



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ  
ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΖΙΖΑΝΙΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**«Χρήση υλικών δέσμευσης σε ρυπασμένο με βαρέα μέταλλα  
έδαφος: επίδραση σε φυσιολογικά και αναπτυξιακά  
χαρακτηριστικά της γλιστρίδας (*Portulaca oleracea*)»**

**Μπράτσος Ιωάννης**

**Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Λεβίζου Ευθυμία**

**Βόλος, 2021**

**«Χρήση υλικών δέσμευσης σε ρυπασμένο με βαρέα μέταλλα έδαφος: επίδραση σε φυσιολογικά και αναπτυξιακά χαρακτηριστικά της γλιστρίδας (*Portulaca oleracea*)»**

**“Use of stabilization agents in heavy metal polluted soil: impact on physiological and growth characteristics of purslane (*Portulaca oleracea*)”**

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

**Λεβίζου Ευθυμία**

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

**Αντωνιάδης Βασίλειος**

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

**Καρκάνης Ανέστης**

Επίκουρος 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**

Θέλω να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια Ευθυμία Λεβίζου για την εμπιστοσύνη, την βοήθεια και την υπομονή της σε όλη την διάρκεια της Πτυχιακής Εργασίας μου. Επίσης τους Διδακτορικούς Γιώργο Θαλασσινό και Εύα Τσουμαλάκου για την βοήθεια και την υπομονή τους για την πραγματοποίηση του πειράματος αλλά και των στατιστικών αναλύσεων. Τους συμφοιτητές μου Γιώργο Ζινδριλή και Κώστα Ευθυμίου για την συνεργασία μας και την βοήθειά τους.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξή της όλα τα χρόνια των σπουδών μου, όπως και τους αγαπημένους φίλους μου Ευριπίδη Γκάρλα, Νίκο Μπακιρτζή, Κώστα Σφατσίρα, Κωνσταντίνο Κουτσουπάκη και Δημήτρη Φραντζή, για την στήριξή τους προς το πρόσωπό μου ώστε να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τον Δημήτρη Χατζηπαναγιωτίδη και Αντώνη Κούρτη για την ψυχολογική στήριξη που μου πρόσφεραν σε όλη αυτή τη διάρκεια.

# Περιεχόμενα

## Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	6
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1 Γενικά για τα Βαρέα Μέταλλα .....	7
1.2 Τα Βαρέα Μέταλλα στο Έδαφος .....	9
1.2.1 Το έδαφος του Λαυρίου.....	10
1.3 Προβλήματα που προκαλούν τα βαρέα μέταλλα στα φυτά.....	11
1.3.1 Είσοδος των βαρέων μετάλλων στα φυτά .....	11
1.5 Κατηγορίες φυτών με βάση την αφομοίωση των βαρέων μετάλλων .....	12
1.5.1 Φυτά Υπερσυσσωρευτές.....	13
1.5.2 Φυτά μη-υπερσυσσωρευτές .....	14
1.6 Μέθοδοι απορρύπανσης και αποκατάστασης του εδάφους .....	14
1.7 Εδαφοβελτιωτικά Υλικά Δέσμησης Βαρέων Μετάλλων .....	17
1.8 Λίγα λόγια για την Χλωροφύλλη .....	19
1.9 ΓΛΥΣΤΡΙΔΑ .....	21
Σκοπός της Εργασίας.....	23
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	24
2.1 Γενικά.....	24
2.2 Πειραματικός Σχεδιασμός.....	24
2.3 Μετρήσεις-Αναλύσεις.....	26
2.3.1 Μετρήσεις κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου .....	26
2.3.2 Τελική συγκομιδή .....	28
2.4 Στατιστική Επεξεργασία των δεδομένων.....	30
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	31
4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	44
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	46
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	48

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να μελετηθούν οι φυσιολογικές αποκρίσεις του φυτού της γλιστρίδας (*Portulaca oleracea*), σε έδαφος με υψηλές συγκεντρώσεις διαφόρων βαρέων μετάλλων από την Βιομηχανική Περιοχή του Λαυρίου, στο οποίο προστέθηκαν εδαφοβελτιωτικά υλικά δέσμευσης. Συγκεκριμένα δοκιμάστηκαν δύο συγκεντρώσεις (2% και 4% επί ξηρού εδάφους) από τα παρακάτω υλικά: α) αποχωρήματα εντόμων (frass), β) βιοεξανθρακώματα (biochar) και γ)  $\text{CaCO}_3$ . Μάρτυρας θεωρήθηκε η μεταχείριση κατά την οποία τα φυτά αναπτύχθηκαν σε έδαφος Λαυρίου χωρίς την προσθήκη υλικών δέσμευσης. Μετρήθηκαν η συγκέντρωση των ολικών χλωροφυλλών και παράμετροι του φθορισμού της χλωροφύλλης *aip vino*, κατά τακτά χρονικά διαστήματα σε όλη την αναπτυξιακή περίοδο που διήρκεσε περισσότερο από 2,5 μήνες. Κατά την συγκομιδή, καταγράφηκαν αναπτυξιακές παράμετροι των φυτών, όπως νωπή και ξηρή βιομάζα υπέργειου μέρους και ριζών, ύψος και βάρος βλαστών. Τα αποτελέσματα υπέδειξαν ότι οι χαμηλές συγκεντρώσεις frass (2%) βελτίωσαν όλες τις αναπτυξιακές παραμέτρους της γλιστρίδας επιδρώντας θετικά στις φυσιολογικές διεργασίες που καταγράφηκαν. Αντίθετα, η συγκέντρωση frass 4% επέδρασε αρνητικά στην ανάπτυξη της γλιστρίδας, αποδείχτηκε λοιπόν ισχυρή δόση που με κάποιο τρόπο δεν ευνοεί το φυτό, ενδεχομένως δε να μπαίνουν και ζητήματα τοξικότητας. Η μεταχείριση με τη χαμηλή συγκέντρωση Biochar εμφάνισε καλές αποδόσεις, παρόμοιες με την αντίστοιχη του frass, με την οποία δεν είχε σημαντικές διαφορές στις περισσότερες μετρηθείσες παραμέτρους. Ενδιαφέρον στοιχείο ήταν ότι η προσθήκη  $\text{CaCO}_3$  δεν απέδωσε, καθώς σε όλες τις μετρήσεις αναπτυξιακών και φυσιολογικών παραμέτρων καταγράφηκαν τιμές που δεν ήταν μεγαλύτερες από τα φυτά του μάρτυρα. Συμπερασματικά, εάν τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας σχετικά με την ανάπτυξη του φυτού συνδυαστούν με θετικά αποτελέσματα της έρευνας που θα ακολουθήσει σχετικά με την απορρόφηση των μετάλλων ή την καθήλωσή τους στο έδαφος, τότε μπορεί να προταθεί η χρήση χαμηλών συγκεντρώσεων frass και biochar ως εδαφοβελτιωτικά υλικά δέσμευσης που μπορούν να εξασφαλίσουν μία σχετικά καλή ανάπτυξη της γλιστρίδα σε ένα τόσο ρυπασμένο με βαρέα μέταλλα έδαφος, όπως αυτό του Λαυρίου.

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Γενικά για τα ΒαρέαΜέταλλα

Όπως είναι γνωστό οι φυτικοί οργανισμοί χρειάζονται έναν αριθμό θρεπτικών στοιχείων για την ανάπτυξή τους, τα οποία αντλούν κατά κύριο λόγο από το έδαφος. Αν κάποιο από αυτά τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία βρίσκεται σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις στο έδαφος σε σύγκριση με τις ανάγκες του φυτού, τότε αυτό δεν έχει κανονική ανάπτυξη και δεν ολοκληρώνει φυσιολογικά τον βιολογικό του κύκλο. Τα θρεπτικά στοιχεία διακρίνονται σε μακροστοιχεία και ιχνοστοιχεία ανάλογα με την συγκέντρωσή τους που απαιτείται στους φυτικούς ιστούς. Τα μακροστοιχεία απαιτούνται σε μεγάλες ποσότητες (>1000 ppm επί του ξηρού ιστού), ενώ τα ιχνοστοιχεία σε μικρότερες συγκεντρώσεις (<100 ppm επί του ξηρού ιστού) (Συμεωνίδης 2011). Τα μακροστοιχεία είναι C, O, H, N, K, P, S, Ca και Mg ενώ τα ιχνοστοιχεία B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni και Zn (Kabata-Pendias and Pendias, 2011).

Ωστόσο το έδαφος περιέχει και ένα πλήθος μη απαραίτητων στοιχείων, τα οποία είναι δυνατό να εισέλθουν στους φυτικούς ιστούς, παρά την υψηλή εκλεκτικότητα των μεμβρανών των φυτικών κυττάρων όσον αφορά την περατότητα τους. Πολλά από αυτά τα στοιχεία όπως ο μόλυβδος, το κάδμιο, ο υδράργυρος, το αρσενικό και άλλα μεταλλοειδή είναι ιδιαίτερα τοξικά.

Με τον όρο βαρέα μέταλλα περιγράφεται γενικότερα μια ομάδα μετάλλων με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο του 20 και πυκνότητα υψηλότερη των 5 g cm<sup>-3</sup>, στην οποία δεν περιλαμβάνονται τα αλκάλια και οι αλκαλικές γαίες. Στα βαρέα μέταλλα περιλαμβάνονται και ορισμένα στοιχεία όπως ο χαλκός, το νικέλιο, το κοβάλτιο, το μολυβδαίνιο και ο ψευδάργυρος (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012), τα οποία σε φυσιολογικές τιμές είναι απαραίτητα ιχνοστοιχεία για βασικές λειτουργίες του φυτού, ωστόσο όταν υπερβαίνουν αυτές τις τιμές μπορούν να γίνουν ιδιαίτερα τοξικά και επικίνδυνα.

Η λίστα των βαρέων μετάλλων 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). Ως φυσικές πηγές θεωρούνται όσες σχετίζονται με την γεωχημεία του φλοιού της Γης, την αποσάθρωση των μητρικών

πετρωμάτων και τις ατμοσφαιρικές αποθέσεις (Μπλάνας, 2013). Στις *ανθρωπογενείς πηγές* συγκαταλέγονται η γεωργία (φωσφορικά λιπάσματα και φυτοπροστατευτικές ουσίες), η ιλύς που προέρχεται από βιολογικούς καθαρισμούς και χρησιμοποιείται στη γεωργία, η παραγωγή ενέργειας, η εξόρυξη ορυκτών, οι καύσεις μηχανών (βενζίνη, πετρέλαιο, καθώς και λιπαντικά και καταλύτες αυτοκινήτων), η καύση ορυκτών και συνθετικών καυσίμων, η λειτουργία ειδικών κατηγοριών βιομηχανιών, και η χρήση πυρομαχικών για διάφορους λόγους (Μπλάνας, 2013). Στην Ελλάδα οι περιοχές με την μεγαλύτερη ρύπανση εδάφους λόγω βαρέων μετάλλων είναι οι Βιομηχανικές Περιοχές σε Αθήνα (Ελευσίνα), Θεσσαλονίκη, Καβάλα (Βιομηχανία Φωσφορικών Λιπασμάτων), Λαύριο, Βόλο κ.α.

Διάφοροι μηχανισμοί ευθύνονται για την τοξικότητα των βαρέων μετάλλων στους ζωντανούς οργανισμούς. Ο κυριότερος από αυτούς είναι η δραστηριοποίηση ενζύμων, λόγω κυρίως της δέσμευσης των ιόντων των βαρέων μετάλλων σε θέσεις-κλειδιά για τη λειτουργία τους. Καθώς τα ενζυμικά συστήματα εκτελούν θεμελιώδεις διεργασίες στους οργανισμούς, η στόχευση της λειτουργίας τους από τους συγκεκριμένους ρυπαντές εξηγεί την αυξημένη τοξική τους δράση. Επίσης, η διαπερατότητα των μεμβρανών επηρεάζεται έντονα από την παρουσία βαρέων μετάλλων με τελικό αποτέλεσμα την προβληματική μεταφορά ιόντων και οργανικών μορίων διαμέσου της μεμβράνης, κάτι που επηρεάζει την κυτταρική ομοιόσταση. Τέλος, σημαντικός μηχανισμός τοξικότητας είναι η αλληλεπίδραση των βαρέων μετάλλων με προϊόντα του πρωτογενούς μεταβολισμού που καταλήγει στη δημιουργία σταθερών ιζημάτων ή χηλικών ενώσεων (Sayed 1999). Τα μέταλλα έχουν την ιδιότητα να συσσωρεύονται σε διάφορα τμήματα των οργανισμών και να εισέρχονται με αυτό τον τρόπο στην τροφική αλυσίδα. Φτάνοντας έτσι στον άνθρωπο μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία και την ευζωία του, ιδιαίτερα εάν καταναλωθούν σε μεγάλες ποσότητες ή λόγω μακροχρόνιας έκθεσης. Η τοξικότητα βαρέων μετάλλων αντιπροσωπεύει μια ασυνήθιστη, ωστόσο κλινικά διακριτή ιατρική κατάσταση. Η συμπτωματολογία μπορεί κατά περίπτωση να περιλαμβάνει απώλεια μνήμης, αυξανόμενες αλλεργικές αντιδράσεις, υψηλή πίεση, κατάθλιψη, αλλαγή διάθεσης, οξυθυμία, επιθετική συμπεριφορά, αϋπνίες και κούραση. Εάν η αιτία της τοξικότητας δεν αναγνωριστεί ή η θεραπευτική προσέγγιση είναι λάθος, συχνά οδηγεί σε σοβαρή νόσο που μπορεί να επιφέρει και τον θάνατο.



## **1.2 Τα Βαρέα Μέταλλα στο Έδαφος**

Το έδαφος είναι ο τελικός αποδέκτης των βαρέων μετάλλων που προέρχονται από τις φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Φτάνουν σε αυτό είτε άμεσα (όπως π.χ. με την αγροτική εφαρμογή, τα στερεά και υγρά βιομηχανικά απόβλητα) είτε έμμεσα δια των ατμοσφαιρικών ρυπογόνων αιωρημάτων και κατακρημνίσεων. Στο έδαφος τα βαρέα μέταλλα παραμένουν, σταθεροποιούνται σε διάφορες μορφές και δύσκολα απομακρύνονται από αυτό. Η κινητικότητα τους, αλλά και το εάν σχηματίζουν ή όχι σύμπλοκα με οργανικές ενώσεις, εξαρτάται τόσο από το είδος των βαρέων μετάλλων, όσο και από τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους όπως: pH, δυναμικό οξειδοαναγωγής, περιεκτικότητα εδάφους σε οργανική ουσία και ανθρακικά άλατα, και ιοντοανταλλακτική ικανότητα.

