

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών *Διαχείριση και
Προστασία Περιβάλλοντος*

Μεταπτυχιακή Διατριβή



Χρήση κόμποστ για τη βελτίωση της βλαστικότητας και
ανάπτυξης *Medicago sativa* σε μεταλλευτικά απόβλητα

Ευγενία Χαριλάου

Επιβλέπων Καθηγητής
Μαρίνος Στυλιανού

Μάιος 2022

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

**Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Διαχείριση και
Προστασία Περιβάλλοντος**

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**Χρήση κόμποστ για τη βελτίωση της βλαστικότητας και
ανάπτυξης *Medicago sativa* σε μεταλλευτικά απόβλητα**

Ευγενία Χαριλάου

**Επιβλέπων Καθηγητής
Μαρίνος Στυλιανού**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών στη Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

Μάιος 2022

ΛΕΥΚΗ ΣΕΛΙΔΑ

Περίληψη

Αναντίρρητα, η Κύπρος θεωρείτο ως το σημαντικότερο κέντρο παραγωγής και επεξεργασίας χαλκού στην Μεσόγειο, αφού η μεταλλευτική της δραστηριότητα επικεντρώθηκε στην εξόρυξη χαλκούχων και θειούχων μεταλλευμάτων. Αξιοσημείωτο είναι ότι, το νησί της Κύπρου λόγω της πλούσιας και ετερογενής γεωλογίας του φιλοξένησε πολυάριθμα μεταλλεία τα οποία στην συνέχεια εγκαταλείφθηκαν. Ως απόρροια, λόγω έλλειψης νομοθεσίας δεν έχουν ληφθεί μέτρα αποκατάστασης στα εγκαταλελειμμένα μεταλλεία με τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις να είναι ακόμα εμφανείς. Αναλυτικότερα, στα εγκαταλελειμμένα πλέον μεταλλεία παρατηρούνται σωροί απορριμμάτων που χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλές τιμές pH, υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων και έλλειψη οργανικής ουσίας. Επιπρόσθετα, η όξινη απορροή μεταλλείων (OAM), κύρια αιτία ρύπανσης των υδάτων και εδάφους, προκαλείται από την οξείδωση του πυρίτη και των θειούχων απορριμμάτων όταν εκτίθενται σε οξυγόνο και νερό. Επομένως, οι δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στα εγκαταλελειμμένα μεταλλεία δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη και αύξηση φυτικών ειδών. Ως εκ τούτου, στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν χρησιμοποιηθεί ποικίλες μέθοδοι με στόχο την αποκατάσταση των εδαφών από τα βαρέα μέταλλα με την χρήση φυτών ως μέσο αποκατάστασης (πχ. φυτοαποκατάσταση) και την εφαρμογή εδαφοβελτιωτικών (πχ. κομπόστ).

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συγκέντρωση δεδομένων για τα εγκαταλελειμμένα μεταλλεία της Κύπρου και για τις υφιστάμενες πρακτικές διαχείρισης - αποκατάστασης που πραγματοποιούνται. Συμπληρωματικά, με αφετηρία την αποκατάσταση των ρυπασμένων εδαφών ενός εγκαταλελειμμένου μεταλλείου, σχεδιάστηκε η πειραματική διαδικασία για την αξιολόγηση της προσθήκης κομπόστ σε υφιστάμενα δείγματα εξορυκτικών αποβλήτων με στόχο τη βελτίωση της βλαστικότητας των δειγμάτων. Για το σκοπό αυτό έγινε πειραματική διερεύνηση σε πραγματικά απόβλητα από το εγκαταλελειμμένο Βόρειο μεταλλείο Μαθιάτη και με προσθήκη 2 ειδών: το *Medicago sativa* (μηδική ή πολυετές τριφύλλι) και (2) *Pinus brutia* (τραχεία πεύκη ή άγριο-πεύκο).

Για την υλοποίηση του πειράματος, διεξάχθηκε πείραμα σε γλάστρες σε θερμοκήπιο με ελεγχόμενες συνθήκες. Εν πρώτοις, πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία πεδίου για συλλογή εδαφικών δειγμάτων από σωρούς αποβλήτων από το εγκαταλελειμμένο μεταλλείο Β. Μαθιάτη και στην συνέχεια αναμείχθηκε με κομπόστ με αναλογίες 0%, 10%,

25% και 50%. Ακολούθως, φυτεύτηκαν σπόροι *Medicago sativa* και φυτά *Pinus brutia* για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας χρήσης κομπόστ σε απορρίμματα μεταλλείου.

Το ποσοστό βλαστικότητας των σπόρων *Medicago sativa* σημείωσε την μεγαλύτερη αύξηση στα δείγματα tailings με 50% κομπόστ με ποσοστό 85%. Επιπλέον, η προσθήκη κομπόστ ως πηγή οργανικής ουσίας αύξησε σημαντικά την ικανότητα συγκράτησης νερού στο έδαφος (SWHC), την φυτική βιομάζα και την εδαφική αναπνοή. Το όξινο pH των απορριμμάτων εμφάνισε αξιοπρόσεκτη αύξηση και επίσης το ποσοστό του δείκτη βλαστικότητας (germination index) κατέδειξε ότι η προσθήκη κομπόστ έχει την ικανότητα μείωσης της επίδρασης της φυτοτοξικότητας. Στον αντίποδα, η εφαρμογή κομπόστ σε tailings έδειξε σημαντική θετική συσχέτιση με την αύξηση του ύψους των φυτών *Pinus brutia* αφού στα δείγματα με 50% κόμποστ το ύψος τους παρουσίασε σχετική αύξηση (~10cm).

Η αποτελεσματική αποκατάσταση των απορριμμάτων μεταλλείων μπορεί να επιτευχθεί με προσθήκη εδαφοβελτιωτικών όπως το κομπόστ. Συνεπώς, η χρήση *Medicago sativa*, *Pinus brutia* και η εφαρμογή κομπόστ θα μπορούσε να είναι αποδοτική στην οικολογική αποκατάσταση των απορριμμάτων του εγκαταλελειμμένου μεταλλείου Βόρειου Μαθιάτη και άλλων μεταλλείων με τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Summary

Cyprus was undoubtedly considered as a significant copper and production centre within Mediterranean, since its mining activity throughout the years had been focusing on copper and sulfide ores. Notably, Cyprus has hosted various mines because of its rich and heterogeneous geology, which were then abandoned. Taking into consideration that there is lack of legislation within the specific context, measures in those abandoned mines were not taken; therefore, there are still consequences affecting the environment. Specifically, there are notable mine tailings which are characterized by their extremely low pH levels, high concentration of heavy metals as well as lack of organic matter. Furthermore, the acid mine drainage (AMD), which is the main reason of pollution within ground and water, is caused by oxidation of pyrite and sulfide tailings when they are exposed to oxygen and water. Consequently, the adverse environmental conditions in which those abandoned mines are, do not allow the development and growth of plant species. Therefore, the current literature has integrated a variety of methods targeting the remediation of soil from heavy metals, with the usage of plant species being a means of remediation (e.g. phytoremediation) and soil conditioners appliance (e.g. compost).

The purpose of this thesis is to gather data for the aforementioned abandoned mines in Cyprus, as well as for the existing current practises applied by the related field. Also, starting off with the restoration of an abandoned mine's polluted soil, the experimental process for the evaluation of compost addition into existing samples of mine tailings has been designed by aiming the germination samples' improvement. For this reason, the experimental research was held in the abandoned Northern mine in Mathiatis, by adding two species: *Medicago sativa* and *Pinus brutia*.

For the accomplishment of the experiment, an experiment in pots within a greenhouse has been made, under controlled conditions. Firstly, field sampling was completed in order to collect soil samples form piles waste from the abandoned mine in Mathiatis, and then it was mixed with compost with proportions of 0%, 10%, 25% and 50%. *Medicago sativa* seeds and *Pinus brutia* plants were then plant, so as to evaluate the effectiveness of compost disposal in mine tailings.

The germination rate of *Medicago sativa* seeds increased the most within tailings samples of 50% compost at 85%. Furthermore, the addition of compost as a source of organic matter significantly increased the soil water holding capacity (SWHC), plant biomass and

soil respiration. The acidic pH of the tailings showed a noticeable increase and also the percentage of germination index (GI) showed that the addition of compost is able to reduce the effect of phytotoxicity. On the other hand, the application of compost in tailings showed a significant positive correlation with the increase in the height of *Pinus brutia* plants, since in the samples with 50% compost the height of the plants increased ~10cm.

