα των φύλλων σε χλωροφύλλη. Οι τιμές SPAD ήταν σχετικά σταθερές με ελάχιστες διακυμάνσεις ανάμεσα στις διαφορετικές μεταχειρίσεις με το Control να έχει συχνά τις υψηλότερες τιμές. Η γενική εικόνα είναι ότι η συγκέντρωση των ολικών χλωροφυλλών δεν διαφοροποιήθηκε στη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου μεταξύ μεταχειρίσεων με όλες τους να διατηρούν τη χλωροφύλλη σε ικανοποιητικά επίπεδα.

Οι τιμές PRI ήταν σταθερά αρνητικές για όλες τις μεταχειρίσεις και ημερομηνίες, με εξαίρεση των Compost-20 και Compost-40 στις πρώτες μετρήσεις. Αυτό παραπέμπει σε μειωμένη αποδοτικότητα της χρήσης φωτός από τη φωτοσύνθεση σε όλες τις συνθήκες. Φαίνεται ότι η καταπόνηση που επιβάλλεται από το ρυπασμένο έδαφος του

Λαυρίου οδηγεί σε μειωμένη φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών της γλιστρίδας, κατάσταση που δεν βελτιώνεται από την προσθήκη των διάφορων εδαφοβελτιωτικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα, με εξαίρεση ίσως το Compost-40 και λιγότερο το Compost-20.

5. Συμπεράσματα

- Η χρήση του Compost ως εδαφοβελτιωτικού είχε τα καλύτερα αποτελέσματα στην ανάπτυξη των φυτών και στις δύο συγκεντρώσεις.
- Το EDTA οδήγησε σε ελαφρώς καλύτερη ανάπτυξη των φυτών σε σύγκριση με το Control ωστόσο η εφαρμογή του EDTA-40 οδήγησε σε μείωση του βάρους των φύλλων.
- Η εφαρμογή Zeo-20 και Zeo-40 δεν υποστήριξε την αύξηση των υπέργειων τμημάτων του φυτού καθώς ήταν παρόμοιο με το Control, όμως φαίνεται ότι είχε αρνητική επίδραση στην ανάπτυξη του ριζικού συστήματος.
- Η λειτουργία και απόδοση του φωτοσυστήματος II δεν βελτιώθηκε σημαντικά από την παρουσία των εδαφοβελτιωτικών υλικών, σε σύγκριση με τον μάρτυρα.
- Τα χαμηλά επίπεδα αξιοποίησης του φωτός για φωτοσύνθεση υποδηλώνουν καταπονητικές συνθήκες που επιβάλλονται στη φωτοσυνθετική συσκευή από το έντονα ρυπασμένο έδαφος του Λαυρίου, οι οποίες δεν αναιρέθηκαν από την προσθήκη των εδαφοβελτιωτικών υλικών, με πιθανή εξαίρεση το Compost.
- Μόνο το Compost έδειξε μία σχετική αποτελεσματικότητα στη βελτίωση αναπτυξιακών και φυσιολογικών παραμέτρων των φυτών γλιστρίδας, όμως περαιτέρω έρευνα απαιτείται ώστε να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συγκεντρώσεις του.

6. Βιβλιογραφία

Ahmad, I., Akhtar, M. J., Zahir, Z. A., & Jamil, A. (2012). Effect of cadmium on seed germination and seedling growth of four wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Pakistan Journal of Botany*, 44(5), 1569–1574.

Alifragkis D., Voulgaridou, E., Daftsis E. and Characlias I., 2012. Reclamation of old tailing disposal area of Olympias, Halkidiki Mine. 3rd International Conference on Industrial and Hazardous Waste Management, Chania, Crete, Greece (12-14 Sept. 2012).

Alloway, B. J., 1995. Heavy Metals in Soils, Blackie Academic and Professional, London, UK, 2nd edition.

Alloway B.J., 2010. Heavy Metals in Soils. Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. Blackie Academic and Professional, London, UK, 3rd edition.

Asati, A., Pichhode, M., & Nikhil, K. (2016). Effect of heavy metals on plants: An overview. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM)*, 5(3), 1-10.

Badeenezhad, A., et al. (2023). Comprehensive health risk analysis of heavy metal pollution using water quality indices and Monte Carlo simulation in R software. *Scientific Reports*, 13, 15817.