Σε ότι αφορά τη διαθεσιμότητα των βαρέων μετάλλων για απορρόφηση από τα φυτά, υπάρχουν διαφορετικές περιπτώσεις. Ένα μέρος μπορεί να βρίσκεται σε διαλυτές και ανταλλάξιμες μορφές που μπορούν με σχετική ευκολία να απορροφηθούν από τα φυτά. Ένα άλλο μέρος μπορεί να δεσμεύεται στην οργανική ουσία του εδάφους και να μην είναι άμεσα διαθέσιμο στα φυτά. Όμως με τη δράση της μικροβιακής βιοκοινωνίας του εδάφους αλλά και άλλες φυσικοχημικές διαδικασίες να καθίσταται διαθέσιμο μετά από αρκετό χρόνο. Τέλος, υπάρχει και ένα μέρος των βαρέων μετάλλων που σχηματίζει σύμπλοκα με συστατικά του εδάφους τα οποία είναι αδιάλυτα και μη διαθέσιμα για απορρόφηση από τα φυτά.

Η μείωση της δραστηριότητας των μικροοργανισμών του εδάφους λόγω της παρουσίας βαρέων μετάλλων έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση των βιολογικών διεργασιών στο έδαφος, όπως η χουμοποίηση, η αμμωνιοποίηση και η νιτροποίηση. Αυτό έχει δευτερογενείς επιπτώσεις στις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους, όπως στην κίνηση των θρεπτικών στοιχείων και στην αποικοδόμηση τοξικών ουσιών που καταλήγουν στο έδαφος όπως π.χ. τα γεωργικά φάρμακα, αλλά και στη σταθερότητα της δομής του.

Οι φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητές του εδάφους επηρεάζουν σε καθοριστικό βαθμό την γονιμότητα του, άρα οι μεταβολές που προαναφέρθηκαν ως αποτέλεσμα της παρουσίας αυξημένων συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων επιφέρουν μείωση της παραγωγικής ικανότητάς του. Η δυσμενής επίδραση των βαρέων

μετάλλων στην γονιμότητα του εδάφους εμφανίζεται όταν η συγκέντρωσή τους στο έδαφος υπερβεί τις οριακές τιμές. Προτού όμως εκδηλωθούν τα προβλήματα τοξικότητας στα φυτά, επέρχεται αύξηση της συγκέντρωσης των τοξικών βαρέων μετάλλων στους φυτικούς ιστούς και με αυτό τον τρόπο μειώνεται η ποιοτική αξία των παραγόμενων προϊόντων.

### **1.2.1 Το έδαφος του Λαυρίου**

Το Λαύριο Αττικής βρίσκεται νοτιοανατολικά της Αθήνας σε απόσταση 54 χλμ και αριθμεί περίπου 10.000 κατοίκους. Είναι μια περιοχή με έντονη δραστηριότητα στον κλάδο του Μετάλλου που έχει αρχίσει από την αρχαιότητα και συνεχίζεται μέχρι σήμερα, ταυτόχρονα με την σύγχρονη βιομηχανική ανάπτυξη. Τόσοι αιώνες έντονης μεταλλευτικής και μεταλλουργικής δραστηριότητας έχουν οδηγήσει σε πολύ σημαντική υποβάθμιση τόσο του φυσικού, όσο και του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος. Μία από τις σημαντικότερες συνιστώσες αυτής της υποβάθμισης είναι η συσσώρευση τοξικών αποβλήτων που περιλαμβάνουν μεγάλες ποσότητες As, Cd, Cu, Fe, Hg, Pb και Zn (**Makropoulos et al., 1991**). Ταυτόχρονα, το αποτύπωμα της υποβάθμισης στην υγεία των ανθρώπων που ζουν στην ευρύτερη περιοχή εμπνέει σοβαρές ανησυχίες. Επιδημιολογικές έρευνες που διεξήχθησαν στην περιοχή κατά την δεκαετία του 1980 για τον προσδιορισμό των επιπέδων μολύβδου στο αίμα παιδιών στο Λαύριο απέδειξαν ότι στο 95% των δειγμάτων η περιεκτικότητα μολύβδου υπερέβαινε το όριο ασφαλείας των 10mg/100ml, με μέση τιμή 19.24mg/100ml (διακύμανση 5.98-60.49mg/100 ml), ενώ στο αίμα των παιδιών από περιοχή-μάρτυρα (Λουτράκι) καταγράφηκε μία μέση τιμή 5.14 mg/100ml (διακύμανση 1.33-13.58 mg/100ml) (**Makropoulos et al., 1991**). Σε μία άλλη έρευνα που εξέτασε τη συγκέντρωση αρσενικού σε ούρα 24ώρου σε παιδιά του Λαυρίου βρέθηκε και πάλι ισχυρή επιβάρυνση με το 8% των περιπτώσεων να βρίσκονται αρκετά υψηλότερα από το επιτρεπτό όριο των 20 μg/24 h (**Eikmann et al. 1991**).

Τα κύρια μεταλλεύματα στο Λαύριο είναι ψευδαργύρου, μολύβδου, σιδήρου, μεικτά θειούχα ή οξειδωμένα και ανθρακικά ορυκτά μολύβδου. Επίσης Στο Λαύριο διακρίνουμε πρωτογενή και δευτερογενή μεταλλοφορία (**Μαρίνος και Petrascheck, 1956**). Στην πρωτογενή παρατηρούμε δύο μεταλλογενετικές διαπλάσεις: Τη

σιδηρομαγνησιούχο (Fe/Mn-ούχος ± Pb/Zn) που αποτελείται κυρίως από μαγνησιούχο αγκερίτη ή ροδοχρωσίτη, βαρύτη, χαλαζία και φθορίτη και τη μικτή θειούχο, από σφαλερίτη, σιδηροπυρίτη, γαληνίτη, μαγνητοπυρίτη και αρσеноπυρίτη, με σύνδρομα ορυκτά φθορίτη, ασβεσίτη, δολομίτη, αγκερίτη, σιδηρούχο ροδοχρωσίτη, χαλαζία, βαρύτη, χαλκηδόσιο.

### **1.3 Προβλήματα που προκαλούν τα βαρέα μέταλλα στα φυτά**

Η παρουσία βαρέων μετάλλων σε τοξικά επίπεδα στο έδαφος έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση της ανάπτυξης των φυτών αλλά και την υποβάθμιση της ποιότητας των καλλιεργούμενων βρώσιμων ειδών. Αυτά είναι αποτελέσματα συγκεκριμένων μηχανισμών με τους οποίους τα βαρέα μέταλλα παρεμβαίνουν στη φυσιολογική φυτική λειτουργία (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012). Πιο συγκεκριμένα έχουν ταυτοποιηθεί ως μεταβολικές δυσλειτουργίες τα εξής:

- 1) Προβλήματα στην είσοδο και έξοδο ιόντων όπως  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $NO_3^-$  και  $K^+$  μέσω των μεμβρανών. Δευτερογενές αποτέλεσμα των παραπάνω είναι οι διαταραχές κατά τη διαβίβαση σήματος στα συστήματα όπου συμμετέχουν ιόντα ασβεστίου,
- 2) προβλήματα στη λειτουργία της φωτοσυνθετικής αλλά και της αναπνευστικής αλυσίδας μεταφοράς ηλεκτρονίων, κάτι που συνοδεύεται βέβαια από μείωση της διαθέσιμης ενέργειας,
- 3) μη αντιστρεπτή παρεμπόδιση της δραστηριότητας ενζυμικών συστημάτων, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα,
- 4) αυξημένη δημιουργία ενεργών μορφών οξυγόνου στα φυτικά κύτταρα, όπως άλλωστε όλες οι καταπονήσεις.

#### **1.3.1 Είσοδος των βαρέων μετάλλων στα φυτά**

Γενικά, η είσοδος των μετάλλων στα φυτικά κύτταρα πραγματοποιείται με απλή διάχυση μέσω μη ειδικών πόρων, μέσω ιοντικών καναλιών, όπως αυτά που μεταφέρουν ασβέστιο, κάλιο και νάτριο, ενώ είναι δυνατόν να εισέρχονται και με

δευτερογενή ενεργό μεταφορά, μέσω πρωτεϊνικών μεμβρανικών μεταφορέων (Taiz et al. 2016).

Οι διαλυμένες ουσίες απορροφώνται από το έδαφος και εισέρχονται στο εσωτερικό της ρίζας με αποπλαστική μεταφορά, ενώ η μετακίνησή τους στα ανώτερα μέρη του φυτού εμπλέκει απαραίτητα συμπλαστική μεταφορά (Taiz et al. 2016). Αντίστοιχα υπεύθυνες για τη μεταφορά των μετάλλων είναι **τρεις διαδικασίες**, η *αποπλαστική μετακίνηση στα κύτταρα του φλοιού της ρίζας*, η σε κάποιο σημείο της διαδρομής μέσα στη ρίζα *μετάπτωση σε συμπλαστική μετακίνηση* και η *είσοδος των ιόντων στο ξύλωμα*. Στην είσοδο των μεταλλικών ιόντων στο ξύλωμα εμπλέκονται πρωτεϊνικοί μεταφορείς (Taiz et al. 2016). Οι μεμβράνες και οι αντίστοιχοι μεταφορείς αποτελούν τα σημεία ελέγχου που είναι αρκετά κατά την διαδρομή των μετάλλων από το έδαφος μέχρι τους μεταβολικά ευαίσθητους ιστούς του υπέργειου μέρους. Στους ιστούς αυτούς σημαντικό ρόλο παίζει η αποθήκευση των βαρέων μετάλλων στο χυμοτόπιο όπου μπορεί να φτάσουν σε υψηλό βαθμό συσσώρευσης λόγω του μεγάλου αριθμού μεμβρανικών μεταφορέων στον τονοπλάστη (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012).

### **1.5 Κατηγορίες φυτών με βάση την αφομοίωση των βαρέων μετάλλων**

Γενικώς τα φυτικά είδη δεν έχουν αναπτύξει κάποια ανθεκτικότητα στις υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων διότι η ύπαρξή αυτών στο συμπλάστη και πιο συγκεκριμένα στο κυτταρόπλασμα και στα οργανίδια δεν συμβαδίζει με την ομαλή ανάπτυξή τους. Ωστόσο υπάρχουν ορισμένα φυτικά είδη τα οποία μπορούν να επιβιώσουν σε αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, είναι τα λεγόμενα *μεταλλόφυτα*. Η επιβίωση τους επιτυγχάνεται διότι ακολουθούν την στρατηγική της αποφυγής της καταπόνησης. Η στρατηγική αυτή βασίζεται σε αμυντικούς μηχανισμούς με τους οποίους τα είδη αυτά των φυτών αποκλείουν την είσοδο των βαρέων μετάλλων στα κύτταρα ή τα αποθηκεύουν στο χυμοτόπιο. Με τον τρόπο αυτόν τα μεταλλόφυτα δεν έχουν την εμπειρία υψηλών συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων στον συμπλάστη των κυττάρων τους, ο οποίος συνεχίζει να είναι ευαίσθητος στην παρουσία των ρυπαντών. Ο αποκλεισμός των τοξικών μετάλλων πραγματοποιείται με τον παρακάτω τρόπο: αρχικά έχουμε την καθήλωση των ιόντων

των τοξικών μετάλλων στο κυτταρικό τοίχωμα, κυρίως σε μόρια πηκτινών. Αν υπάρξει είσοδος των τοξικών ιόντων, έχουμε δέσμευση τους στο κυτταρόπλασμα με τη μορφή χηλικών συμπλόκων και μεταφορά των συμπλόκων αυτών στο χυμοτόπιο όπου έχουμε εκ νέου σχηματισμό συμπλόκου με οργανικά οξέα. Ακολουθεί η αποβολή των οργανικών οξέων και η δημιουργία χηλικών συμπλόκων με τα μεταλλικά ιόντα στη ριζόσφαιρα, και η ενεργός μεταφορά στον αποπλάστη.

Σε κάποιες περιπτώσεις φυτών έχει αναπτυχθεί κάποια γενετική ικανότητα, η οποία μπορεί να διαφοροποιηθεί μέσω εγκλιματισμού, με την οποία τα φυτά προσλαμβάνουν τα τοξικά μέταλλα και έχουν την ικανότητα να τα συσσωρεύουν στους ιστούς τους (και σε αυτούς του υπέργειου τμήματος), σε υψηλές συγκεντρώσεις στις οποίες άλλα φυτικά είδη δεν θα μπορούσαν να ανταπεξέλθουν. Τα φυτά αυτά ονομάζονται **υπερσυσσωρευτές**.

### **1.5.1 Φυτά Υπερσυσσωρευτές**

Τρία είναι τα χαρακτηριστικά που κάνουν τη διαφορά σε αυτήν την κατηγορία των φυτών, σε σχέση με τα ευαίσθητα: 1) διαθέτουν μια αυξημένη ικανότητα στην πρόσληψη των βαρέων μετάλλων 2) γρήγορη μεταφορά των μεταλλικών ιόντων από τη ρίζα προς το βλαστό και 3) ισχυρή ικανότητα αποτοξίνωσης και αδρανοποίησης των μετάλλων στα φύλλα.

Αυτά τα χαρακτηριστικά οφείλονται στην υπερέκφραση συγκεκριμένων γονιδίων. Για παράδειγμα τα γονίδια πρωτεϊνών ZIP σχετίζονται με την πρόσληψη των βαρέων μετάλλων κωδικοποιώντας μεταφορείς κατιόντων που εντοπίζονται στην πλασματική μεμβράνη. Στην υπερέκφραση τους οφείλεται η ισχυρή ικανότητα πρόσληψης των βαρέων μετάλλων. Επίσης, οι πρωτεΐνες εκροής τοξινών συμμετέχουν στη γρήγορη μεταφορά των ιόντων προς το βλαστό, ενώ η ικανότητα αποτοξίνωσης και αδρανοποίησης των ιόντων των μετάλλων οφείλεται στην οικογένεια πρωτεϊνών μεταφοράς μετάλλων.