Effective remediation of mining waste can be achieved by adding soil conditioners such as compost. Therefore, the use of *Medicago sativa*, *Pinus brutia* and the application of compost could be efficient in the ecological restoration of the tailings in the abandoned North Mathiatis mine as well as other mines with the same environmental conditions.

Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία δεν θα υλοποιούταν χωρίς της συμβολή και την πολύτιμη βοήθεια μερικών ατόμων. Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή μου, κ. Μαρίνο Στυλιανού για το αμέριστο ενδιαφέρον και τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Ινστιτούτου Γεωργικών Ερευνών που μου επέτρεψαν να χρησιμοποιήσω τα θερμοκήπια και τα εργαστήρια τους για την πραγματοποίηση της διπλωματικής μου εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στους Δρ. Αναστάση Χρίστου και Δρ. Παναγιώτη Ντάλια, Λειτουργούς του Ινστιτούτου Γεωργικών Ερευνών, για την καθοδήγηση και την ανεκτίμητη βοήθεια που μου πρόσφεραν μέχρι το τέλος της συγκεκριμένης εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου στην οικογένεια και στον αδελφό μου για την στήριξη και την αγάπη τους.

Στην γιαγιά και τον παππού

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	1
1.1 Γεωλογία της Κύπρου.....	1
1.1.1 Γεωλογική δομή της Κύπρου	2
1.1.2 Εξορυκτική δραστηριότητα στην Κύπρο.....	5
1.2 Μεταλλεία της Κύπρου	9
1.2.1 Μιτσερό.....	10
1.2.2 Μαθιάτης.....	11
1.2.3 Σκουριώτισσα.....	12
1.2.4 Λεύκα.....	13
1.2.5 Αμίαντος	13
1.2.6 Σιά.....	14
1.3 Καταγραφή Προβλήματος.....	14
1.4 Σημασία και αναγκαιότητα μελέτης.....	15
1.5 Σκοποί και στόχοι.....	15
1.6 Διασαφηνίσεις – προσδιορισμός και διατύπωση των κεντρικών εννοιών	16
1.6.1 Αποκατάσταση	16
1.6.2 Απορρίμματα μεταλλείων / Mine Tailings	16
1.6.3 Ρύπανση εδάφους από βαρέα μέταλλα.....	16
1.6.4 Κομπόστ.....	16
Βιβλιογραφική ανασκόπηση	18
2.1 Εισαγωγή	18
2.1.1 Κομπόστ.....	18
2.1.2 Βαρέα Μέταλλα και Ρύπανση εδάφους.....	20
2.1.3 Όξινη απορροή μεταλλείων (OAM)	22
2.1.4 Χλωρίδα Κύπρου και χλωρίδα σε εγκαταλελειμμένα μεταλλεία	24
2.1.5 Ανθεκτικότητα φυτών στα μεταλλεία.....	25
2.2 Ιστορική αναδρομή.....	28
2.3 Θεωρητικό πλαίσιο	29
2.3.1 Αποκατάσταση	29
2.3.2 Ποιότητα εδάφους.....	35
2.3.3 Απορρίμματα μεταλλείων / Mine Tailings	35
2.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	36
2.5 Διεθνής πραγματικότητα	47
2.5.1 Υφιστάμενες Οδηγίες της ΕΕ.....	48
2.6 Κυπριακή πραγματικότητα.....	50

2.7 Συμπεράσματα Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης	52
Μεθοδολογία	55
3.1 Σκοπός – Στόχοι	55
3.2 Ερευνητικά ερωτήματα	56
3.3 Σχεδιασμός	56
3.4 Μέθοδος συλλογής δεδομένων	59
3.4.1 Ποσοτική μεθοδολογία	60
3.4.2 Ποιοτική μεθοδολογία	61
3.5 Έννοιες και θέματα	61
3.6 Πειραματική Διαδικασία	64
3.6.1 Δειγματοληψία πεδίου	64
3.6.2 Soil Water Holding Capacity (SWHC) / Ικανότητα συγκράτησης νερού στο έδαφος ..	67
3.6.3 Εδαφική Αναπνοή	68
3.6.4 Βιομάζα	70
3.6.5 Φυσικοχημικές ιδιότητες εδάφους	70
3.6.6 Φυτοτοξικότητα	71
3.7 Ανάλυση αποτελεσμάτων	73
Πειραματικά Αποτελέσματα	74
4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	74
4.1.1 Αποτελέσματα από το πείραμα στο θερμοκήπιο	74
4.1.2 Soil Water Holding Capacity (SWHC) / Ικανότητα συγκράτησης νερού στο έδαφος ..	76
4.1.3 Εδαφική Αναπνοή	78
4.1.4 Βιομάζα	78
4.1.5 Φυσικό-Χημικές ιδιότητες εδάφους	80
4.1.6 Φυτοτοξικότητα	81
Συζήτηση –Συμπεράσματα – Εισηγήσεις	83
5.1 Συζήτηση	83
5.1.1 Πείραμα στο θερμοκήπιο	85
5.1.2 SWHC	87
5.1.3 Εδαφική Αναπνοή	88
5.1.4 Βιομάζα	90
5.1.5 pH & EC	91
5.1.6 Φυτοτοξικότητα	92
5.2 Περιορισμοί της μελέτης	94
5.3 Συμπεράσματα	95
5.4 Εισηγήσεις	97

Παράρτημα Α.....	99
Φωτογραφίες	99
Α.1 Παρατήρηση και Δειγματοληψία πεδίου	99
Βιβλιογραφία.....	103

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Αναμφισβήτητα, η ανάπτυξη μιας χώρας βασίζεται σε μεγάλο βαθμό από την επιστημονικά ορθή και προγραμματισμένη εκμετάλλευση και αξιοποίηση των φυσικών της πόρων. Πιο συγκεκριμένα, η Κύπρος αποτελεί ένα νησί με μοναδικό φυσικό περιβάλλον, επομένως η αποδοτική χρήση των φυσικών πόρων όπως το νερό, τα δάση, οι ορυκτοί πόροι, το έδαφος θα συμβάλει θετικά στην περιβαλλοντική, οικονομική και πολιτιστική συνιστώσα της χώρας (Τμήμα Περιβάλλοντος, 2022). Παλαιότερα και για πολλά χρόνια, οι φυσικοί πόροι θεωρούνταν απεριόριστοι. Είναι όμως πλέον αποδεκτό, ότι οι φυσικοί πόροι που προσφέρει το περιβάλλον μπορούν να εξαντληθούν και ο ανθρώπινος παράγοντας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην διαθεσιμότητα και τη χρήση τους. Συνεπώς, βασική παράμετρος για την προστασία του περιβάλλοντος είναι η ορθολογική και αποδοτική χρήση και διαχείριση των φυσικών πόρων η οποία συμβάλλει στην οικονομική ανάπτυξη της χώρας.

Η Κύπρος, σύμφωνα με την περιβαλλοντική νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έχει θεσπίσει μέτρα και στρατηγικές για την αποδοτική και αποτελεσματική χρήση των φυσικών πόρων. Η διαχείριση των φυσικών πόρων του νησιού αναλαμβάνονται από το κάθε αρμόδιο τμήμα, για παράδειγμα οι υδατικοί πόροι ανήκουν στην δικαιοδοσία του Τμήματος Αναπτύξεως Υδάτων, οι ορυκτοί πόροι στο Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης. Παρόλα αυτά, η αλόγιστη εκμετάλλευση και η λανθασμένη διαχείριση των φυσικών πόρων επιφέρει αρνητικές συνέπειες στο περιβάλλον.

1.1 Γεωλογία της Κύπρου

Η Κύπρος αποτελεί το τρίτο σε μέγεθος νησί της Μεσογείου με έκταση 9251Km² και βρίσκεται στο ανατολικότερο άκρο της λεκάνης της Μεσογείου. Το νησί της Κύπρου είναι σε στρατηγική θέση καθώς βρίσκεται σε σταυροδρόμι 3 ηπείρων, Ευρώπης, Ασίας και

Αφρικής και επίσης η κοντινότερη ξηρά είναι τα παράλια της νότιας Τουρκίας και οι ακτές της Συρίας στα ανατολικά. Επιπρόσθετα, η μορφολογία της Κύπρου υποδιαιρείται σε περιφέρειες όπως είναι η οροσειρά του Τροόδους με υψηλότερη κορυφή την Χιονίστρα με υψόμετρο 1952m, η οροσειρά του Πενταδακτύλου, η πεδιάδα της Μεσαορίας και η παραλιακή ζώνη. Η μορφολογία του Τροόδους αποτελείται από πυριγενή πετρώματα και η περιοχή χαρακτηρίζεται από απότομες πλαγιές, ρυάκια και δάση ενώ η οροσειρά του Πενταδακτύλου αποτελείται από σκληρούς ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους. Τέλος, η πεδιάδα της Μεσαορίας περιλαμβάνει υψόμετρα από 0-300m και χαρακτηρίζεται από αλλουβιακές πεδιάδες και χαμηλούς λόφους (Tsintides et al., 2007).