Baker A. J. M (May 1987) Metal tolerance <https://doi.org/10.1111/j.14698137.1987.tb04685.x>

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

Chowdhary, P., Bharagava, R. N., Mishra, S., & Khan, N. (2020). Role of Industries in Water Scarcity and Its Adverse Effects on Environment and Human Health. Στο V. Shukla & N. Kumar (Επιμ.), *Environmental Concerns and Sustainable Development* (σσ. 235–256). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-5889-0_12

Curvetto, R.T. and Rauser, W.E., 1979. Isolation and characterization of copper binding proteins from roots of *Agrostis gigantea* tolerant to excess copper. *Plant Physiol.*, 63, Suppl. 59

Cunningham, S. D., Berti, W. R., & Huang, J. W. (1995). Phytoremediation of contaminated soils. *TIBTECH*, 13, 393-397.

Demetriades A., The Lavrion Urban Geochemistry Study, Hellas, Mapping the Chemical Environment of Urban Areas, pp. 424, 428, 434-436, 446, 534, March 2011.

Duffus, J. H. (2002). "Heavy Metals"—A Meaningless Term? Pure and Applied Chemistry, 74(5), 793–807. <https://doi.org/10.1351/pac200274050793>

Ensley, B.D., 2000. Rational for use of phytoremediation. In: Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean- up the environment, (Eds) Raskin, I. and Ensley, B.D. eds. New York, John Wiley & Sons, Inc., p. 3-12

Evangelou, M.W.H., Ebel, M., & Schaeffer, A. (2007). Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil: Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents. Chemosphere, 68, 989–1003

Gardea-Torresdey, J.L., Peralta-Videa, J.R., Rosa, G., & Parsons, J.G. (2005). Phytoremediation of heavy metals and study of the metal coordination by X-ray adsorption spectroscopy. Coordination Chemistry Reviews, 249, 1797-1810.

Ghosh, M. and Singh, S.P. (2005) A Review on Phytoremediation of Heavy Metals and Utilization of Its Byproducts. Applied Ecology and Environmental Research, 3, 1-18.

http://dx.doi.org/10.15666/aecer/0301_001018

Hashim, M. A., Mukhopadhyay, S., Sahu, J. N., & Sengupta, B. (2011). Remediation technologies for heavy metal contaminated groundwater. Journal of Environmental Management, 92, 2355-2388.

Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. (2011) Trace Elements in Soils and Plants. 4th Edition, CRC Press, Boca Raton.

Kabata-Pendias, A., 2001. Trace Elements in Soils and Plants, Third Edition. CRC Press, Boca Raton, London.

S., and Yli-Halla, M., 2003. Use of sequential extraction to assess metal partitioning in soils. Environmental Pollution, 126, no. 2, pp. 225–233.

Kadukova, J., Manousaki, E., & Kalogerakis, N. (2008). Pb and Cd accumulation and phytoexcretion by salt cedar (*Tamarix smyrnensis* Bunge). *International Journal of Phytoremediation*, 10(1), 31

Khan, A. G. (2005). Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 18, 355-364.

Khan, S., Cao, Q., Zheng, Y. M., Huang, Y. Z., and Zhu, Y. G., 2008. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. *Environmental Pollution*, 152, no. 3, pp. 686–692

Kidd, P., Barceló, J., Bernal, M. P., Navari-Izzo, F., Poschenrieder, C., Shilev, S., Clemente, R., & Monterroso, C. (2009). Trace element behaviour at the root–soil interface: Implications in phytoremediation. *Environmental and Experimental Botany*, 67(1), 243-259. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.013>.

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

I. J. Schalk, M. Hannauer and A. Braud, New roles for bacterial siderophores in metal transport and tolerance, *Environ. Microbiol.*, 2011, 13, 2844–2854.

Mahar, A., Wang, P., Ali, A., Awasthi, M.K., Lahori, A.H., Wang, Q., Li, R., & Zhang, Z. (2016). Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 126, 111–121.

M. Rajkumar, S. Sandhya, M. N. V. Prasad and H. Freitas, Perspectives of plant-associated microbes in heavy metal phytoremediation, *Biotechnol. Adv.*, 2012, 30,1562–1574.