Μέχρι στιγμής έχουν χαρακτηριστεί ως υπερσυσσωρευτές περίπου 500 είδη αγγειόσπερμων. Χαρακτηριστικοί εκπρόσωποι είναι είδη του γένους *Astragalus*, *Silene*, *Agrostis*, *Minuartia*. Ενδιαφέρον είναι το στοιχείο ότι οι υπερσυσσωρευτές

ανήκουν σε οικογένειες γενετικά απομακρυσμένες μεταξύ τους, όπως οι Asteraceae, Poaceae, Cyperaceae, Brassicaceae, Caryophyllaceae, Fabaceae, Euphorbiaceae, Lamiaceae, Violaceae. Πολλά είδη χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη οικοτύπων με διαφορετική ικανότητα συσσώρευσης ενός τοξικού μετάλλου. Οι περισσότεροι υπερσυσσωρευτές είναι ενδημικά είδη μεταλλοφόρων εδαφών και κυρίως σερπεντινικών. (Καραμπουρνιώτης κ.α., 2012)

### **1.5.2 Φυτά μη-υπερσυσσωρευτές**

Τα φυτικά είδη που δεν εμπίπτουν στην κατηγορία των υπερσυσσωρευτών αντιμετωπίζουν πληθώρα προβλημάτων όταν αναπτυχθούν σε εδάφη μολυσμένα με Βαρέα Μέταλλα, τα οποία περιγράφονται στο Κεφάλαιο 1.3.1

## **1.6 Μέθοδοι απορρύπανσης και αποκατάστασης του εδάφους**

Το πρόβλημα της υψηλής συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων στο έδαφος και κατά συνέπεια στα φυτά έχει οδηγήσει στην αναζήτηση τρόπων αντιμετώπισης του, τόσο για οικολογικούς λόγους αποκατάστασης του φυσικού και αγροτικού περιβάλλοντος, όσο και για λόγους προστασίας του ανθρώπου, καλύτερης διατροφής του κ.ο.κ. Για να απομακρυνθούν τα βαρέα μέταλλα και να περιοριστεί η τοξικότητά σε έδαφος και φυτά, δηλαδή να γίνει αποκατάσταση των εδαφών υπάρχουν διάφορες μέθοδοι. Αυτές είναι είτε φυσικές μέθοδοι με τις οποίες δεν επηρεάζουμε τις φυσικοχημικές ιδιότητες των ρύπων, είτε χημικές μέθοδοι όπου τις τροποποιούμε με σκοπό να μειώσουμε τις αρνητικές επιδράσεις τους.

Οι φυσικές μέθοδοι γίνονται επιτόπου με μικρή διαταραχή του φυσικού περιβάλλοντος και περιλαμβάνουν:

- Υαλοποίηση
- Βιοαερισμό
- Φυτοεξυγίανση
- Έκπλυση

Υπάρχουν όμως και μέθοδοι που απαιτούν να επεξεργαστούμε το έδαφος, το οποίο μεταφέρεται σε άλλη περιοχή (*ex situ*) όπου το υποβάλλουμε σε ειδικές μεταχειρίσεις και επεξεργασίες για τον καθαρισμό του, όπως:

- **Εδαφική πλύση**
- **Εδαφικός διαχωρισμός**
- **Εδαφική εξαγωγή**
- **Βιοαποκατάσταση**

Στην *φυτοεξυγίανση*, η οποία είναι μια σημαντική και πολλά υποσχόμενη μέθοδος αποκατάστασης των εδαφών, χρησιμοποιούμε εξειδικευμένα φυτά τα οποία εμφανίζουν ανθεκτικότητα σε υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην φυτοεξυγίανση του εδάφους από βαρέα μέταλλα χωρίζονται κυρίως σε τρεις κατηγορίες:

**Φυτοσταθεροποίηση (*Phytostabilization*)**, η οποία περιλαμβάνει μηχανισμούς που στοχεύουν στην παρεμπόδιση της μετακίνησης των βαρέων μετάλλων στη διαδρομή έδαφος-φυτό, αδρανοποιώντας τα στο έδαφος είτε στα κύτταρα της ρίζας. Αυτό συμβαίνει λόγω α) της δράσης ριζικών εκκριμάτων που ακινητοποιούν τα βαρέα μέταλλα στη ριζόσφαιρα και β) της δυνατότητας καθήλωσης των ρυπαντών στη ρίζα, με αποκλεισμό της μεταφοράς τους στα υπέργεια μέρη του φυτού. Προϋποθέτει υψηλή αντοχή της ρίζας στα βαρέα μέταλλα και συγκεκριμένη δραστηριότητα αυτής ως προς τις εκκρίσεις.

**Φυτοεξαγωγή (*Phytoextraction*)**, η οποία βασίζεται στην αυξημένη απορρόφηση των βαρέων μετάλλων από τις ρίζες και την μεταφορά τους στα εναέρια μέρη του φυτού όπου συσσωρεύονται. Αξιοποιούνται φυτικά είδη που εμφανίζουν ικανότητα να απορροφήσουν υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, έχουν εκτεταμένο ριζικό σύστημα, υψηλό ρυθμό ανάπτυξης και μεγάλη παραγωγή βιομάζας στην οποία και αποθηκεύουν τους ρυπαντές, απομακρύνοντας τους με αυτό τον τρόπο από το έδαφος.

**Ριζοδιήθηση (*Rhizofiltration*)**: Πρόκειται για αντίστοιχη διαδικασία με την φυτοεξαγωγή, μόνο που εδώ έχουμε ανάπτυξη των φυτών σε θερμοκήπια με τη

μέθοδο της υδροπονίας και οι ρίζες που βρίσκονται στα υδατικά διαλύματα απορροφούν τα βαρέα μέταλλα και τα μεταφέρουν στο υπέργειο μέρος.

Όπως φαίνεται και στις κατηγορίες που προαναφέρθηκαν, η φυτοεξυγίανση στηρίζεται σε ορισμένους μηχανισμούς στους οποίους παίζει σημαντικό ρόλο και η έκκριση ουσιών από τις ρίζες των φυτών και περιλαμβάνουν τη δέσμευση των βαρέων μετάλλων στα χουμικά συστατικά του εδάφους, στα κυτταρικά τοιχώματα των κυττάρων των ριζών, τη χουμοποίηση κ.α. (Δανηλίδου, 2010). Βέβαια, τα φυτά που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να έχουν ένα σύνολο ιδιαίτερων χαρακτηριστικών όπως η γρήγορη ανάπτυξη, η ευελιξία ως προς τις απαιτήσεις σε εδαφικές και κλιματικές συνθήκες, αλλά και η μεγάλη παραγωγή βιομάζας.

Τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου είναι τα εξής (Δανηλίδου, 2010):

#### Πλεονεκτήματα

- Επιτρέπει τον *in situ* καθαρισμό, διότι δεν απαιτεί εξαγωγή του εδάφους και μεταφορά σε άλλο σημείο ώστε να υποστεί επιπλέον επεξεργασία, όπως συμβαίνει σε άλλες τεχνολογίες απορρύπανσης.
- Δεν παράγονται απόβλητα από αυτή καθαυτή την διαδικασία απορρύπανσης, όπως συμβαίνει σε άλλες τεχνολογίες.
- Λόγω των δύο παραπάνω χαρακτηριστικών θεωρείται οικονομική λύση.
- Έχει ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση της συγκέντρωσης των βαρέων μετάλλων στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει υπερβολική συσσώρευσή τους στο έδαφος.
- Βελτιώνει την ποιότητα του εδάφους ως προς τις φυσικοχημικές και βιολογικές του ιδιότητες καθώς η καλλιέργεια φυτών το εμπλουτίζει με οργανική ουσία και ενισχύει την μικροβιακή του δραστηριότητα.

#### Μειονεκτήματα

- Ο χρόνος που απαιτείται για ικανοποιητικά επίπεδα απορρύπανσης είναι μεγάλος (φτάνει σε πολλές περιπτώσεις πάνω από αιώνα).



- Η αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας εξαρτάται από τον όγκο του ρυπασμένου εδάφους και είναι μεγαλύτερη σε επιφανειακή ρύπανση (μέχρι περίπου ένα μέτρο).
- Καθώς στηρίζεται σε συγκεκριμένα φυτικά είδη, δεν θα είναι αποδοτική εάν οι περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής δεν ευνοούν την ανάπτυξη των ειδών αυτών.
- Εάν τα φυτά που καλλιεργούνται για φυτοεξυγίανση βοσκηθούν, τότε μεγεθύνεται ο κίνδυνος μεταφοράς των βαρέων μετάλλων στην τροφική αλυσίδα.
- Υπάρχει ζήτημα διαχείρισης/απόθεσης των φυτών που απορρόφησαν βαρέα μέταλλα αφότου συγκομιστούν.

### **1.7 Εδαφοβελτιωτικά Υλικά Δέσμευσης Βαρέων Μετάλλων**

Η δέσμευση των βαρέων μετάλλων στο έδαφος και η σταθεροποίησή τους σε αυτό μπορεί να μειώσει τα επίπεδα ρύπανσης μιας περιοχής καθώς συντελεί στην καθήλωση αυτών σε μορφές που είναι λιγότερο διαθέσιμες για τα φυτά, και εν πολλοίς αδιάλυτες (**Βουλγαρίδου 2015**). Στο στόχο αυτό συνεισφέρουν και διάφορα υλικά που μπορούν να προστεθούν στο έδαφος τα οποία είτε προσροφούν στην επιφάνειά τους τους ρύπους, είτε μειώνουν τη διαλυτότητα αυτών μέσω της δημιουργίας συμπλόκων. Μεταξύ αυτών των υλικών βρίσκονται μερικά εδαφοβελτιωτικά, δηλαδή υλικά που βελτιώνουν τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους με στόχο είτε την αύξηση της παραγωγικότητας μιας καλλιεργούμενης έκτασης ή την συνολική αναβάθμιση ενός υποβαθμισμένου ή/και ρυπασμένου εδάφους. Παρακάτω γίνεται αναφορά σε κάποια εδαφοβελτιωτικά και στις ιδιότητές τους.

#### ***Αποχωρήματα εντόμων (frass)***

Το υλικό που ονομάζεται «frass», προέρχεται από τα αποχωρήματα εντόμων, τα οποία καλλιεργούνται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε πρωτεΐνες. (**Poveda, 2021, Πάνος 2021**). Το frass περιλαμβάνει κυρίως στερεά απεκκρίματα και υπολείμματα τροφής των

καλλιεργούμενων εντόμων. Αποτελεί ένα στερεό απόβλητο υλικό, το οποίο μέσω της πέψης μετατρέπεται σε μια πλούσια ουσία και έτσι μπορεί να συμπληρώσει ή ακόμα και να αντικαταστήσει ανόργανα λιπάσματα. (Chavez & Uchanski, 2021, Πάνος 2021). Επειδή προέρχεται από την πέψη, είναι ένα υλικό ισορροπημένο όσο αφορά την περιεκτικότητά του σε N, P και K, ενώ είναι εύκολα διαθέσιμο και αφομοιώσιμο από τα φυτά (Chavez & Uchanski, 2021, Πάνος 2021). Οι μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι στιγμής δείχνουν ότι μπορεί να αξιοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό λίπασμα που μπορεί να αυξήσει τη γονιμότητα του εδάφους και κατά συνέπεια και την παραγωγικότητα των φυτών (Πάνος 2021). Συμβάλει λοιπόν στην αειφόρο ανάπτυξη της Γεωργίας, μειώνοντας τα χημικά σκευάσματα στους αγρούς. (Poveda, 2021, Πάνος 2021).

Τα είδη εντόμων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν γι' αυτόν τον σκοπό σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Αρχή Ασφάλειας Τροφίμων είναι τα εξής: *Muscadomestica*, *Hermetia illucens*, *Tenebriomolitor*, *Zophobas atratus*, *Alphitobus diaperinus* (Πάνος 2021).

### ***Βιοεξανθρακώματα (Biochar)***

Τα βιοεξανθρακώματα είναι άνυδρος ξυλάνθρακας που παρασκευάζεται με θερμική κατεργασία κάποιου είδους φυτικής βιομάζας, χωρίς την παρουσία αέρα. Τα χαρακτηριστικά τους εξαρτώνται από τις ιδιότητες της στάχτης της χρησιμοποιούμενης βιομάζας. Υπάρχει εκτεταμένη έρευνα για τη χρήση τους ως εδαφοβελτιωτικά (Βουλγαρίδου 2015). Πραγματικά η προσθήκη των υλικών αυτών στα εδάφη μπορεί να βελτιώσει τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες, αυξάνοντας τη γονιμότητα τους, επομένως και την αγροτική παραγωγή. Ιδιαίτερα για τα φυτά που απαιτούν αυξημένο pH, το biochar μπορεί να συνεισφέρει για να βελτιωθεί η απόδοση των καλλιεργειών, μειώνοντας την οξύτητα του εδάφους. Τέλος, φαίνεται ότι μπορεί να συνεισφέρει στην απορρύπανση των εδαφών που έχουν υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, μέσω της δέσμευσης των τελευταίων στις επιφάνειες τους που έχουν πορώδη δομή.