Η Κύπρος παρουσιάζει μεσογειακό κλίμα με δροσερούς υγρούς χειμώνες (Νοέμβριο-Μάρτιο) και ξηρά θερμά καλοκαίρια (Μάιο-Σεπτέμβριο) με υγρές μεταβατικές περιόδους. Η ξηρή περίοδος του νησιού διαρκεί για περίπου 7 μήνες στα χαμηλότερα υψόμετρα (0-350m) και περίπου 4-5 μήνες στις ορεινές περιοχές (>800m). Συμπληρωματικά, η μέση ετήσια βροχόπτωση του νησιού είναι ~480mm και διαφοροποιείται από το ανάγλυφο και την τοπογραφία της Κύπρου. Πιο αναλυτικά, στην κορυφή του Τροόδους η βροχόπτωση καταγράφεται ~1100mm, στην οροσειρά του Πενταδακτύλου ~550mm και στην πεδιάδα ~300mm, ενώ η χιονόπτωση σημειώνεται συνήθως σε >1000m υψόμετρο κυρίως στην οροσειρά του Τροόδους και σε ορεινές περιοχές (Tsintides et al., 2007).

1.1.1 Γεωλογική δομή της Κύπρου

Η γεωλογία υπαγορεύει τη θέση, τον τύπο και τη διαθεσιμότητα συγκεκριμένων ορυκτών. Έχει επίσης θεμελιώδη σχέση με την τοπογραφία, το νερό, το έδαφος, τη βλάστηση και τη χρήση γης. Η Κύπρος μπορεί να χωριστεί σε 4 γεωλογικές ζώνες (βλ. Σχήμα 1).

- Ζώνη Πενταδακτύλου (Κερύνεια)

Η Ζώνη του Πενταδακτύλου σχηματίζει την ορεινή περιοχή της Κερύνειας στη βόρεια πλευρά της Κύπρου. Αποτελείται κυρίως από αλλόχθονους, ογκώδεις και ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους, δολομίτες και μάρμαρα ηλικίας 350 – 135 εκ. ετών. Στην συνέχεια εμφανίζονται τα νεότερα αυτόχθονα θαλάσσια ιζήματα, ηλικίας 67 μέχρι 15 εκ. χρόνων, πάνω από τα οποία επωθήθηκαν νοτιότερα οι παλαιότεροι αλλόχθονοι σχηματισμοί. Οι σημαντικότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι οι

Σχηματισμοί Δικώμου, Συγχαρίου και Αγίου Ιλαρίωνα, που αποτελούν και τις κύριες ασβεστολιθικές μάζες της οροσειράς (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, 2022).

- Ζώνη Τροόδους ή Οφιόλιθος Τροόδους

Η Ζώνη του Τροόδους δεσπόζει στο κεντρικό τμήμα του νησιού ως μια επιμήκης δομή θόλου που ξεπροβάλλει στον κύριο όγκο της οροσειράς του Τροόδους και στις περιοχές των Δασών Λεμεσού και Ακαπνού. Η δημιουργία του χρονολογείται 90 εκ. χρόνια πριν, στον βυθό της Νεοτηθύος θάλασσας. Στην μοναδικότητα του Οφιόλιθου διαδραματίζει το γεγονός ότι είναι κομμάτι πλήρως ανεπτυγμένου ωκεάνιου φλοιού (αποτελείται από πλουτώνια, φλεβικά και ηφαιστειακά πετρώματα και χημικά ιζήματα). Η διεύρυνση των ωκεανών και η δημιουργία του ωκεάνιου φλοιού έδωσε το έναυσμα για την δημιουργία του Οφιόλιθου του Τροόδους και έπειτα αναδύθηκε από την θάλασσα. Ακολούθως, τοποθετήθηκε στην θέση όπου βρίσκεται σήμερα με την βοήθεια των σύνθετων διεργασιών των τεκτονικών πλακών της Ευρασιατικής και της Αφρικανικής λιθοσφαιρικής πλάκας. Η στρωματογραφία του Οφιόλιθου δείχνει μια τοπογραφική αναστροφή, με τις χαμηλότερες σειρές πετρωμάτων να ξεπροβάλλουν στα ψηλότερα σημεία της οροσειράς, ενώ τα στρωματογραφικά υψηλότερα πετρώματα εμφανίζονται στις παρυφές του ορεινού όγκου του Τροόδους (Sceal et al., 2008).

Πιο συγκεκριμένα, ο Οφιόλιθος Τροόδους αποτελείται από τις ακόλουθες στρωματογραφικές ενότητες σε αύξουσα σειρά: πλουτώνια (μανδύα και σωρειτικά), ηφαιστειακά, φλεβικά και χημικά ιζήματα. Επιπλέον, η αλληλουχία του μανδύα ονομάζεται έτσι λόγω των πετρωμάτων που θεωρούνται τα υπολείμματα μετά τη μερική τήξη του άνω μανδύα και του σχηματισμού βασαλτικού μάγματος, από το οποίο έχουν προέλθει τα υπόλοιπα πετρώματα του Οφιόλιθου. Αποτελείται κυρίως από χαρτζβουργίτη και δουνίτη με το 50-80% των αρχικών ορυκτών να έχουν μετατραπεί σε σερπεντίνη και σερπεντινίτη (με ή χωρίς συγκεντρώσεις αμιάντου). Τα σωρειτικά πετρώματα είναι τα προϊόντα κρυστάλλωσης και συγκέντρωσης των κρυστάλλων στο δάπεδο του μάγματος, κάτω από τις ζώνες εξάπλωσης του θαλάσσιου πυθμένα. Αναλυτικότερα, τα κύρια σωρειτικά πετρώματα περιλαμβάνουν δουνίτη με ή χωρίς συγκεντρώσεις χρωμίτη, βερλίτη, πυροξενίτη, γάβρο και πλαγιογρανίτες που παρατηρούνται σε μικρές διακοπείσες εμφανίσεις. Τα φλεβικά πετρώματα έχουν βασαλτική ή δολεριτική σύνθεση και σχηματίστηκαν από τη στερεοποίηση του μάγματος στα κανάλια, μέσω των οποίων εισχωρούσε από τους θαλάμους μάγματος στον πυθμένα

του ωκεάνιου φλοιού τροφοδοτώντας ταυτόχρονα την υποβρύχια εξώθηση λάβας στον πυθμένα της θάλασσας. Τα ηφαιστειακά πετρώματα αποτελούνται από λάβα κυρίως βασαλτικής σύνθεσης (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, 2022).