Mulligan, C.N., Yong, R.N. and Gibbs, B.F. (2001) Remediation Technologies for Metal Contaminated Soils and Groundwater. *Engineering Geology*, 60, 193-207. [http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00101-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00101-0)

McGrath, S.P., Zhao, J., & Lombi, E. (2002). Phytoremediation of metals, metalloids, and radionuclides. *Advances in Agronomy*, 75, 1–56.

Nasser Amer , Ziad Al Chami , Lina Al Bitar , Donato Mondelli & Stefano Dumontet (2013): Evaluation of Atriplex Halimus, Medicago Lupulina and Portulaca Oleracea For Phytoremediation of Ni, Pb, and Zn, *International Journal of Phytoremediation*, 15:5, 498-512

Orcutt D.M., Nilsen E.T. (2000). The physiology of plants under stress - Soil and biotic factors. John Wiley & Sons, New York.

Q. Yang, S. Tu, G. Wang, X. Liao and X. Yan, Effectiveness of applying arsenate reducing bacteria to enhance arsenic removal from polluted soils by *Pteris vittata* L // *Int. J. Phytorem.* - 2012. - 12. - σσ. 89–99.

Pivetz, B.E., 2001. Phytoremedation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites. US EPA, EPA/540/S-01/500

Prasad, M.N.V. and Freitas H., 2003. Metal Hyperaccumulator in plants: Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electrn. Biotechnol.*, 6:275-321

Raskin I. (1994). Bioconcentration of Metals by Plants, *Environmental Biotechnology*. 5:285-290.

Schaller, A., & Diez, T. (1991). Plant specific aspects of heavy metal uptake and comparison with quality standards for food and forage crops. In D. Sauerbeck & S. Lubben (Eds.), *Der Einfluß von festen Abfällen" auf Boden," Pflanzen* (pp. 92–125). KFA, Julich," Germany.

Sheoran, V., Sheoran, A., & Poonia, P. (2011). Role of hyperaccumulators in phytoextraction of metals from contaminated mining sites: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41, 168–214.

S. Luo, T. Xu, L. Chen, J. Chen, C. Rao, X. Xiao, Y. Wan, G. Zeng, F. Long, C. Liu and Y. Liu Endophyte-assisted promotion of biomass production and metal-uptake of energy

crop sweet sorghum by plant-growth-promoting endophyte *Bacillus* sp. SLS18 // Appl. Microbiol. Biotechnol. - 2012. - Τόμ. 93. - σσ. 1745–1753.

Sumiahadi, A., & Acar, R. (2018). A review of phytoremediation technology: heavy metals uptake by plants. In The 4th International Conference on Sustainable Agriculture and Environment (4th ICSAE), 10–12 August 2017, Surakarta, Indonesia (Vol. 142). IOP Publishing Ltd. DOI: 10.1088/1755-1315/142/1/012023..

Taiz L, Zeiger E and Moler I.M. «Φυσιολογία Φυτών», επιμέλεια ελληνικής έκδοσης Κ. Θάνος, εκδ. Utopia, 2016

Tangahu, B. V., Abdullah, S. R. S., Basri, H., Idris, M., Anuar, N., & Mukhlisin, M. (2011). A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. International Journal of Chemical Engineering, 939161(2011), 31.

Vidali, M. ,2001. Bioremediation, an Overview. Pure Appl. Chem., Vol. 73, No. 7, pp. 1163–1172

Wu, L., Thurman, D.A. and Bradsaw A.D., 1975. The uptake of copper and its effect upon respiratory processes of roots of copper –tolerant and non tolerant clones of *Agrostis stolonifera*. New Phytol, 75:225-229.

Zhao, F. J., Lombi, E., & McGrath, S. P. (2003). Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. Plant and Soil, 249, 37–43.

Zhao, G., Ma, Y., Liu, Y. *et al.* Source analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around heavy metal industry in Anxin County. *Sci Rep* 12, 10562 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13977-6>

Zhai, X., Li, Z., Huang, B., Luo, N., Huang, M., Zhang, Q., & Zeng, G. (2018). Remediation of multiple heavy metal-contaminated soil through the combination of soil washing and in situ immobilization. *Science of The Total Environment*, 635, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.119>

Αλιφραγκής, Δ., 2002. Επανεγκατάσταση της Βλάστησης στα Διαταραγμένα Εδάφη της Εγνατίας Οδού. Εγνατία Οδός ΑΕ- Σύμβαση 453/GK/A01, Ελλάδα.