### ***Ανθρακικό ασβέστιο (CaCO<sub>3</sub>)***

Η μορφή αυτή του ανθρακικού ασβέστη απαντάται ως Ασβεστίτης και Δολομίτης. Αυτά τα ορυκτά αποτέλεσαν συστατικά μητρικών υλικών από τα οποία προέκυψαν τα περισσότερα εδάφη ή πιθανόν να σχηματίστηκαν και δευτερογενώς. Ο ρόλος του ως εδαφοβελτιωτικό περιλαμβάνει την αύξηση του pH όξινων εδαφών και την αποτροπή της οξύνισης εδαφών στα οποία εφαρμόζονται λιπάσματα για πολλά χρόνια. Επίσης, το ανθρακικό ασβέστιο βελτιώνει την δομή του εδάφους με αποφυγή διασποράς της αργίλου και απομακρύνει το Na από την ριζόσφαιρα. Τέλος, βοηθάει στην πρόσληψη των θρεπτικών στοιχείων από το έδαφος προς τα φυτά, στην ανθεκτικότητα των φυτών σε ασθένειες και εχθρούς και βελτίωση των καρπών των φυτών. (Τζανακάκης, 2020)

### **1.8 Λίγα λόγια για την Χλωροφύλλη**

Οι χλωροφύλλες είναι εξειδικευμένες πράσινες χρωστικές που απορροφούν φως. Βρίσκονται στους χλωροπλάστες μέσα στις δομές που ονομάζονται grana, τα οποία με τη σειρά τους βρίσκονται στα κύτταρα του μεσόφυλλου, τον πλέον ενεργό φωτοσυνθετικό ιστό (Taiz et al. 2016). Η χλωροφύλλη εμφανίζεται πράσινη στα μάτια μας γιατί απορροφά φως στο ερυθρό και κυανό τμήμα του φάσματος, έτσι μόνο ορισμένο φως, εμπλουτισμένο στα πράσινα μήκη κύματος (περίπου στα 550 nm) αντανακλάται.

Από χημικής άποψης η χλωροφύλλη είναι μια πορφυρίνη που περιέχει μαγνήσιο σε διάφορες αλυσίδες, δημιουργώντας έτσι διάφορους τύπους. Στα ανώτερα φυτά απαντώνται οι χλωροφύλλες a και b. Η διαδικασία της φωτοσύνθεσης με την οποία το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) της ατμόσφαιρας και το νερό μετατρέπονται σε γλυκόζη (C<sub>2</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) ξεκινά από τις φωτεινές αντιδράσεις που εμπλέκουν τη χλωροφύλλη. Η διέγερσή της λόγω απορρόφησης της φωτεινής ακτινοβολίας οδηγεί στην φωτοσυνθετική ροή των ηλεκτρονίων (σχήμα Z), μέσω της οποίας παράγεται αναγωγική δύναμη και ATP. Τα γεγονότα που συμβαίνουν σε επίπεδο χημείας και βιοφυσικής κατά τις φωτεινές αντιδράσεις δίνουν σημαντικές πληροφορίες για την

κατάσταση της φωτοσυνθετικής συσκευής μέσω μετρήσεων του φθορισμού της χλωροφύλλης *in vivo*.

Η διεργασία κατά την οποία ένα μόριο εκπέμπει ακτινοβολία μεγαλύτερου μήκους κύματος και ενέργεια μικρότερη από τη διεγείρουσα ακτινοβολία που δέχεται ονομάζεται Φθορισμός. Η μείωση της ενέργειας οφείλεται σε απώλειες υπό μορφή θερμότητας.

Η απορρόφηση του κυανού φωτός διεγείρει τη χλωροφύλλη, σε μια υψηλότερη ενεργειακή κατάσταση παρότι η απορρόφηση του ερυθρού φωτός, καθώς η ενέργεια των φωτονίων είναι υψηλότερη όταν το μήκος κύματος είναι βραχύτερο. Στην υψηλότερη διεγερμένη κατάσταση η χλωροφύλλη είναι άκρως ασταθής, αποβάλλει πολύ γρήγορα ορισμένη από την ενέργειά της ως θερμότητα προς τον περιβάλλοντα χώρο και εισέρχεται στη χαμηλότερη διεγερμένη κατάσταση, όπου μπορεί να είναι σταθερή για ένα μέγιστο χρόνο αρκετών νανοδευτερολέπτων ( $10^{-9}$ s). Στη χαμηλότερη διεγερμένη κατάσταση, η διεγερμένη χλωροφύλλη έχει αρκετές διαδρομές για τη διάθεση της διαθέσιμής της ενέργειας. Η χλωροφύλλη μπορεί να επανα-εκπέμψει ένα φωτόνιο και να επιστρέψει στη βασική της κατάσταση. Αυτή η διεργασία ονομάζεται **φθορισμός της χλωροφύλλης (Taiz et al. 2016)**.

Ο φθορισμός της χλωροφύλλης είναι ένας από τους τέσσερις μηχανισμούς αποδιέγερσης του διεγερμένου μορίου της, αποτελεί το 1-2% της απορροφηθείσας ενέργειας και σε θερμοκρασία δωματίου οφείλεται κατά 95% στο PSII (**Govindjee, 1995**).

Το φαινόμενο παρατηρήθηκε πρώτη φορά από τον David Brewster το 1834 και η σύνδεσή του με τις φωτοεξαρτώμενες αντιδράσεις της φωτοσύνθεσης αποδείχθηκε από πειράματα των Kautsky και Hirsch περίπου 100 χρόνια αργότερα. (**Govindjee, 1995**). Λόγω της σύνδεσής του με τις φωτεινές αντιδράσεις, η καταγραφή του φθορισμού της χλωροφύλλης αποτελεί ένα χρήσιμο, ταχύ και μη επεμβατικό εργαλείο μελέτης τους. Η μελέτη του φθορισμού της χλωροφύλλης παρέχει πληροφορία για την κατάσταση της φωτοσυνθετικής συσκευής και την ύπαρξη καταπονητικών παραγόντων. Κατά τα πειράματα των Kautsky και Hirsch (1931) παρατηρήθηκε πως έπειτα από παραμονή των φύλλων στο σκοτάδι ο φωτισμός τους με φως κορένουσας έντασης προκαλούσε μία απότομη και σημαντική άνοδο του φθορισμού της χλωροφύλλης. Ο φθορισμός ξεκινούσε από μία ελάχιστη τιμή, που καλείται πάγιος φθορισμός ( $F_0$ ), έφθανε μέχρι τη μέγιστη τιμή φθορισμού

(FM) και στη συνέχεια κατέληγε σε μία σταθερή τιμή (FS), μικρότερη της μέγιστης, η οποία εξαρτάται από την ένταση του φωτός. Ακόμα, διαπιστώθηκε πως η ταχεία φάση ανόδου του φθορισμού της χλωροφύλλης αντανακλά το τμήμα της φωτοσύνθεσης που οδηγεί στην παραγωγή φωτοχημικού έργου, ενώ η φάση μείωσης αντανακλά αντιστρόφως την αύξηση του ρυθμού αφομοίωσης του CO<sub>2</sub> (Strasser et al, 2000).

## **1.9 ΓΛΙΣΤΡΙΔΑ**

Η γλιστρίδα ή αλλιώς αντράκλα (*Portulaca oleracea*), ανήκει στην Οικογένεια Portulacaceae. Στις διάφορες περιοχές της Ελλάδας, λέγεται και αντραχλίδα, σκλιμίτσα, χοιροβότανο, ή τρευλό.

Χρησιμοποιείται σε σαλάτες ως δροσιστικό και θεωρείται βότανο, κατάλληλο καθαρκτικό του αίματος, καθώς επίσης και διουρητικό. Είναι ετήσιο σαρκώδες φυτό, φτάνει έως τα 30 εκατοστά σε ύψος, με βλαστούς πολύκλαδους που είτε έρπουν σε ορισμένους βιότοπους είτε είναι όρθιοι σε άλλους. (Καλαϊτζή Χαρίκλεια, 2004)

Τα φύλλα είναι παχιά, γυαλιστερά, σκούρα πράσινα, ωοειδή, αντίθετα και κατ' εναλλαγή. Τα ερμαφρόδιτα άνθη φύονται στις κορυφές των βλαστών, διαρκούν μόνο λίγες ώρες το πρωί, έχουν κίτρινο χρώμα και ανθίζουν καθ' όλη τη διάρκεια ανάπτυξης του φυτού. Ο καρπός είναι κάψα, πράσινος που περιέχει πολλούς μικρούς μαύρους σπόρους. Συλλέγεται το υπέργειο τμήμα του φυτού. (Καλαϊτζή Χαρίκλεια, 2004)

Η γλιστρίδα φαίνεται πως χρησιμοποιούνταν από την αρχαιότητα. Ο Θεόφραστος, ο πατέρας της βοτανικής, σύστηνε τη γλιστρίδα ως φάρμακο για την καρδιακή ανεπάρκεια, το σκορβούτο, τον πονόλαιμο, τον πόνο στα αφτιά, το οίδημα στις αρθρώσεις και την ξηροδερμία. Ο Διοσκουρίδης το χρησιμοποιούσε για θεραπεία πονοκεφάλων, δυσεντερίας, δάγκωμα σαυρών και φιδιών, θεραπεία ουροποιητικού και πεπτικού συστήματος, αναλγητικό καταπραϊντικό, αντιτυρετικό και αντί-υπερτασικό. (Καλαϊτζή Χαρίκλεια, 2004)

Η θρεπτικότητα της γλιστρίδας εκτιμάται πολύ, μετά από έρευνες για τα συστατικά της και τα οφέλη της στην ανθρώπινη διατροφή. Τα 100 g. γλιστρίδας περιέχουν 400 mg.  $\omega$ 3 φυτικού λιπαρού οξέος που ονομάζεται άλφα-λινολεϊνικό ή LNA – διαθέτει δηλαδή δεκαπέντε φορές περισσότερα  $\omega$ 3 από ότι τα περισσότερα μαρούλια που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Μια μερίδα γλιστρίδες καλύπτουν τις ημερήσιες ανάγκες σε βιταμίνη E και γλουταθειόνη που είναι ισχυρό αντιοξειδωτικό. Είναι γνωστές οι βοηθητικές δράσεις της βιταμίνης E και τα  $\omega$ 3 λιπαρών οξέων στην προστασία από τον καρκίνο, τις καρδιοπάθειες και τις φλεγμονώδεις παθήσεις. **(Καλαϊτζή Χαρίκλεια, 2004)**

Η μεγάλη περιεκτικότητα σε  $\omega$ 3-λιπαρά οξέα, κάνει τη γλιστρίδα ιδιαίτερα ωφέλιμη για τον ανθρώπινο οργανισμό. Η γλιστρίδα είναι ιδανική ως τονωτικό, σταματάει τον πονοκέφαλο που προκύπτει από δίψα ή ζέστη, αλλά και την ίδια την δίψα βάζοντας 2-3 φύλλα κάτω από τη γλώσσα. Επίσης, κοπανισμένη, χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση εγκαυμάτων. Περιέχει επίσης ασβέστιο, μαγνήσιο, σίδηρο, φώσφορο, κάλιο, βιταμίνη A, C, B και καροτενοειδή. **(Καλαϊτζή Χαρίκλεια, 2004)**

Για τους γαστρονόμους η γλιστρίδα είναι ένα ορεκτικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ποικίλους τρόπους. Έχει γεύση αλμυρόξινη όταν είναι ωμό και βρασμένο έχει την γεύση των χόρτων. Είναι γνωστό σαλατικό που φύεται άφθονα, χωρίς ιδιαίτερη καλλιέργεια κυρίως σε λαχανόκηπους. **(Καλαϊτζή Χαρίκλεια, 2004)**

Πολλές φορές καθίσταται ενοχλητικό στους λαχανόκηπους λόγω της αφθονίας του όπου η εκρίζωσή του θα πρέπει να γίνει πριν ανθίσει και "σποριάσει" που ομολογουμένως οι σπόροι του είναι πολυπληθείς και πολύ μικροί. Επίσης ένα είδος αντράκλας καλλιεργείται ιδιαίτερα ως καλλωπιστικό φυτό επειδή παράγει άνθη όλο το καλοκαίρι. Σημειώνεται επίσης ότι στην Ινδία είδος αντράκλας χρησιμοποιείται για επούλωση επίπονων πληγών.

## Σκοπός της Εργασίας

Η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού της Γης, καθώς και η ανεπτυγμένη βιομηχανική δραστηριότητα τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αυξήσει σημαντικά την ρύπανση του περιβάλλοντος και ιδιαίτερα των εδαφών από μεγάλες ποσότητες βαρέων μετάλλων που μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα στα φυτά καθώς και στον άνθρωπο.

Η φυτοαποκατάσταση όπως προαναφέρθηκε αποτελεί μια οικονομικά αποδοτική, περιβαλλοντικά βιώσιμη, πράσινη δηλαδή τεχνολογία που βασίζεται στην χρήση συγκεκριμένων φυτών που είναι ανθεκτικά στις αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων.

Στο πείραμά μας λοιπόν προσπαθήσαμε να πάμε ένα βήμα παρακάτω, εξετάζοντας την επίδραση που μπορεί να έχουν συγκεκριμένα υλικά δέσμευσης των βαρέων μετάλλων που χρησιμοποιούνται και ως εδαφοβελτιωτικά στην ανάπτυξη της γλιστρίδας σε ένα έντονα ρυπασμένο έδαφος, όπως αυτό που προέρχεται από την Βιομηχανική Περιοχή του Λαυρίου. Τα υλικά που αξιοποιήσαμε είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα είναι τα αποχωρήματα εντόμων γνωστά ως Frass, το ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ) και τα βιοεξανθρακώματα (Biochar). Η σημαντικότητα του πειράματος έγκειται στο γεγονός ότι τα υλικά αυτά μπορούν στο μέλλον να αξιοποιηθούν μαζικά για την αποκατάσταση των εδαφών, ώστε να έχουμε μια αγροτική παραγωγή φιλική προς το περιβάλλον και ασφαλή για την ανθρώπινη υγεία. Ένα επίσης σημαντικό πρωτοποριακό στοιχείο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη του νέου υλικού frass, η χρήση του οποίου σε διαδικασίες φυτοαποκατάστασης εντάσσεται στη λογική της κυκλικής οικονομίας.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 2.1 Γενικά

Το πείραμα έλαβε χώρα στο θερμοκήπιο της Γεωπονικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην πόλη του Βόλου, καθώς και στα εργαστήρια της Εδαφολογίας και της Ζιζανιολογίας. Το πείραμα έλαβε χώρα από τα μέσα Οκτωβρίου του 2020, έως τις αρχές του Ιανουαρίου του 2021.