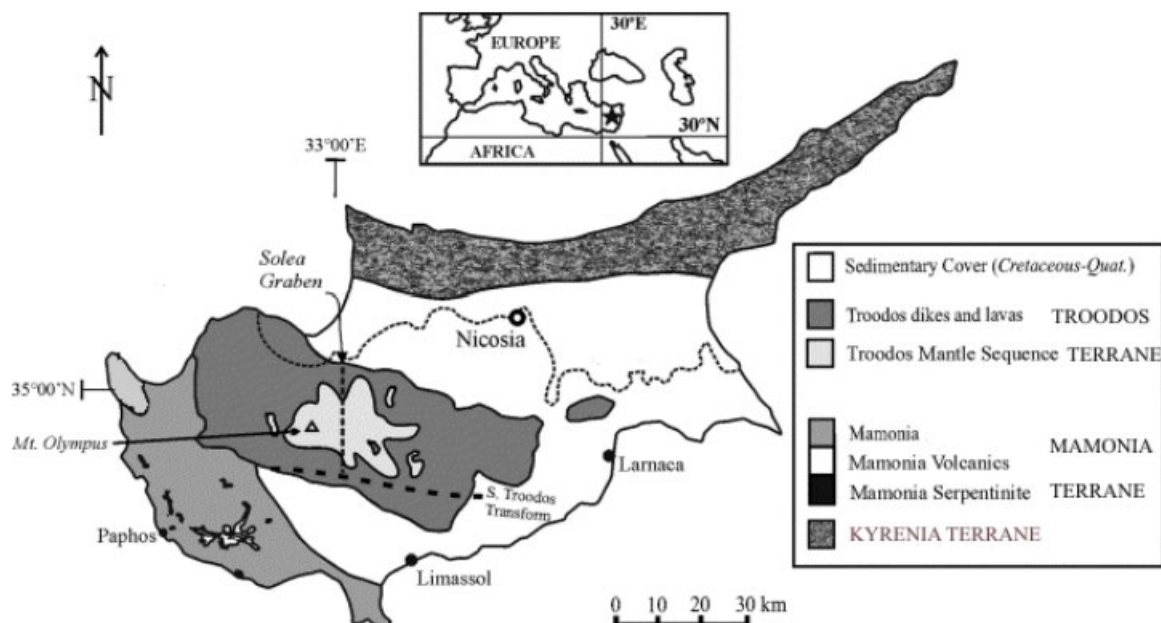
- Ζώνη Μαμωνιών ή Σύμπλεγμα Μαμωνιών

Η Ζώνη Μαμωνιών εμφανίζεται στην επαρχία Πάφου στο νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού και πήρε το όνομα του από το χωριό Μαμώνια που βρίσκεται στην περιοχή. Είναι μια σειρά από πυριγενή, ιζηματογενή και μεταμορφωμένα πετρώματα ηλικίας από το Μέσο Τριασικό έως το Ανώτερο Κρητιδικό με ηλικία 230-75 εκ. ετών. Αποτελείται από σειρά εκρηξιγενών (λάβες) και ιζηματογενών πετρωμάτων (ανακρυσταλλωμένοι ασβεστόλιθοι) της Ομάδας Διαρίζου, από σειρά πελαγικών ιζηματογενών πετρωμάτων της Ομάδας Αγίου Φωτίου και σειρά μεταμορφωμένων πετρωμάτων (σχιστόλιθοι και μάρμαρα) του Σχηματισμού Αγίας Βαρβάρας. Τα πετρώματα αυτά προήλθαν από μεταμόρφωση πετρωμάτων της Ομάδας Διαρίζου. Σαφέστερα, τα πετρώματα έχουν γενικά παραμορφωθεί έντονα και αναμειχθεί με θραύσματα πετρωμάτων του Οφιόλιθου του Τροόδους και θεωρούνται αλλόχθονα τόσο σε σχέση με τις υπερκείμενες αυτόχθονες ανθρακικές διαδοχές όσο και με τον Οφιόλιθο Τροόδους (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, 2022).

- Ζώνη των αυτόχθονων ιζηματογενών πετρωμάτων

Τα αυτόχθονα ιζηματογενή πετρώματα κυμαίνονται σε ηλικία από το Ανώτερο Κρητιδικό έως το Πλειστόκαινο ηλικίας 67 εκ. ετών έως πρόσφατα και καλύπτουν την περιοχή μεταξύ των ζωνών Πενταδακτύλου και Τροόδους (Μεσαορία), που εμφανίζονται επίσης στο νότιο τμήμα του νησιού. Αποτελείται από μπεντονίτες, ηφαιστειοκλαστικά, μάργες, κρητίδες, κερατόλιθους, ασβεστόλιθους, ασβεστολιθικούς ψαμμίτες, εβαπορίτες και κλαστικά ιζήματα. Η ιζηματογένεση στη γεωλογία της Κύπρου ξεκίνησε 80 εκ. χρόνια σε μια βαθιά θάλασσα που σταδιακά έγινε πιο ρηχή. Ξεκίνησε με την εναπόθεση του Σχηματισμού Κανναβίου και ακολούθησε η εναπόθεση των Σχηματισμών Μονής και Κάθηκα. Η ανθρακική καθίζηση ξεκινά 65 εκ. χρόνια πριν με την εναπόθεση του Σχηματισμού Λευκάρων, ο οποίος περιλαμβάνει πελαγικές μάργες και κρητίδες με χαρακτηριστικό λευκό χρώμα. Τον Σχηματισμό Λευκάρων ακολουθεί ο Σχηματισμός Πάχνας 22 εκ. έτη πριν, που αποτελείται κυρίως από κιτρινωπές μάργες και κρητίδες. Ως αποτέλεσμα της επανένωσης της Μεσογείου με τον Ατλαντικό Ωκεανό άρχισε νέα διαδικασία ιζηματογένεσης πριν από 5 – 2 εκ. χρόνια με την εναπόθεση του Σχηματισμού

της Λευκωσίας ο οποίος αποτελείται κυρίως από ιλύολιθούς, ασβεστιτικούς ψαμμίτες και μάργες (Sceal et al., 2008).



Σχήμα 1: Χάρτης με τις 3 μεγαλύτερες γεωλογικές ζώνες της Κύπρου (Naden et al., 2006).

1.1.2 Εξορυκτική δραστηριότητα στην Κύπρο

Η εξόρυξη ορυκτών στην Κύπρο χρονολογείται από τους ρωμαϊκούς και αρχαίους ελληνικούς χρόνους και το νησί ήταν ίσως ένας από τους πρώτους παραγωγούς χαλκού που προέρχεται από την τήξη θειούχων αλάτων. Οι πρόσφατες έρευνες ορυκτών ξεκίνησαν το 1882, αλλά η σύγχρονη εξόρυξη χαλκού και πυρίτη ξεκίνησε μόλις το 1914 και η πρώτη καταγεγραμμένη παραγωγή ήταν το 1922, την ίδια εποχή με την ανακάλυψη και την πρώτη εξόρυξη χρωμίτη. Όλες οι εξορύξεις αναλήφθηκαν από ιδιωτικές εταιρείες, αν και οι έρευνες ορυκτών πραγματοποιήθηκαν τόσο από τις Μεταλλευτικές Εταιρείες όσο και από το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης. Εντούτοις, η εκτίμηση των αποθεμάτων των μεταλλευμάτων που ανακαλύφθηκαν πραγματοποιήθηκε από τις ενδιαφερόμενες εταιρείες εξόρυξης. Αξίζει να σημειωθεί ότι, εντός του ορεινού όγκου του Τροόδους, η ορυκτοποίηση είναι στενά συνδεδεμένη με την ζώνη λάβας του Τροόδους. Το μέγεθος των σωμάτων του μεταλλεύματος πυρίτη ποικίλλει σημαντικά, αλλά είναι μικρά για τα παγκόσμια πρότυπα με το μεγαλύτερο, το Μαυροβούνι Νο. 4 να υπολογίζεται σε περίπου 16 εκατομμύρια τόνους. Ορισμένα περιέχουν υψηλή αναλογία χαλκού, για παράδειγμα το Μαυροβούνι σε 3,5% και η Σκουριώτισσα σε 2,3%, ενώ άλλα περιέχουν μόνο ίχνη χαλκού, όπως ο Μαθιάτης σε 0,2%. Ανάμεσα στο τεράστιο μέταλλευμα που ταξινομείται

ως περισσότερο από 50% κατ' όγκο πυρίτη ή 38% θείο, βρίσκονται όλες οι διαβαθμίσεις του μεταλλεύματος. Η ορυκτολογική σύσταση των θειούχων κοιτασμάτων της Κύπρου είναι κυρίως πυρίτης και μαρκασίτης (σε ορισμένες περιοχές) με μικρές ποσότητες χαλκοπυρίτη, σφαλερίτη, πυρροτίτη, ρουτίλιο και πολύτιμα μέταλλα (χρυσός και άργυρος), τα οποία συνδέονται κυρίως με χαλκοπυρίτη. Επιπλέον, τα περισσότερα επιφανειακά ή πλησίον επιφανειακά θειούχα σώματα έχουν υποστεί επιδράσεις από καιρικές συνθήκες και έχουν οξειδωθεί (Sceal et al., 2008).

Η αξιοποίηση του ορυκτού πλούτου στην Κύπρο ξεκίνησε 3 χιλιετίες πριν, με την συστηματική μεταλλευτική δραστηριότητα να επικεντρώνεται στην χρήση χαλκούχων κοιτασμάτων, η οποία εντατικοποιήθηκε τον προηγούμενο αιώνα. Συμπληρωματικά, η υπόγεια εξόρυξη χρωμίου και η επιφανειακή εξόρυξη αμιάντου επέφεραν στο νησί σημαντική οικονομική και πολιτιστική ανάπτυξη κατά την αρχαιότητα μέχρι σήμερα. Για την εκμετάλλευση των ορυκτών και ιδιαίτερα των χαλκούχων κοιτασμάτων, εφαρμόστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν καινοτόμες τεχνολογίες και διαδικασίες καθιστώντας έτσι την Κύπρο το σημαντικότερο κέντρο παραγωγής και επεξεργασίας χαλκού στην Μεσόγειο (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, 2022).