Αλιφραγκής, Δ., 2008. Το Έδαφος: Γένεση -Ιδιότητες –Ταξινόμηση. Εκδόσεις Αϊβάξη. Θεσσαλονίκη

Αλιφραγκής, Δ., Γαζέα, Ε., Βουλγαρίδου, Ε., Βαβελίδης, Μ., Γαλατσιάνου, Α., και Αγαλή, Α., 2014. Αποικισμός ισχυρά ρυπασμένων εδαφών μετά τη χημική σταθεροποίησή τους. 15^ο Πανελλήνιο Εδαφολογικό Συνέδριο, 26-28 Νοεμβρίου 2014, Πάτρα.

Αλιφραγκής, Δ., 2015. Το έδαφος: Διαχείριση, Προστασία, Βελτίωση και Αποκατάσταση των Λειτουργιών του. Εκδόσεις Αϊβάξη. Θεσσαλονίκη

Γεώργιος Α. Καραμπουρνιώτης, Γεώργιος Λιακόπουλος, Δημοσθένης Νικολόπουλος, «Φυσιολογία Καταπονήσεων των Φυτών», 2012, 175-182, 303-304

Δημητριάδης Α., Βέργου Α., Βλαχογιάννης Ν., Η ρύπανση της Λαυρεωτικής χερσονήσου και του αστικού περιβάλλοντος του Λαυρίου από τα μεταλλευτικά μεταλλουργικά απορρίμματα και οι επιπτώσεις στην υγεία του τοπικού πληθυσμού, Πρακτικά Θ Επιστημονικής Συνάντησης Νοτιοανατολικής Αττικής, σσ. 579, 582, 585, 589-595, Λαύριο, 13-16 Απριλίου 2000.

ΕΛΣΤΑΤ, 2021: <https://www.statistics.gr/> www.statistics.gr/2021-census-res-popresults (απογραφή Λαύριο 2021)

Καλαϊτζή, Χαρίκλεια, Πτυχιακή Διατριβή « Η αντράκλα (*Portula oleracea* L.) ως ζιζάνιο και λαχανευόμενο φυτό», 2004

Καππάτος, Ν. (2015). Φυτοαπόσπαση βαρέων μετάλλων από ρυπασμένα εδάφη με ενεργειακά φυτά. Διατριβή διδακτορικού επιπέδου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών, Τομέας Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών, Εργαστήριο Μεταλλουργίας. DOI: 10.12681/eadd/42714.

Καραμπουρνιώτης, Γ.Α. (2003). Φυσιολογία καταπονήσεων των φυτών. Αθήνα: Εκδόσεις Έμβρυο.

Μαρμάνη Μ., Μαρμάνη Φ. (2007) Λαύριο Περιήγηση στην Πόλη. Δημητριάδης, Αλ. (Συντάκτης), 1999δ. Γεωχημικός Άτλας της Αστικής Περιοχής του Λαυρίου για Περιβαλλοντική Προστασία και Σχεδιασμό. Στην: Αποκατάσταση Εδάφους στο Δήμο Λαυρίου, Τόμος 2. Έκθεση Ι.Γ.Μ.Ε. Ε8272, Αθήνα, σελ. 222

Μήτσιος Ι.(2004). Γονιμότητα εδαφών θρεπτικά στοιχεία φυτών. Μακροθρεπτικά , μικροθρεπτικά και βαρέα μέταλλα. Μέθοδοι και εφαρμογές ,Zymel ,Αθήνα.

Μπράτσος Ιωάννης (2021) «Χρήση υλικών δέσμευσης σε ρυπασμένο με βαρέα μέταλλα έδαφος: επίδραση σε φυσιολογικά και αναπτυξιακά χαρακτηριστικά της γλιστρίδας (*Portulaca oleracea*)». Πτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Παπαθεοδώρου Σοφία-Άρτεμις (2015) «Διαθεσιμότητα βαρέων μετάλλων ενός έντονα ρυπασμένου εδάφους σε τρία είδη φυτών». Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Τσιτσέλης, Α. (2009). Προσρόφηση αρσενικού (As) σε γκαιτίτη, μπεντονίτη, ζεόλιθο, compost και *posidonia oceanica* [Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος]. <http://hdl.handle.net/11615/1340>