### 2.2 Πειραματικός Σχεδιασμός

Στα τέλη Αυγούστου μεταφέρθηκαν 100 Kg εδάφους από την βιομηχανική ζώνη του Λαυρίου στον χώρο του θερμοκηπίου όπου υπέστησαν αεροζήρανση. Στις 11/10/20 το έδαφος κοσκινίστηκε και τοποθετήθηκε σε γλάστρες χωρητικότητας 2 λίτρου η κάθε μία περιείχε 1080 gr εδάφους και 800 ml Ιπερλίτη, τα οποία μετρήθηκαν επακριβώς χρησιμοποιώντας ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας και ογκομετρική φιάλη. Στις 14/10/20 οι γλάστρες διαχωρίστηκαν σε ομάδες και πραγματοποιήθηκαν οι προσθήκες τριών ειδών εδαφοβελτιωτικών: Biochar frass (από το έντομο *Tenebrionolitor*) ,και CaCO<sub>3</sub>, σε δύο συγκεντρώσεις το καθένα, 2 και 4%. Συγκεκριμένα οι μεταχειρίσεις ήταν οι εξής:

	<b>Μεταχείριση</b>	<b>Προσθήκη εδαφοβελτιωτικού σε κάθε γλάστρα</b>	<b>Κωδικοποίηση</b>
1	Μάρτυρας	-	control
2	Biochar-2%	20 g	BIO20
3	Biochar-4%	40 g	BIO40
4	Frass-2%	20 g	FRASS20



5	Frass-4%	40 g	FRASS40
6	CaCO <sub>3</sub> -2%	20 g	CACO3-20
7	CaCO <sub>3</sub> -4%	40 g	CACO3-40

Πραγματοποιήθηκε πολύ καλή ανάμειξη των υλικών κάθε γλάστρας και προστέθηκαν 250 ml νερού. Στις 18/10/20 μεταφυτεύθηκαν τα αρτίβλαστα γλιστρίδας, τοποθετώντας 2 φυτά/γλάστρα, ενώ σε κάθε μεταχείριση υπήρχαν 5 γλάστρες.

Στις **26-29/10/20** έγιναν 4 ψεκασμοί με πιρεθρίνη συνολικής ποσότητας 4 ml, ενώ στις **30/10/20** προστέθηκαν 10 μονάδες αζώτου, 18,8 μονάδες φωσφόρου και 21,2 μονάδες καλίου. Στις **13/11** προστέθηκαν στις γλάστρες 10 μονάδες αζώτου με τη μορφή νιτρικής αμμωνίας (2<sup>η</sup> δόση βασικής λίπανσης).



**Εικόνα 1:** Οι γλάστρες που πειράματος αμέσως μετά την μεταφύτευση των φυταρίων γλιστρίδας.

## **2.3 Μετρήσεις-Αναλύσεις**

Όπως προαναφέρθηκε οι μετρήσεις έλαβαν μέρος στο Θερμοκήπιο της σχολής και στα δύο εργαστήρια. Πιο συγκεκριμένα:

### **2.3.1 Μετρήσεις κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου**

Οι μετρήσεις στα φυτά των διάφορων μεταχειρίσεων έγιναν στις 6/11, 16/11, 26/11, 4/12, 9/12 και 19/12 στα φύλλα και των 2 φυτών που αναπτύσσονταν σε κάθε γλάστρα, με σκοπό την εκτίμηση συγκεκριμένων φυσιολογικών παραμέτρων, όπως αναλύονται παρακάτω:

#### **1) Συγκέντρωση ολικών χλωροφυλλών:**



**Εικόνα 2:** Όργανο μέτρησης SPAD-502 για μέτρηση χλωροφύλλης στα φύλλα.

Η συγκέντρωση των ολικών φωτοσυνθετικών χρωστικών στα φυτά γλιστρίδας μετρήθηκε με το όργανο SPAD. Το όργανο αυτό μετράει με εύκολο και μη καταστροφικό τρόπο την ανακλαστικότητα στο φύλλο και στη συνέχεια εξάγεται ο δείκτης SPAD που αντιστοιχεί στο περιεχόμενο του φύλλου σε χλωροφύλλες a+b.

## 2) Φθορισμός της χλωροφύλλης *a*

Ο φθορισμός της χλωροφύλλης μπορεί να μετρηθεί με διάφορες διαφορετικές εφαρμογές και ανάλογα με τη δεδομένη εφαρμογή τα αποτελέσματα μπορούν να αξιολογηθούν από πολλές οπτικές. Το φορητό φθορόμετρο PAM-2100 εμφανίζει υψηλό βαθμό ευελιξίας, μέτρησης και ανάλυσης του φθορισμού της χλωροφύλλης.



**Εικόνα 4:** Όργανο Chlorophyll Fluorometer PAM-1200 για μέτρηση του φθορισμού της χλωροφύλλης *a*

Το όργανο το ρυθμίσαμε ώστε να έχει MI=9, SI=10, 0,1s=8, S-600, G5, DUMPING=5 και καταγράψαμε τις παραμέτρους ETR και Yield, τα οποία δείχνουν τα εξής:

2α) ETR: Αντιπροσωπεύει την σχέση του φαινομένου της φωτοσύνθεσης με τον ρυθμό μεταφοράς ηλεκτρονίων σε  $\mu\text{mol}$  ηλεκτρονίων  $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , το οποίο υπολογίζεται με βάση τις μετρούμενες τιμές του Yield και του PAR χρησιμοποιώντας το εξίσωση:

$$\text{ETR} = \text{Yield} \times \text{PAR} \times 0.5 \times 0.84$$

2β) Fv/Fm, Yield: Η παράμετρος του Yield (Απόδοση) μπορεί να θεωρηθεί η πιο σημαντική όσο αφορά το κομμάτι πληροφοριών που μας δίνει το PAM-2100. Αντιπροσωπεύει την ουσία της ανάλυσης της απόσβεσης του φθορισμού από την μέθοδο του κορεσμού. Η αξία των πληροφοριών είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν συνδυάζεται με την αποτελεσματική ένταση του φωτός (PAR) και την θερμοκρασία του φύλλου. Ο προσδιορισμός του Yield γίνεται συνήθως σε σταθερές συνθήκες φωτισμού. Στη συνέχεια, η πραγματική κβαντική απόδοση του φωτοσυστήματος II είναι κοντά στο συνολική κβαντική απόδοση της φωτοσύνθεσης. Η παράμετρος Yield υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

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

Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα στις 6/11/20, 16/11/20, 26/11/20, 4/12/20, 9/12/20 και 19/12/20. Όλη αυτή τη περίοδο έχει σημασία να αναφερθεί ότι η ηλιοφάνεια ήταν ελάχιστη, ενώ τις περισσότερες ημέρες επικρατούσε συννεφιά.

### **2.3.2 Τελική συγκομιδή**

Στις 22 και 23/12/2021 έγινε η συγκομιδή των φυτών. Αρχικά συγκομίσαμε το υπέργειο τμήμα των φυτών, το οποίο μεταφέρθηκε άμεσα στο εργαστήριο. Εκεί διαχωρίστηκαν οι βλαστοί και τα φύλλα, μετρήθηκε το νωπό τους βάρος καθώς και το ύψος και ο αριθμός των βλαστών. Στη συνέχεια το κάθε φυτικό μέρος χωριστά τοποθετήθηκε για ξήρανση στο φούρνο, στους 70°C για 3 ημέρες - τόσο χρόνο χρειάστηκε για να φτάσει σε σταθερό ξηρό βάρος. Το ξηρό βάρος φύλλων και το ξηρό βάρος βλαστού μετρήθηκε σε ζυγό ακριβείας.

Σε ότι αφορά τη μεταχείριση του υπόγειου μέρους, οι ρίζες κάθε φυτού ξεπλύθηκαν καλά ώστε να φύγει οποιοδήποτε ξένο σώμα και τοποθετήθηκαν σε χάρτινα σακουλάκια. Στη συνέχεια, οι ρίζες ξηράθηκαν στους 70°C για 3 ημέρες και το ξηρό τους βάρος καταγράφηκε επακριβώς.



**Εικόνα 5:** Τα φυτά μας στις 6/11



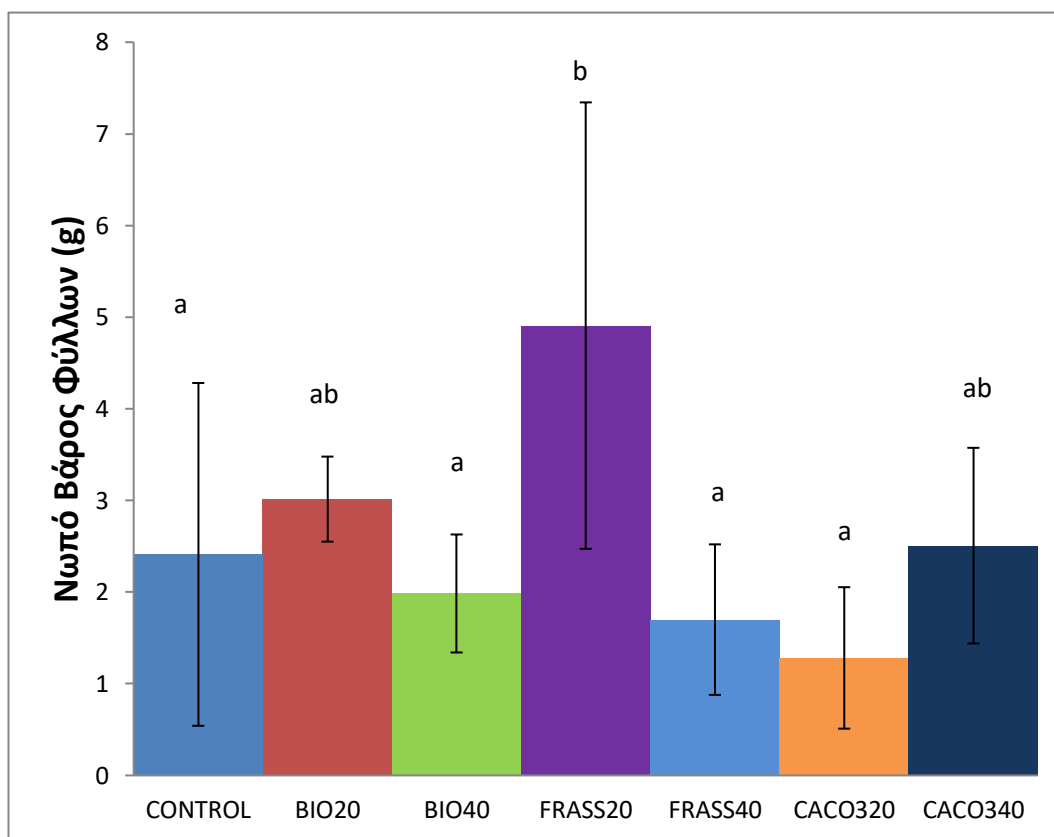
**Εικόνα6:** Τα φυτά μας στις 26/11

## **2.4 Στατιστική Επεξεργασία των δεδομένων**

Η επεξεργασία των δεδομένων όλων των φυτικών παραμέτρων που καταγράφηκαν στην παρούσα εργασία προς έλεγχο των στατιστικά σημαντικών διαφορών έγινε με One Way-ANOVA και Tukey όσον αφορά τα post-hoc tests. Στις περιπτώσεις που οι προϋποθέσεις της ANOVA δεν ικανοποιούνταν προχωρήσαμε σε μη παραμετρικό τεστ (Kruskal-Wallis) και το αντίστοιχο post-hoc test (Dunn). Σε όλες τις στατιστικές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα JASP (JASP Team 2021,v.0.13.1.0, for Windows).

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

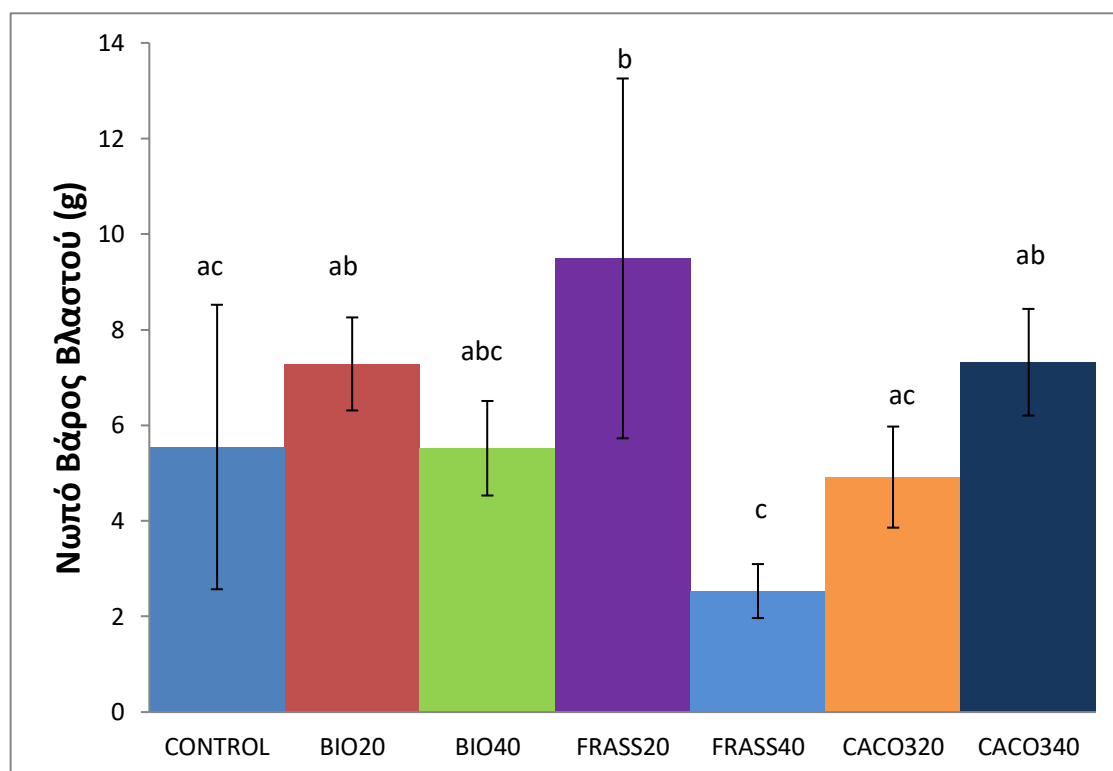
Ξεκινώντας από τις αναπτυξιακές παραμέτρους και συνεχίζοντας στις φυσιολογικές, παρουσιάζονται παρακάτω τα αποτελέσματα της εργασίας. Χρησιμοποιείται σε όλες τις περιπτώσεις η κωδικοποίηση των μεταχειρίσεων, όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο Υλικά και Μέθοδοι.