Επιπρόσθετα, στην Κοκκινοπεζούλα (εγκαταλελειμμένο μεταλλείο στο χωριό Μιτσερό) το σώμα του μεταλλεύματος αποκαλύφθηκε στην επιφάνεια και το πάνω μέρος του οξειδώθηκε σε ένα ογκώδες οξειδωμένο κάλυμμα (gossan), το οποίο χρησιμοποιήθηκε αρχικά ως ανοιχτό μεταλλείο κατά την περίοδο 1937-1940 για τις αξιόλογες ποσότητες χρυσού και αργύρου. Η εκμετάλλευση του πυριτικού μεταλλεύματος κάτω από το gossan ξεκίνησε το 1953. Πιο συγκεκριμένα, το gossan είναι ένας έντονα οξειδωμένος, διαβρωμένος ή αποσυντεθειμένος βράχος και συνήθως είναι το ανώτερο και εκτεθειμένο τμήμα ενός κοιτάσματος μεταλλεύματος. Αξιοσημείωτο είναι ότι, το gossan αποτελεί τυπικό χαρακτηριστικό κυπριακού τύπου σε ηφαιστειογενή θειούχα κοιτάσματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλά επίπεδα των στοιχείων σιδήρου, θείου, χαλκού, ψευδάργυρου, καθώς και ασήμι, αρσενικό, βισμούθιο, κάδμιο, σελήνιο και τελλούριο. Επίσης, από το μεταλλείο Κοκκινοπεζούλας εξήχθη καλής ποιότητας σιδηροπυρίτης, αν και ήταν φτωχός σε χαλκό (περίπου 0,5%). Η εξόρυξη μέχρι το κλείσιμό του μεταλλείου το 1967 παρήγαγε 1,75 εκατομμύρια τόνους πυρίτη από 5,5 εκατομμύρια τόνους μεταλλεύματος που εξορύσσονταν (Gavriel et al., 2014).

Η εξόρυξη στην Κύπρο χρονολογείται από την Εποχή του Χαλκού, όπου ο χαλκός παράγεται από την τήξη θειούχων αλάτων. Υπάρχουν ακόμη άφθονα στοιχεία που δείχνουν ότι το νησί ήταν μια σημαντική πηγή μετάλλων, όχι μόνο στους ρωμαϊκούς και φοινικικούς χρόνους, αλλά και πολλούς αιώνες νωρίτερα κατά την Εποχή του Χαλκού. Η περίοδος μεταξύ 1950 και 1970 ήταν η «χρυσή εποχή» για την εξόρυξη στην Κύπρο με τις εξαγωγές ορυκτών να έφταναν περίπου το 50% κατά βάρος των συνολικών εξαγωγών. Ηφαιστειογενή μαζικά θειούχα κοιτάσματα στην Κύπρο ανιχνεύονται στην ηφαιστειακή ζώνη του συμπλέγματος του Οφιόλιθου του Τροόδους και έτσι όλα τα θειούχα μεταλλεία αναπτύχθηκαν γύρω από τους πρόποδες του Τροόδους (Stylianou et al., 2020). Τα κοιτάσματα θειούχου της Κύπρου εξορύσσονταν σε μεγάλο βαθμό με μεθόδους ανοιχτού λάκκου, αν και ταυτόχρονα διεξάγονταν υπόγειες εργασίες. Ο χαλκός εξορυσσόταν στην Κύπρο από την Εποχή του Χαλκού και μέχρι το τέλος της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας ενώ, η Κύπρος παρέμεινε ο κύριος παραγωγός χαλκού στον κόσμο. Η εξορυκτική δραστηριότητα μετά τη Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία σταμάτησε μέχρι τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, όταν ο πυρίτης (FeS_2) και ο χαλκοπυρίτης (CuFeS_2) εξήχθησαν κυρίως για το θείο με σκοπό να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή θειικού οξέος με χαλκό ως παραπροϊόν. Παράλληλα, κατά καιρούς παρήχθησαν επίσης χρυσός και ασήμι. Η εξόρυξη πυρίτη ακολούθησε στενά την παγκόσμια ζήτηση και μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1960 τα ορυκτά αντιπροσώπευαν περίπου τα τρία πέμπτα όλων των εξαγωγών. Στις αρχές της δεκαετίας του 1970 η εξορυκτική δραστηριότητα μειώθηκε, λόγω της εξάντλησης των οικονομικών κοιτασμάτων θειούχου, του ισχυρού ανταγωνισμού από υπερπόντιες πηγές θείου και της πολιτικής κατάστασης στην Κύπρο εκείνη την εποχή. Ως απόρροια της εγκατάλειψης των μεταλλείων, φαίνεται ότι οι εξορυκτικές δραστηριότητες τα τελευταία 100 χρόνια έχουν αφήσει περισσότερους από 200 εκατομμύρια τόνους αποβλήτων εξόρυξης συγκεντρωμένους γύρω από εγκαταλελειμμένα μεταλλεία (Sceal et al., 2008).

Ακόμα, η μεταλλευτική βιομηχανία στη Κύπρο χρησιμοποιεί κυάνιο στις διεργασίες ανάκτησης μετάλλων για πάνω από 100 χρόνια. Λόγω της τοξικότητας του κυανίου και των δυνητικά καταστροφικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, εξακολουθεί να αποτελεί σημαντική περιβαλλοντική ανησυχία. Ιστορικά, η διαδικασία κυανίωσης αναπτύχθηκε από τον John Seward MacArthur το 1887 και η διαδικασία περιλαμβάνει την άλεση του μεταλλεύματος σε λεπτή σύσταση και την ανάμειξη του με ένα αραιό διάλυμα κυανιούχου νατρίου, παρουσία ατμοσφαιρικού οξυγόνου. Κατά συνέπεια, υπάρχει αυξημένη πιθανότητα να υπάρχουν σύμπλοκα κυανιδίου στα απορρίμματα μεταλλείων

επεξεργασίας χρυσού. Συμπληρωματικά, το κυάνιο μπορεί να είναι σημαντικό τοξικό για τον άνθρωπο και οι τρόποι έκθεσης περιλαμβάνουν δερματική επαφή, εισπνοή, κατάποση ή απορρόφηση από τα μάτια (Lortzie et al., 2015).

Η Κύπρος, που βρίσκεται στην ανατολική Μεσόγειο, λόγω της πολύπλοκης και πλούσιας γεωλογίας της φιλοξένησε πολυάριθμα, σχετικά μικρά θειούχα μεταλλεία που εκμεταλλεύτηκαν κατά τους ιστορικούς χρόνους και σήμερα χαρακτηρίζονται από μεγάλους σωρούς από απορρίμματα μεταλλείων, όξινες λίμνες και πλούσια σε μέταλλα ιζήματα. Η εξόρυξη στην Κύπρο έφτασε στο ζενίθ της μεταξύ 1950 και 1970, με αποτέλεσμα έναν σημαντικό αριθμό εγκαταλελειμμένων μεταλλείων στο νησί (Pyatt, 2001). Οι συνέπειες της εξόρυξης εξακολουθούν να είναι εμφανείς στα εγκαταλελειμμένα μεταλλεία, καθώς λόγω έλλειψης νομοθεσίας δεν έχουν ληφθεί μέτρα αποκατάστασης. Στην πλειονότητα των εγκαταλελειμμένων μεταλλείων, σχηματίζεται μια λίμνη με σκούρο καφέ όξινο νερό με υψηλή συγκέντρωση βαρέων μετάλλων, ενώ αναφέρεται όξινη βροχή στις αντίστοιχες περιοχές. Επιπλέον, οι εξορυκτικές δραστηριότητες είχαν ως αποτέλεσμα την αφαίρεση του επιφανειακού εδάφους και των θρεπτικών συστατικών του, φέρνοντας αντ' αυτού το υπόβαθρο στην επιφάνεια. Μια σειρά από χημικές (π.χ. pH, περιεκτικότητα σε μέταλλα, θρεπτικά συστατικά), φυσικές (π.χ. περιεκτικότητα σε πέτρες, υφή εδάφους, κλίση, τοπογραφία και σταθερότητα) και βιολογικές (π.χ. πληθυσμός μικροβίων, βακτήρια) καθορίζουν τη γονιμότητα του εδάφους. Αξιοσημείωτο είναι ότι, η σύνθεση των σωρών των απορριμμάτων χαρακτηρίζεται από έναν αριθμό παραμέτρων που αναστέλλουν την ανάπτυξη της βλάστησης. Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν υψηλή διαθεσιμότητα βαρέων μετάλλων, υψηλή οξύτητα, αυξημένο ποσοστό περιεκτικότητας σε άμμο, χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, υψηλή συμπίεση και χαμηλή οργανική περιεκτικότητα. Επιπρόσθετα, η κλιματική αλλαγή με μεγάλες περιόδους ξηρασίας κάνει την κατάσταση ακόμη πιο δύσκολη για την ανάπτυξη της βλάστησης σε αυτό το ήδη ρυπασμένο περιβάλλον. Βέβαια, παρά την υποβάθμιση του εδάφους στις περιοχές των μεταλλείων, ορισμένα αυτοφυή φυτά φαίνεται να αναπτύσσονται φυσιολογικά (Stylianou et al., 2020).

Η μεταλλευτική βιομηχανία στην περιοχή της Λεύκας εγκαταλείφθηκε το 1974 (λόγω της τουρκικής εισβολής), αφήνοντας πίσω της τεράστιες ποσότητες απορριμμάτων, ενώ η Λεύκα στην συνέχεια μετατράπηκε σε σημαντική κεντρική πόλη στο βορειοανατολικό

τμήματος του νησιού. Πολλές μελέτες αναφέρονται στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην περιοχή. Υψηλά επίπεδα αρσενικού, βαρίου, καδμίου, χρωμίου και σεληνίου έχουν αναφερθεί στο παράκτιο οικοσύστημα της Λεύκας. Αν και αναφέρεται οπτική και περιβαλλοντική υποβάθμιση της περιοχής της μονάδας επεξεργασίας Ξερού (Λεύκα), ορισμένα είδη φαίνεται να αναπτύσσονται σε αυτό το ρυπασμένο περιβάλλον (Stylianou et al., 2020). Παράλληλα, το μεταλλείο Λίμνης είναι ένα άλλο αρχαίο μεταλλείο εξόρυξης χαλκού και θειούχου στην Κύπρο που βρίσκεται στην επαρχία Πάφου, 5Km ανατολικά της πόλης της Πόλης Χρυσοχούς. Το μεταλλείο λειτουργούσε από την εποχή του Χαλκού με υπαίθριες μεθόδους εξόρυξης και στη συνέχεια με υπόγεια εξόρυξη. Μετά την κατάρρευση της Ρωμαϊκής αυτοκρατορίας, η εξόρυξη στην περιοχή σταμάτησε μέχρι τον 20ο αιώνα, όταν μια αυστραλιανή εταιρεία εξόρυξης άρχισε να εργάζεται μέχρι το κλείσιμό της το 1979. Το κύριο μέταλλευμα χαλκού στο μεταλλείο ήταν ο χαλκοπυρίτης. Επομένως, ο συμπυκνωμένος πυρίτης ήταν το κύριο απόβλητο υλικό που έμεινε αφήνοντας πίσω απορρίμματα σωρού λάσπης ύψους 20–25m (Stylianou et al., 2020).

1.2 Μεταλλεία της Κύπρου

Μετά το τέλος της μεταλλευτικής δραστηριότητας και λόγω της εξάντλησης των αποθεμάτων, σε συνδυασμό της εκβιομηχανοποίησης του προηγούμενου αιώνα, της έλλειψης επαρκούς περιβαλλοντικής γνώσης και τέλος της απουσίας νομοθετικού πλαισίου για την προστασία του περιβάλλοντος, στο νησί παρατηρούνται πλέον 25 αδρανή ή εγκαταλελειμμένα μεταλλεία χαλκού (μεικτών θειούχων). Τα εγκαταλελειμμένα αυτά μεταλλεία χρήζουν προσοχής και περιβαλλοντικής αποκατάστασης με στόχο την προστασία του βιότοπου όπου γειτνιάζει το μεταλλείο και για την ανάδειξη της μεταλλευτικής και γεωλογικής κληρονομιάς της Κύπρου (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, 2022).

Τα θειούχα κοιτάσματα χαρακτηρίζονται γενικά από μια ζώνη ογκώδους θειούχου μεταλλεύματος, το οποίο αποτελείται κυρίως από πυρίτη με μεταβλητές ποσότητες ορυκτών χαλκού, που περνά σε χαμηλότερα επίπεδα μέσω μιας ζώνης που αποτελείται από πυρίτιο και πυρίτη σε λάβες εμποτισμένες από σουλφίδια. Αυτές οι σχέσεις μπορούν να αναγνωριστούν στην πλειονότητα των θειούχων κοιτασμάτων. Η τεράστια ζώνη μεταλλεύματος αποτελείται σχεδόν εξ ολοκλήρου από θείο και σίδηρο και σε μικρότερες αναλογίες από χαλκό και ψευδάργυρο. Η περιεκτικότητα σε θείο κυμαίνεται μεταξύ 40

και 50 % κατά βάρος και σε χαλκό 0,5 έως 4,5 % κατά βάρος. Τα κύρια ορυκτά αυτής της ζώνης είναι ο πυρίτης (FeS_2), ο χαλκοπυρίτης (CuFeS_2) και ο σφαλερίτης ($\text{ZnS} - (\text{Zn-Fe})\text{S}$). Δευτερεύοντα ορυκτά είναι ο μαρκασίτης (FeS_2), ο χαλκοσίτης (Cu_2S), ο κοβελλίτης (CuS), ο βορνίτης (Cu_5FeS_4), ο τενορίτης (CuO) και ο χαλκός (Cu_2O). Η γεωχημεία των ιχνοστοιχείων των ογκωδών σουλφιδίων της Κύπρου δείχνει έντονες συσχετίσεις χρυσού, αργύρου, αρσενικού, σεληνίου και τοπικά Cd, Co, Ni και Sb (Stylianou et al., 2020).

1.2.1 Μιτσερό

Το μεταλλείο Κοκκινοπεζούλας ($33 \circ 06' 56'' \text{ A}$, $35 \circ 02' 08'' \text{ B}$) βρίσκεται νοτιοδυτικά του χωριού Μιτσερό, σε υψόμετρο 385m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το μεταλλείο Κοκκινοπεζούλας λειτούργησε από την HCM (Hellenic Copper Mines Ltd.) με τη μέθοδο της επιφανειακής εξόρυξης κατά την περίοδο 1953-1967. Το 1953 ξεκίνησε η υπόγεια εκμετάλλευση του μεταλλεύματος στο ορυχείο Κοκκινοπεζούλας, αν και μόλις το 1959 δόθηκε η έναρξη της υπαίθριας εκμετάλλευσης. Τα απορρίμματα χωρίς σημαντική περιεκτικότητα σε μέταλλα απομακρύνθηκαν, ενώ το μετάλλευμα φορτώθηκε για την Mitsero flotation plant. Έχει καταδειχθεί ότι το υλικό χαμηλής ποιότητας απορρίφθηκε στη βορειοανατολική πλευρά του μεταλλείου, ενώ οι μη μεταλλαγμένες λάβες απορρίφθηκαν στο Νότια πλευρά. Επιπλέον, από το 1987 έως το 1988, πραγματοποιήθηκε μερικώς επιτυχής αναδάσωση της νότιας πλευράς του μεταλλείου από την HCM. Ωστόσο, σημειώνεται ότι πολύ λίγα δέντρα έχουν καταφέρει να αναπτυχθούν στη βορειοανατολική πλευρά, ενώ περισσότερα δέντρα φύονται στη νότια πλευρά. Ειδικότερα, φυτεύτηκαν πεύκα, κυπαρίσσια και ακακίες, ενώ κάποια άλλα δέντρα φύτρωσαν μόνα τους (Stylianou et al., 2020).

Το πρώην εργοστάσιο επεξεργασίας ορυκτών Μιτσερού βρίσκεται στην περιοχή εξόρυξης Ταμασού (Αγροκήπια-Μιτσερό, Λευκωσία). Η έρευνα και η εξόρυξη χρυσού και αργύρου ξεκίνησαν το 1936 στο Κοκκινοβούναρο και το εργοστάσιο κυανίου κατασκευάστηκε το 1937 για την επεξεργασία του μεταλλεύματος από τις μισθώσεις Αγροκηπιάς-Μιτσερό και Καμπιά-Σιά. Όταν τα περισσότερα από τα κοιτάσματα εξαντλήθηκαν το 1940, το εργοστάσιο μεταφέρθηκε αλλού. Στις περιοχές που περιβάλλουν το εργοστάσιο εμπλουτισμού χρυσού εξακολουθούν να υπάρχουν

ανεπεξέργαστα μεταλλεύματα και μεγάλη ποσότητα απορριμμάτων που παρήχθησαν κατά τη λειτουργία του εργοστασίου (Lortzie et al., 2015).