**Γράφημα 1.** Νωπό βάρος φύλλων σε g εκφρασμένο ως M.O.  $\pm$  SD. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ( $p < 0.05$ ) μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Όσον αφορά το νωπό βάρος των φύλλων, φαίνεται ότι μεγαλύτερο νωπό βάρος παρουσίασαν τα φυτά που αναπτύχθηκαν στη μικρότερη συγκέντρωση Frass που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα (Frass20) και ακολουθεί χωρίς στατιστικώς σημαντικές διαφορές το Biochar20 και το CaCO<sub>3</sub>-40. Εντούτοις, το Control, δηλαδή

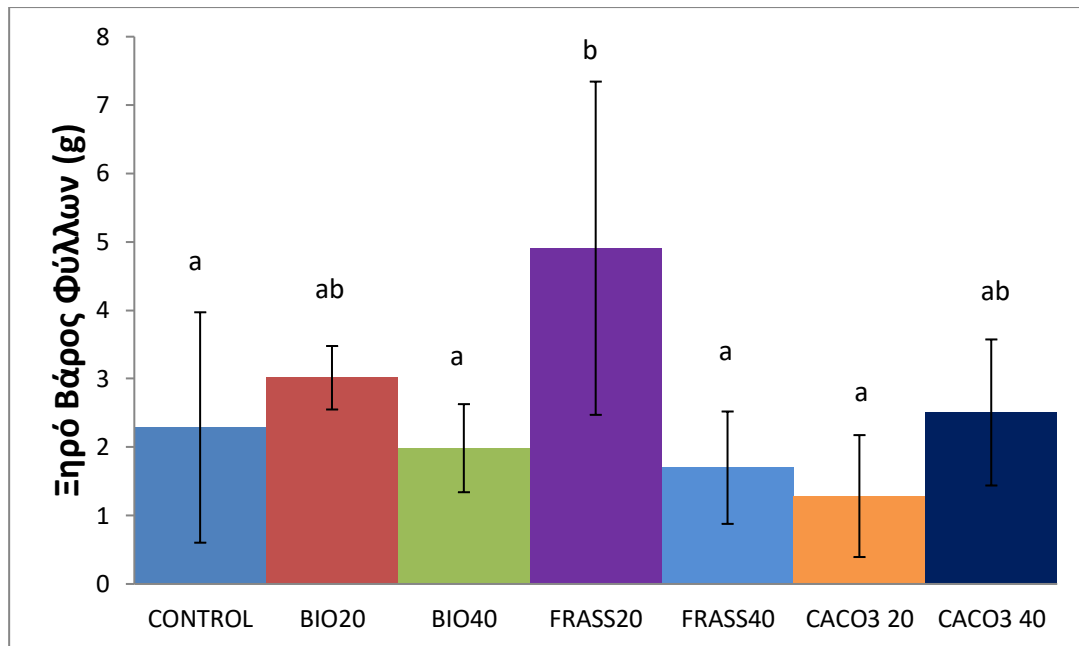
τα φυτά που δεν έλαβαν καμία προσθήκη εδαφοβελτιωτικού εμφάνισαν νωπό βάρος με ενδιάμεσες τιμές που διέφερε σημαντικά μόνο από το Frass20. Σε όλες τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις το βάρος των φύλλων ήταν χαμηλότερο.



**Γράφημα 2.** Νωπό βάρος βλαστού σε g εκφρασμένο ως M.O.  $\pm$  SD. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ( $p < 0.05$ ) μεταξύ των μεταχειρίσεων.

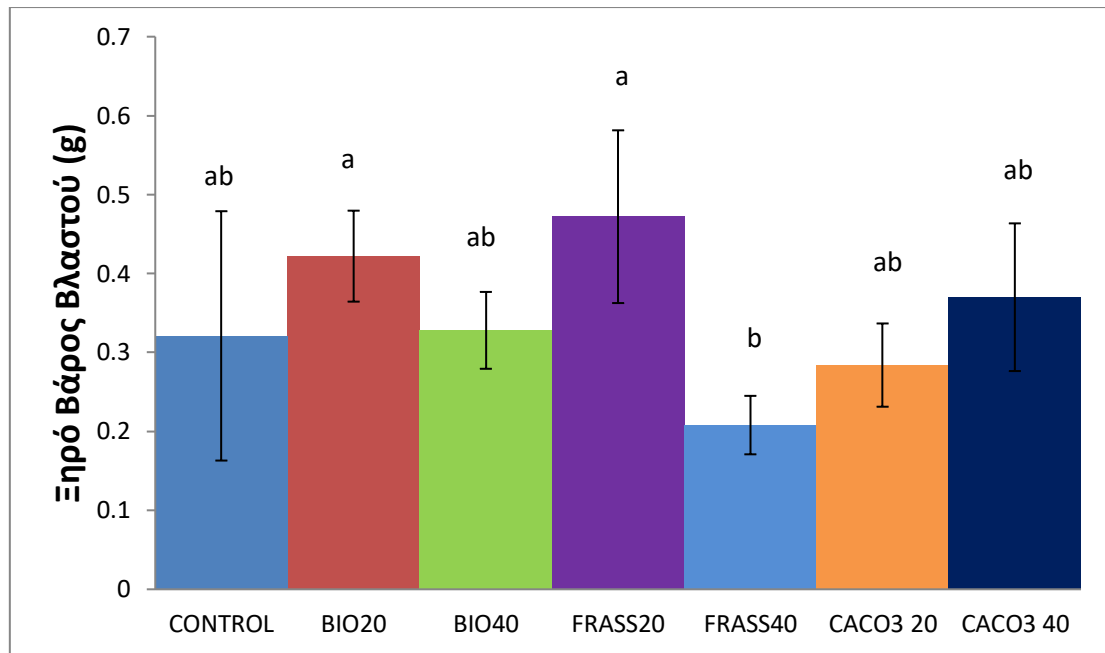
Το νωπό βάρος του βλαστού των φυτών ακολούθησε το ίδιο πρότυπο με αυτό των φύλλων. Τα αποτελέσματα μας δείχνουν ότι μεγαλύτερο νωπό βάρος έχει ο βλαστός των φυτών Frass20, ακολουθεί το Biochar20 και το CaCO<sub>3</sub>-40. Ενδιαφέρον εδώ έχει η πολύ χαμηλή τιμή που μετρήθηκε στη μεταχείριση Frass40.





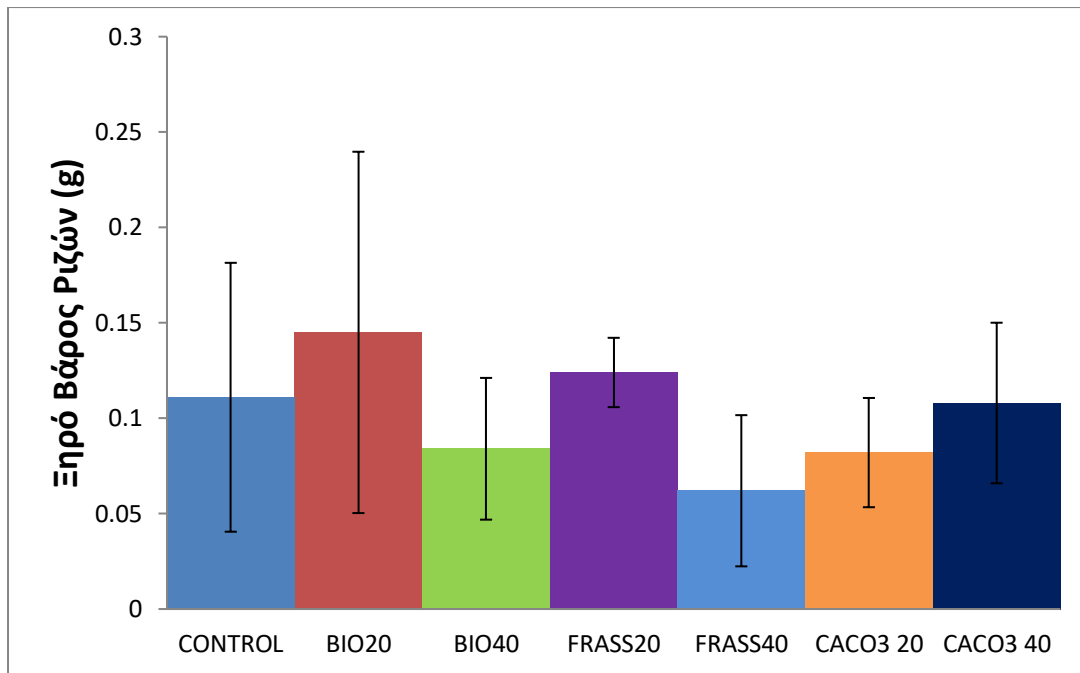
**Γράφημα 3.** Ξηρό βάρος φύλλων σε g εκφρασμένο ως M.O.  $\pm$  SD. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ( $p < 0.05$ ) μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Όπως ήταν αναμενόμενο το ξηρό βάρος των φύλλων, αποτύπωσε πλήρως τις διαφορές που καταγράφηκαν και στο νωπό βάρος, δηλαδή την ίδια στατιστικά σημαντική υπεροχή των φυτών που αναπτύχθηκαν στη χαμηλότερη συγκέντρωση Frass (Frass20).



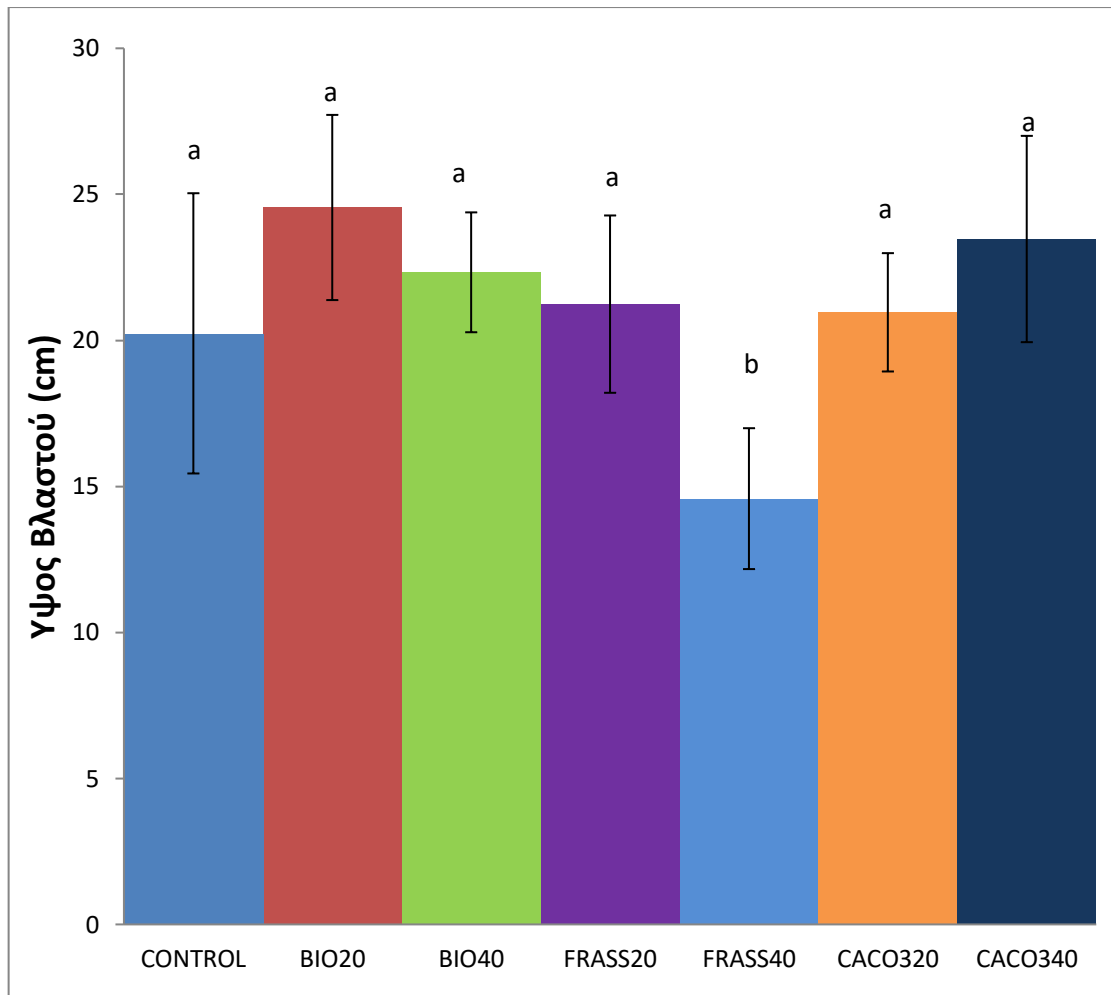
**Γράφημα 4.** Ξηρό βάρος βλαστού σε g εκφρασμένο ως M.O.  $\pm$  SD. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ( $p < 0.05$ ) μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Όσον αφορά το ξηρό βάρος βλαστού, αν και η τάση είναι να εμφανίζονται υψηλότερες τιμές στο Frass20, στατιστικώς σημαντικές διαφορές υπάρχουν μόνο μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων Frass, δηλαδή της μικρότερης και της μεγαλύτερης συγκέντρωσής του, αλλά και μεταξύ Frass40 και Biochar20.