1.2.2 Μαθιάτης

Το μεταλλείο Βόρειου Μαθιάτη (33 ° 20' 50'' A, 34 ° 58' 34'' B) βρίσκεται βόρεια του χωριού Μαθιάτη, μεταξύ των χωριών Αγία Βαρβάρα και Μαθιάτης, σε υψόμετρο 302m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το μεταλλείο Νοτίου Μαθιάτη (33 ° 20' 48'' A, 34 ° 56' 58'' B) βρίσκεται νοτιοανατολικά του χωριού Μαθιάτη, μεταξύ των χωριών Σία και Μαθιάτη, σε υψόμετρο 402m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (Stylianou et al., 2020).

Η εξόρυξη χαλκού στην Κύπρο χρονολογείται από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα. Ο χαλκός στην Κύπρο συναντάται σε κοιτάσματα θειούχου μεταλλεύματος και για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν πολυάριθμα μεταλλεία σε περιοχές όπου βρίσκονταν θειούχα κοιτάσματα. Το μεταλλείο Βόρειου Μαθιάτη, είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα εγκαταλελειμμένου ανοιχτού θειούχου μεταλλείου από πολλά στην Κύπρο. Ελλείψει νομοθεσίας, τα μεταλλεία έμειναν εγκαταλελειμμένα χωρίς μέτρα αποκατάστασης μετά τη διακοπή της εξόρυξης και ως εκ τούτου οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εξόρυξη εξακολουθούν να υφίστανται, επηρεάζοντας τη γύρω περιοχή. Το μεταλλείο Βόρειου Μαθιάτη εγκαταλείφθηκε από το 1987, όπου μεγάλες ποσότητες σωρών απορριμμάτων παραμένουν εκτεθειμένα γύρω από το ανοιχτό λάκκο και οξειδώνονται. Η όξινη απορροή μεταλλείων (OAM) είναι μία από τις κύριες περιβαλλοντικές επιπτώσεις των θειούχων μεταλλείων. Η OAM παράγεται κυρίως όταν τα πετρώματα πυρίτη αφήνονται εκτεθειμένα στην επιφάνεια και ως αποτέλεσμα οξειδώνονται από ένα συνδυασμό νερού, οξυγόνου και υπαρχόντων βακτηρίων. Τα απορρίμματα του συγκεκριμένου μεταλλείου χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά χαμηλές τιμές pH και υψηλές συγκεντρώσεις ιόντων βαρέων μετάλλων, καθώς και ιόντων θείου, που ρυπαίνουν σημαντικά μεγάλες περιοχές και συστήματα επιφανειακών υδάτων (Stylianou et al., 2014). Αξίζει να σημειωθεί ότι το εγκαταλελειμμένο μεταλλείο του Μαθιάτη, ένα τυπικό κοίτασμα πυρίτη χαμηλής περιεκτικότητας σε χαλκό, έχει μετάλλευμα με συνολική χωρητικότητα περίπου 3 εκατομμυρίων τόνων μεταλλεύματος πυρίτη που περιέχει κατά μέσο όρο 33% θείο και 0,24% Cu. Τα απορρίμματα (ή tailings)

του μεταλλείου χαρακτηρίζονται από σχετικά χαμηλό Cu και Ni, σχετικά υψηλό Zn και μέτρια υψηλό Co (Pantazis & Govett, 1973).

Επιπρόσθετα, το κοίτασμα Μαθιάτη είναι ένα από τα 30 περίπου κοιτάσματα θειούχου στον Οφιόλιθο του Τροόδους που έχουν εξορυχθεί τα τελευταία 5000 χρόνια. Οι σκωρίες που εμφανίζονται στην περιοχή γύρω από τον Μαθιάτη μαρτυρούν εργασίες εξόρυξης και τήξης μικρής κλίμακας που χρονολογούνται τουλάχιστον από τους ρωμαϊκούς χρόνους. Αν και το σύγχρονο μεταλλείο στον Μαθιάτη άνοιξε τη δεκαετία του 1930, η εξόρυξη μεγάλης κλίμακας ξεκίνησε μόλις το 1965 και ολοκληρώθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1980. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, αφαιρέθηκαν περίπου 3 εκατομμύρια τόνοι μεταλλεύματος χαλκού χαμηλής ποιότητας (κατά μέσο όρο 0,3% Cu). Η εγκατάλειψη του μεταλλείου Μαθιάτη στα μέσα της δεκαετίας του 1980 άφησε ένα βαθύ λάκκο, που τώρα φιλοξενεί μια λίμνη που τροφοδοτείται από επιφανειακή απορροή και περιβάλλεται από σωρούς μεταλλοποιημένης και μη μεταλλευμένης λείας. Η λεία εκτιμάται ότι είναι της τάξης των 10,5 εκατομμυρίων τόνων και περιλαμβάνει ίζημα που κυμαίνονται σε μεγέθη από λεπτά σωματίδια μεγέθους πηλού και λάσπης έως ογκόλιθους διαμέτρου άνω του 1m. Τα απόβλητα απορρίφθηκαν και σχημάτισαν υπέρογκους σωρούς στην κορυφή με απότομες πλαγιές. Ταυτόχρονα, σε περιόδους βροχόπτωσης δημιουργούνται ρέματα και έτσι μεταφέρονται σωματίδια μεγέθους πηλού, λάσπης και άμμου σε παρακείμενες γεωργικές εκτάσεις και σε κοίτες ρεμάτων. Τα σουλφιδικά απόβλητα, ιδιαίτερα αυτά που περιέχουν πυρίτη, είναι προφανώς οξειδωτικά και δημιουργούν θειούχα αέρια και μια πληθώρα πολύχρωμων δευτερογενών ορυκτών, τα οποία φαίνεται να είναι υπεύθυνα για τη τσιμεντοποίηση του ιζήματος των απορριμμάτων στους σωρούς των αποβλήτων (Hudson-Edwards & Edwards, 2005). Σύμφωνα με τους Seal et al. (2008), το εμβαδόν του ανοικτού λάκκου είναι 104.334m² και το εμβαδόν των tailings 168.827m². Επιπλέον, αναφέρεται ότι η αναγέννηση των δασικών εκτάσεων μπορεί να παρατηρηθεί στην κορυφή των σωρών των αποβλήτων του μεταλλείου, στις πιο σταθερές πλαγιές στη βόρεια πλευρά του μεταλλείου και σε ορισμένα σημεία μη ρυπασμένης λείας.

1.2.3 Σκουριώτισσα

Στον τομέα της μεταλλευτικής βιομηχανίας και εκμετάλλευσης ορυκτών δραστηριοποιείται μόνο η εταιρεία της Hellenic Copper Mines Ltd (HCM) η οποία

εργάζεται στο μεταλλείο της Σκουριώτισσας. Αναλυτικότερα, η HCM ασχολείται με χαμηλής περιεκτικότητας κοιτάσματα από προηγούμενες εξορυκτικές εργασίες στην περιοχή του μεταλλείου της Σκουριώτισσας για την παραγωγή μεταλλικού χαλκού και κράματος πολύτιμων μετάλλων (χρυσού, αργυρού και χαλκού) (Υπηρεσία Μεταλλείων, 2022).

1.2.4 Λεύκα

Η μονάδα επεξεργασίας στον Ξερό (Λεύκα) τέθηκε σε λειτουργία το 1952 και ήταν ικανή να επεξεργάζεται 60.000 τόνους μεταλλεύματος το μήνα. Οι χαλκοπυρίτες που προορίζονταν για εξαγωγές αποθηκεύονταν, ενώ μέρος του μεταλλεύματος επεξεργαζόταν. Η επεξεργασία για την παραγωγή συμπυκνωμάτων χαλκού περιελάμβανε όξινη έκπλυση, ταξινόμηση, πάχυνση με άλεσμα και τέλος επίπλυση. Άλλα προϊόντα περιλάμβαναν πυριτική άμμο, υψηλής ποιότητας κοκκώδη πυρίτη χωρίς λάσπη, χαλκό τσιμέντου και χαλκοπυρίτες. Αργότερα δευτερογενή προϊόντα, όπως ο θειικός χαλκός (CuSO_4), το θειικό οξύ (H_2SO_4) και μετά ο χρυσός παρήχθη με τη μέθοδο έκπλυσης κυανιδίου (Stylianou et al., 2020). Ως αποτέλεσμα της εγκατάλειψης του μεταλλείου, ποικίλα περιβαλλοντικά προβλήματα έχουν σημειωθεί όπως για παράδειγμα οι αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στην χλωρίδα που φύεται στην περιοχή (Gucel et al., 2009).