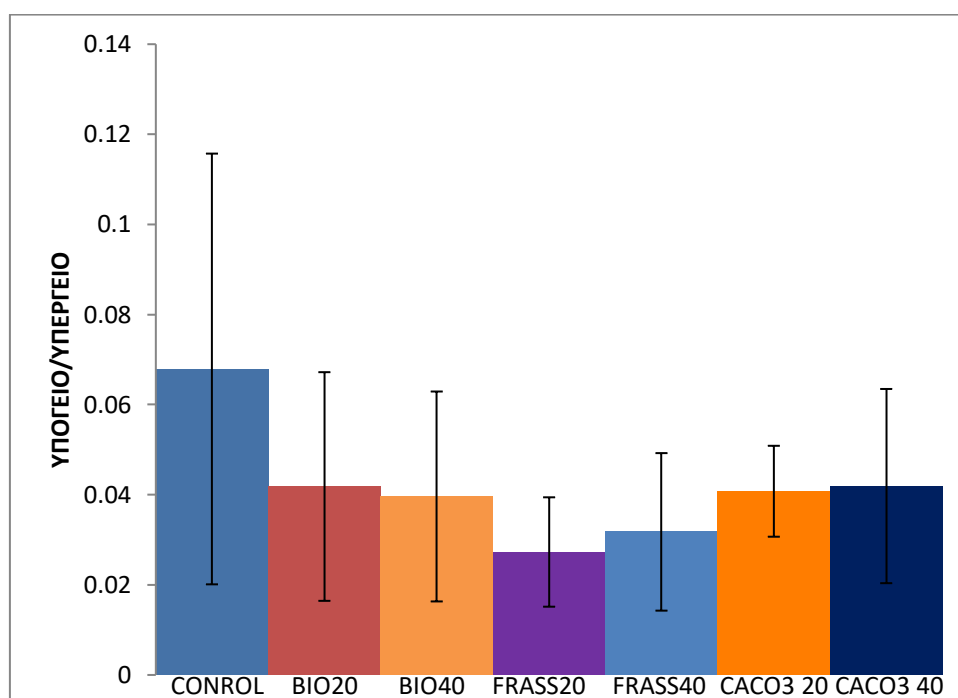
**Γράφημα 5.** Ξηρό βάρος Ριζών σε g εκφρασμένο ως M.O.  $\pm$  SD. Η απουσία γραμμάτων υποδεικνύει ότι δεν εμφανίστηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές.

Η ανάπτυξη της ρίζας δεν φάνηκε να επηρεάζεται σημαντικά από τις διάφορες μεταχειρίσεις (Γράφημα 5). Βέβαια, η τάση για αυξημένες τιμές στο Biochar20 και στο Frass20 επιβεβαιώθηκε πάλι, αλλά χωρίς να εμφανίζονται στατιστικώς σημαντικές διαφορές, πιθανότατα λόγω μεγάλης διασποράς γύρω από τη μέση τιμή.



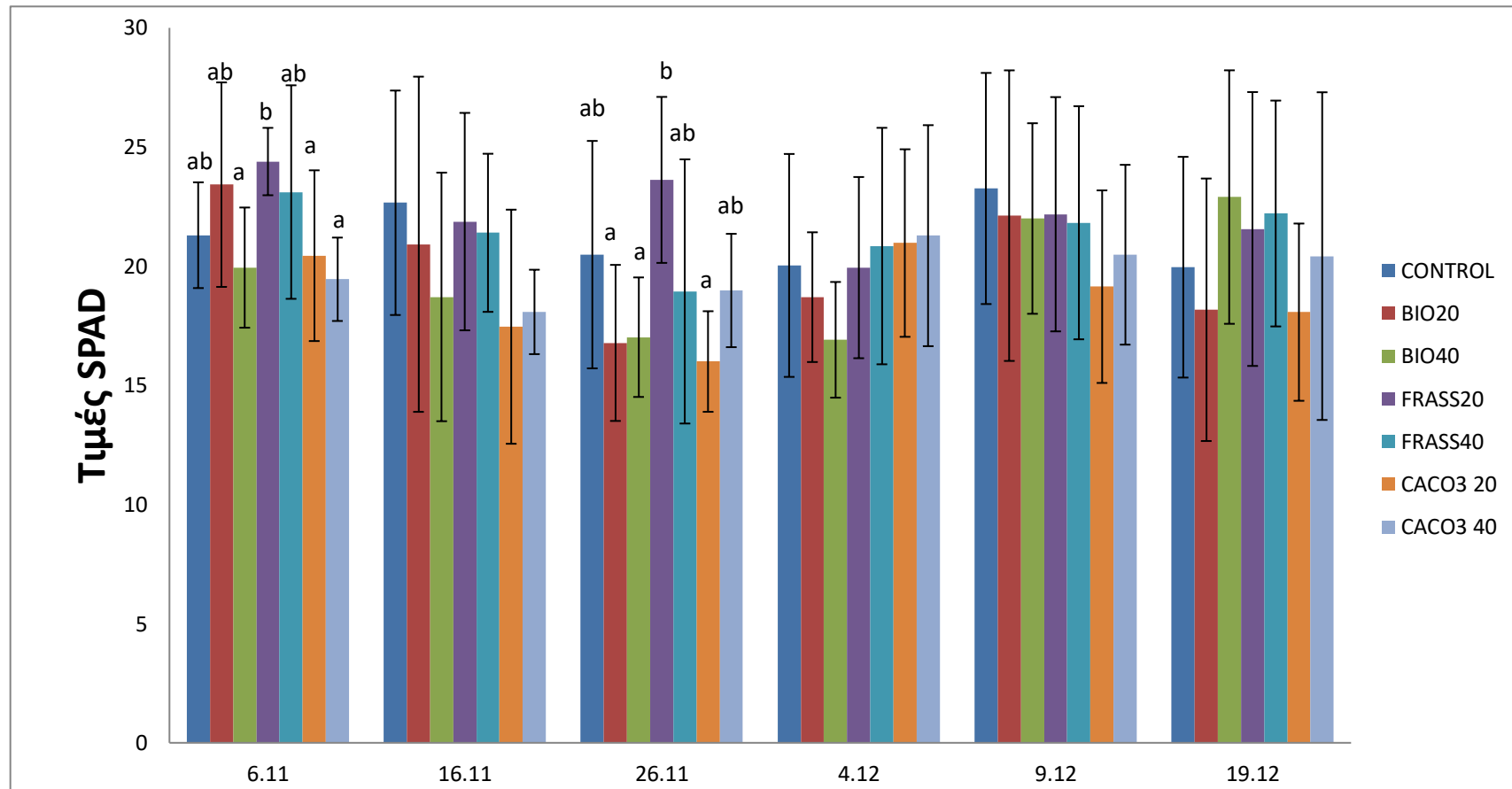
**Γράφημα 6.** Ύψος βλαστού σε cm εκφρασμένο ως M.O. ± SD. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ( $p < 0.05$ ) μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Όσον αφορά το ύψος του βλαστού, φαίνεται ότι δεν διέφερε σημαντικά μεταξύ των μεταχειρίσεων, με μοναδική εξαίρεση τα φυτά που δέχτηκαν τη μεγαλύτερη συγκέντρωση frass (Frass40), τα οποία είχαν το χαμηλότερο ύψος βλαστού σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα.



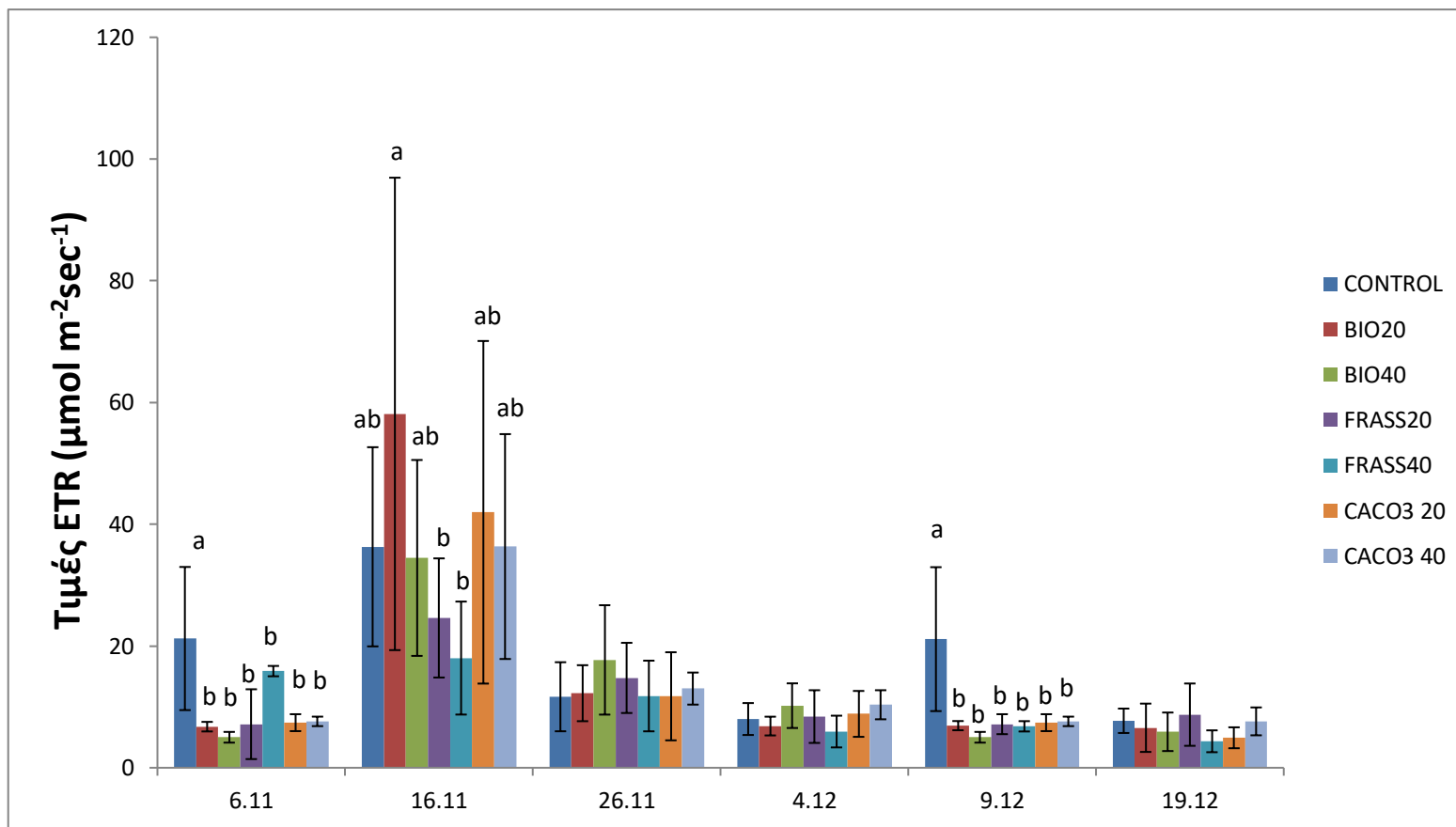
**Γράφημα 7.** Υπόγεια/Υπεργεια Βιομάζα σε g εκφρασμένο ως M.O. ± SD. Η απουσία γραμμάτων υποδεικνύει ότι δεν εμφανίστηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές.

Ο λόγος υπόγειας/υπέργεια βιομάζα παρατηρούμε ότι εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή στο Control, ενώ μικρότερος λόγος εμφανίζεται στα φυτά της μεταχείρισης Frass20. Όσον αφορά την στατιστική ανάλυση, οι μεταχειρίσεις δεν διαφέρουν σημαντικά στατιστικά μεταξύ τους, πιθανότατα λόγω μεγάλης διασποράς γύρω από τη μέση τιμή.



**Γράφημα 8.** Τιμές SPAD εκφρασμένες ως M.O. ± SD. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ( $p < 0.05$ ) μεταξύ των μεταχειρίσεων. Για λόγους ευκρίνειας στις ημερομηνίες όπου δεν σημειώθηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων δεν αναγράφονται σήματα στατιστικής

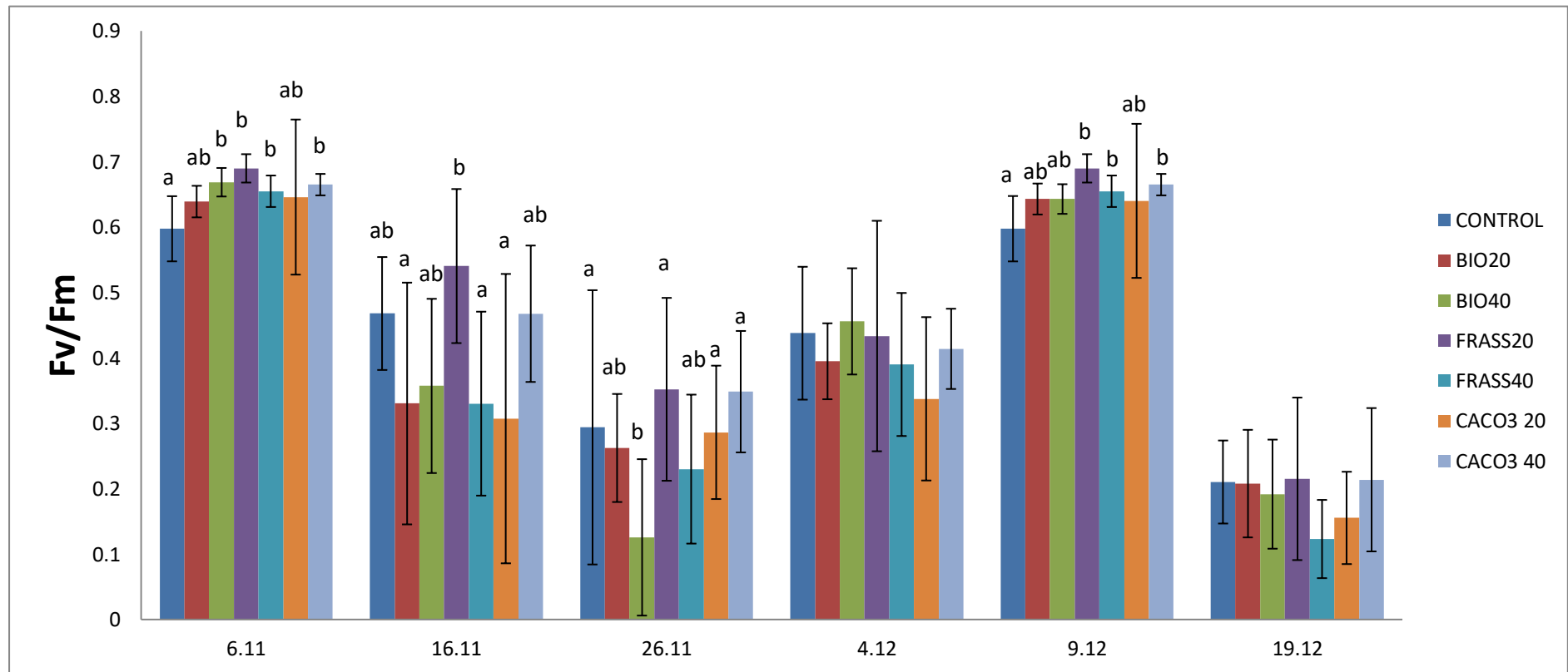
Η συγκέντρωση των ολικών χλωροφυλλών, όπως καταγράφηκε από τον δείκτη SPAD εμφανίζει κάποιες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου με στατιστικώς σημαντικές διαφορές να εμφανίζονται μόνο σε δύο χρονικά σημεία, κατά την πρώτη μέτρηση και την αντίστοιχη στο μέσον του πειράματος. Κοινό στοιχείο είναι η υπεροχή των φυτών της μεταχείρισης Frass20. Στο τέλος του πειράματος οι διαφορές δεν είναι έντονες, εμφανίζεται όμως σημαντική διασπορά γύρω από τη μέση τιμή όλων των μεταχειρίσεων.



**Γράφημα 9.** Τιμές ETR σε  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{sec}^{-1}$  εκφρασμένο ως M.O.  $\pm$  SD. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ( $p < 0.05$ ) μεταξύ των μεταχειρίσεων. Για λόγους ευκρίνειας στις ημερομηνίες όπου δεν σημειώθηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων δεν αναγράφονται σήματα στατιστικής



Στις 6/11 βλέπουμε ότι μεγαλύτερη τιμή του ρυθμού ηλεκτρονιακής ροής, ETR, έχει το Control με στατιστικώς σημαντικές διαφορές από τα υπόλοιπα φυτά (Γράφημα 9). Στην επόμενη μέτρηση, στις 16/11 υπερτερεί το Biochar20, ενώ τα φυτά που έλαβαν frass εμφανίζουν τις χαμηλότερες τιμές. Προς το τέλος της αναπτυξιακής περιόδου εμφανίζονται και πάλι σημαντική υπεροχή των φυτών-μαρτύρων, σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις.



**Γράφημα 10.** Τιμές Fv/Fm εκφρασμένο ως Μ.Ο. ± SD. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ( $p < 0.05$ ) μεταξύ των μεταχειρίσεων. Για λόγους ευκρίνειας στις ημερομηνίες όπου δεν σημειώθηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων δεν αναγράφονται σήματα στατιστικής

Στο Γράφημα 10 παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη  $F_v/F_m$  που αντιπροσωπεύει την απόδοση του φωτοχημικού έργου. Σημαντικές είναι οι διακυμάνσεις του δείκτη κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου, με τις χαμηλότερες τιμές να εντοπίζονται στη μέση και στο τέλος αυτής. Τα φυτά που δέχτηκαν Frass20 εμφανίζουν σε όλες τις ημερομηνίες υψηλότερες τιμές απόδοσης, με στατιστικώς σημαντικές διαφορές στις περισσότερες περιπτώσεις.

## 4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Σε αυτήν την πτυχιακή εργασία μελετήθηκε η απόκριση του φυτού της γλιστρίδας σε έδαφος ρυπασμένο με βαρέα μέταλλα, στο οποίο ενσωματώσαμε υλικά δέσμησης των μετάλλων. Ο σκοπός της προσθήκης εδαφοβελτιωτικών υλικών δέσμησης ήταν να εξετάσουμε αν αυτό θα βοηθήσει στην καλύτερη ανάπτυξη του φυτού.

Για να αναλύσουμε τα αποτελέσματά μας και για να δούμε αν τελικά τα υλικά δέσμησης που ενσωματώσαμε στο έδαφος του Λαυρίου, βοήθησαν στην καλή ανάπτυξη της γλιστρίδας και ποια από αυτά είχαν θετική επίδραση και ποια αρνητική έχει νόημα να τα συγκρίνουμε μεταξύ τους αλλά και με τα φυτά-μάρτυρες που αναπτύχθηκαν μόνο στο ρυπασμένο έδαφος, χωρίς καμία προσθήκη εδαφοβελτιωτικού.

Σε ότι αφορά τα αναπτυξιακά χαρακτηριστικά του φυτού μας, δηλαδή το μήκος του βλαστού, το νωπό και ξηρό βάρος των φύλλων και των ριζών, καλύτερα φαίνεται ότι ανταποκρίνεται το Frass20. Είχε την καλύτερη ανάπτυξη σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις και κυρίως με τον μάρτυρα. Ακολουθεί η μεταχείριση Biochar20 που εμφάνισε υψηλότερους βλαστούς, αλλά και βιομάζα των φυτών, σε επίπεδα που πλησίαζαν το Frass20 και δεν διέφεραν σημαντικά από αυτό. Η πλειονότητα των υπόλοιπων μεταχειρίσεων φάνηκε να δίνει τιμές αναπτυξιακών παραμέτρων μικρότερες του Μάρτυρα.

Η συγκέντρωση των ολικών χλωροφυλλών εμφάνισε διακυμάνσεις καθόλη τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου και σχετικά μεγάλη διασπορά των τιμών γύρω από τη μέση τιμή. Ενδιαφέρον χαρακτηριστικό ήταν η τάση για περισσότερες χλωροφύλλες στα φυτά Frass20, που σε μερικές ημερομηνίες μετρήσεων ήταν και στατιστικώς σημαντική. Όσον αφορά τις μετρήσεις του φθορισμού της χλωροφύλλης και του ρυθμού της φωτοσυνθετικής ροής ηλεκτρονίων καλύτερα ανταποκρίθηκε επίσης το Frass20 με τιμές μεγαλύτερες από του Μάρτυρα, κάτι που δικαιολογεί και την καλύτερη ανάπτυξη των φυτών αυτών, ωστόσο οι τιμές είναι γενικά χαμηλές.

Σε σύγκριση με άλλα πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί γύρω από την ανάπτυξη της γλιστρίδας αλλά και ιδιαίτερα σε εδάφη με βαρέα μέταλλα βλέπουμε τα εξής. Σε πείραμα με διαφορετικές λιπάνσεις γλιστρίδας κατά τη χειμερινή περίοδο επιτεύχθηκαν πολλαπλάσιες τιμές νωπής βιομάζας σε σύγκριση με αυτές της παρούσας εργασίας (Κλείτση και Μακρυγιάννη, 2019). Συγκεκριμένα στις τρεις αζωτούχες λιπάνσεις που δοκιμάστηκαν η νωπή βιομάζα ανά φυτό ήταν 19.7g, 36.6g και 44.4g, ενώ στο πείραμά μας δεν ξεπέρασε τα 5g. Τα αποτελέσματα του πειράματός μας έρχονται σε αντίθεση με προηγούμενες μελέτες, όπως των Amer et al. (2012) όπου τα φυτά της γλιστρίδας ανέπτυξαν μεγάλο βλαστό σε έδαφος ρυπασμένο με βαρέα μέταλλα. Επίσης, η Παπαθεοδώρου (2015) ανέφερε ότι τα φυτά γλιστρίδας και μαρουλιού που αναπτύχθηκαν σε ρυπασμένο με βαρέα μέταλλα έδαφος δεν εμφάνισαν διαφορές στην ανάπτυξη του ριζικού συστήματος και των φύλλων, αντίθετα βγαίνει το συμπέρασμα ότι η ρύπανση ευνόησε συγκεκριμένα αναπτυξιακά χαρακτηριστικά της γλιστρίδας. Βέβαια, στην περίπτωση της Παπαθεοδώρου (2015) το έδαφος που μελετήθηκε έλαβε επιμόλυνση Zn και Cd, κατάσταση που σε καμία περίπτωση δεν προσεγγίζει το έδαφος του Λαυρίου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη, το οποίο έχει και πολλά είδη βαρέων μετάλλων σε υψηλές συγκεντρώσεις, η παρουσία τους δε σε αυτό είναι αιώνων.

Η χρήση του biochar για ενίσχυση της φυτοαποκατάστασης έχει δώσει ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε από τους Zangahenetal. (2021), βγαίνει το συμπέρασμα ότι σε έδαφος επιμολυσμένο με βαρέα μέταλλα χρησιμοποιώντας Biochar σε φυτά γλιστρίδας, αυξήθηκε η χλωροφύλλη α και βελτιώθηκε η ποιότητα του εδάφους. Ωστόσο σε άλλο πείραμα (Haveez, 2019) σε καλλιέργεια ρυζιού, φαίνεται ότι το biochar, το οποίο ενσωματώθηκε μετά την φύτευση της καλλιέργειας δεν επέδρασε αρκετά αποτελεσματικά.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Οι χαμηλές συγκεντρώσεις Frass(2%) βελτίωσαν όλες τις αναπτυξιακές παραμέτρους της γλιστρίδας επιδρώντας θετικά σε φυσιολογικές διεργασίες, όπως αυτές που καταγράφηκαν στην παρούσα εργασία.
- Η συγκέντρωση Frass 4% επέδρασε αρνητικά στην ανάπτυξη της γλιστρίδας, αποδείχτηκε λοιπόν ισχυρή δόση που με κάποιο τρόπο δεν ευνοεί το φυτό, ενδεχομένως δε να μπαίνουν και ζητήματα τοξικότητας.
- Η μεταχείριση Biochar20 εμφάνισε καλές αποδόσεις, παρόμοιες με το Frass20, με το οποίο δεν είχε σημαντικές διαφορές στις περισσότερες μετρηθείσες παραμέτρους.
- Η προσθήκη  $\text{CaCO}_3$  δεν απέδωσε, καθώς σε όλες τις μετρήσεις αναπτυξιακών και φυσιολογικών παραμέτρων καταγράφηκαν τιμές που δεν ήταν μεγαλύτερες από τα φυτά του μάρτυρα.
- Εάν τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας σχετικά με την ανάπτυξη του φυτού συνδυαστούν με θετικά αποτελέσματα της έρευνας που θα ακολουθήσει σχετικά με την απορρόφηση των μετάλλων ή την καθήλωσή τους στο έδαφος, τότε μπορεί να προταθεί η χρήση χαμηλών συγκεντρώσεων frass και biochar ως εδαφοβελτιωτικά υλικά δέσμευσης που μπορούν να εξασφαλίσουν μία σχετικά καλή ανάπτυξη της γλιστρίδα σε ένα τόσο ρυπασμένο με βαρέα μέταλλα έδαφος, όπως αυτό του Λαυρίου.



## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alina Kabata-Pendias, «Trace elements in Soils and Plants, Fourth Edition», 2011

Anamika Kushwaha, Radha Rani, Sanjay Kumar, and Aishvarya Gautam, « Heavy metal detoxification and tolerance mechanisms in plants: Implications for phytoremediation», 2015

Chavez, M., Uchanski, M. 2021. Insect left-over substrate as plant fertiliser. *Journal of Insects as Food and Feed* 0, 1-12.

E.H. Murchie and T.Lawson, «Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications», 2013

Govindjee, «Sixty-Three years since Kautsky: Chlorophyll a fluorescence», 1995, *Aust J Plant Physiol* 22 : 131-160

Poveda, J. 2021. Insect frass in the development of sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 41, 1-10.

Poveda, J., Jiménez-Gómez, A., Saati-Santamaría, Z., Usategui-Martín, R., Rivas, R., García-Fraile, P. 2019. Mealworm frass as a potential biofertilizer and abiotic stress tolerance-inductor in plants. *Applied Soil Ecology* 142, 110-122

R.J. Strasser, A. Srivastava and M. Tsimilli-Michael, «The Fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples», 2000, 445-471

Stephan Clemens, Michael G. Palmgren and Ute Kramer, «A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation», 2002

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

Vasileios Antoniadis, Efi Levizou, Sabry M. Shaheen, Yong Sik Ok, Abin Sebastian, Christel Baum, Majeti N.V. Prasad, Walter W.



Wenzel, Jörg Rinklebe, «Trace elements in the soil-plant interface: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation–A review», 2017

W. Markopoulos, C. Konteye, Th. Eikmann, H.J. Einbrodt, A.Hatzakis, G. Papanagiotou 1991 «Cross-Sectional epidemiological study on the lead borden of children and workers in Greece», 1991, 468-476

Βουλγαρίδου Ε. 2015, «Αποκατάσταση των λειτουργιών του εδάφους σε ρυπασμένες από βαρέα μέταλλα περιοχές», Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Κωστοπούλου Παναγιώτα Σ., «Οικοφυσιολογικοί δείκτες αξιολόγησης παραγωγικής αποτελεσματικότητας λιβαδικών ειδών σε υποβαθμισμένα από βαρέα μέταλλα και ξηρασία περιβάλλοντα», Πτυχιακή Διατριβή, ΑΠΘ, 2007

Μανουσάκη Ε. «Χαρακτηρισμός της ικανότητας μεσογειακών φυτών για απομάκρυνση Pb και Cd από ρυπασμένα εδάφη», Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2008

Μαρίνος, Γ. & Petrascheck, W. E., 1956. Λαύριον, Γεωλ. Γεωφ. Μελ., ΙΓΜΕ, IV, 1, 246

Μεγαδούκα Δήμητρα Γ., «Ανάλυση περιβαλλοντικού κινδύνου από βαρέα μέταλλα γεωγενούς και ανθρωπογενούς προέλευσης σε δύο αντιπροσωπευτικές περιοχές του Ελλαδικού χώρου», Πτυχιακή Διατριβή, ΓΠΑ, 2016

Μπαλωμένου Χ. Γεωργία, «Προσδιορισμός βαρέων μετάλλων στα νερά, στο έδαφος και στα λαχανικά στις αγροτικές περιοχές του Νομού Αιτωλοακαρνανίας και χρήση ειδικών αδρανοποιητών στα υποστρώματα καλλιέργειας για ελαχιστοποιημένη περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα», Πτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Σχολή Διαχείρισης Φυσικών Πόρων και Επιχειρήσεων, 2009

Μπλάνας Γ. «Φυτοεξυγίανση με το αλατόφυτο *Limonium Cornarianum* ρυπασμένων εδαφών με κάδμιο (Cd)», Πτυχιακή Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2013

Πάνος Βασίλειος, «Καλλιέργεια ραπανιού (*Raphanus sativus*) σε έδαφος όπου προστέθηκαν υπολείμματα της εκτροφής του εντόμου *Tenebrio molitor* ως εδαφοβελτιωτικό υλικό», Πτυχιακή Διατριβή, 2021, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, τμήμα Γεωπονίας Φ.Π.Α.Π

Τσέκος Β. Ιωάννης, «Φυσιολογία Φυτών, Β' Έκδοση», 2004, 257, 260, 264