1.2.5 Αμιάντος

Στο τέλος της δεκαετίας του '80 σήμανε η διακοπή της μεταλλευτικής δραστηριότητας για εκμετάλλευση αμιάντου στο πλέον εγκαταλελειμμένο μεταλλείο στο χωριό Αμιάντος, λόγω πτώχευσης της ιδιοκτήτριας εταιρείας. Το συγκεκριμένο μεταλλείο αποτελούσε ένα από τα μεγαλύτερα μεταλλεία αμιάντου σε όλη την Ευρώπη και ως απόρροια, τεράστιοι όγκοι μπάζων αφέθηκαν στο χώρο του μεταλλείου χωρίς καμία αποκατάσταση με επικείμενη περιβαλλοντική ρύπανση και κίνδυνο πρόκλησης κατολισθήσεων που επηρέαζε σοβαρά την κοινότητα Αμιάντου. Το 1995 άρχισαν διαδικασίες αποκατάστασης στο εγκαταλελειμμένο μεταλλείο του Αμιάντου με σκοπό την σταθεροποίηση των μπαζών και την αναδάσωση και αναχλόαση της γύρω περιοχής (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, 2022).

1.2.6 Σιά

Στο μεταλλείο της Σιάς το μέταλλευμα υψηλής ποιότητας αποτελούνταν από ογκώδη πυρίτη με περιεκτικότητα σε θείο μεγαλύτερη από 40 wt% και δευτερεύοντα χαλκοπυρίτη (μέσος όρος 0,5-1 Cu κατά βάρος%). Το μεταλλείο εργαζόταν για χρυσό και ασήμι από το 1943 και η εξορυκτική του δραστηριότητα ολοκληρώθηκε το 1959. Τεράστια μεταλλεύματα της τάξης των 170.000 τόνων με μέσο όρο ποιότητας 40 wt% θείο και 0,5–1.0 wt% Cu και διασκορπισμένο μέταλλευμα περίπου 164.000 τόνων μέσης ποιότητας με 25 wt% θείου και 0,2 wt% Cu, αξιοποιήθηκαν. Επιπρόσθετα, τα απορρίμματα υπολογίστηκαν ότι ήταν της τάξης των 6,5 εκατομμυρίων τόνων σε μια έκταση 14.000m². Στον χώρο του εγκαταλελειμμένου μεταλλείου βρίσκεται ανοιχτός λάκκος με μέγιστο βάθος 85m και έχει έκταση περίπου 4.400m² (Galanopoulos et al., 2019).

1.3 Καταγραφή Προβλήματος

Εν πρώτοις, τα κενά που προκύπτουν μέσα από τη βιβλιογραφία υποδεικνύουν πως δεν υπάρχει ξεκάθαρη εικόνα σε σχέση με την περιβαλλοντική επιβάρυνση της γύρω περιοχής των εγκαταλελειμμένων μεταλλείων της Κύπρου και πιο ειδικά για τα περιβαλλοντικά προβλήματα που ταλανίζουν τις περιοχές των μεταλλείων. Επιπρόσθετα, η έλλειψη νομοθεσίας και η θέσπιση μέτρων αποκατάστασης μετά την διακοπή της μεταλλευτικής δραστηριότητας οδήγησε σε τεράστιες περιβαλλοντικές συνέπειες που είναι ακόμα εμφανείς στο νησί. Αναλυτικότερα, στα εγκαταλελειμμένα μεταλλεία παρατηρείται το φαινόμενο της όξινης απορροής μεταλλείων (OAM) το οποίο επηρεάζει σημαντικά τα υπόγεια ύδατα, την πανίδα και την χλωρίδα των μεταλλείων.

Συμπληρωματικά, επιχειρείται να παρουσιαστεί ένα μέτρο αποκατάστασης που επιδιώκει την αποτελεσματική αναβλάστηση φυτικών ειδών στα εγκαταλελειμμένα μεταλλεία με την προσθήκη κομπόστ, αφού τα παγκόσμια περιβαλλοντικά προβλήματα όπως η ατμοσφαιρική και εδαφική ρύπανση, η κλιματική αλλαγή και η OAM δεν θα μπορούσαν να αφήσουν ανεπηρέαστα τα φυτά που φύονταν στις περιοχές γύρω από τα μεταλλεία.

1.4 Σημασία και αναγκαιότητα μελέτης

Η ρύπανση του εδάφους και των υπόγειων νερών από εγκαταλελειμμένα μεταλλεία αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα που επιφέρει σημαντικές άμεσες ή έμμεσες αρνητικές επιπτώσεις τόσο στην ανθρώπινη υγεία όσο και σε γειτονικούς οικολογικούς αποδέκτες. Ένα σημαντικό πρόβλημα που χρήζει άμεσης αντιμετώπισης, λόγω των κινδύνων που μπορεί να προξενήσει σε φυτά, ζώα και ανθρώπους, είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος με βαρέα μέταλλα. Η απορρύπανση των ρυπασμένων εδαφών και υδάτων κρίνεται άκρως απαραίτητη για την αποφυγή της εισροής των τοξικών αυτών ουσιών στην τροφική αλυσίδα. Σε αντίθεση με τους οργανικούς ρύπους, τα μέταλλα δεν αποδομούνται βιολογικά, συνεπώς πρέπει να γίνει αφαίρεσή τους από το έδαφος.

Οι επιπτώσεις στο περιβάλλον συνοδεύονται και από οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις. Αυτές δεν συνδέονται μόνο με το κόστος αποκατάστασης, αλλά και με την αξία της γης, την χρήση της και τον τρόπο που επηρεάζονται οι γύρω περιοχές από το ρυπασμένο τοπίο. Η φύτευση φυτικών ειδών σε συνδυασμό την προσθήκη κομπόστ είναι μια οικονομική λύση προς επίλυση αυτού του περιβαλλοντικού προβλήματος.

Αναντίρρητα, είναι πλέον αποδεκτό πως η μεταλλευτική δραστηριότητα και κληρονομία μιας χώρας αποτελούν την ταυτότητα του ορυκτού πλούτου και ταυτόχρονα έχουν οικολογική, τουριστική και πολιτιστική αξία. Τα οφέλη που προσφέρει η γνώση για τα μεταλλεύματα είναι τεράστια καθώς μπορούν να αξιοποιηθούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο με κύριο μέλημα την άμεση και έμμεση αξιοποίησή τους.

1.5 Σκοποί και στόχοι

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η εξακρίβωση της αποτελεσματικότητας της χρήσης κομπόστ σε υφιστάμενα δείγματα εξορυκτικών αποβλήτων από το εγκαταλελειμμένο μεταλλείο Βόρειου Μαθιάτη για την επιτυχή βλάστηση μηδικής (*Medicago sativa*) και την ανάπτυξη και αύξηση πεύκων του είδους *Pinus brutia*.

Επιμέρους στόχους αποτελούν ο χαρακτηρισμός της ανθεκτικότητας του *Medicago sativa* και *Pinus brutia* στα βαρέα μέταλλα και η παρουσίαση των περιβαλλοντικών προκλήσεων που έχει να αντιμετωπίσει. Επιπρόσθετα, επιχειρείται να παρουσιαστεί η

ποιοτική κατάσταση των εδαφών στα εγκαταλελειμμένα μεταλλεία και κατά πόσο τα υφιστάμενα μέτρα αποκατάστασης επιφέρουν θετικά αποτελέσματα.

1.6 Διασαφηνίσεις – προσδιορισμός και διατύπωση των κεντρικών εννοιών

1.6.1 Αποκατάσταση

Ο όρος «αποκατάσταση του εδάφους» ορίζεται ως οι διαδικασίες που εφαρμόζονται για την επαναφορά του εδάφους σε μια μορφή οικολογικής σταθερότητας με ταυτόχρονη δημιουργία φυτικών κοινοτήτων που υποστήριζε το έδαφος πριν από τη διαταραχή (Poonam et al., 2014).

1.6.2 Απορρίμματα μεταλλείων / Mine Tailings

Τα απορρίμματα μεταλλείων είναι το κύριο προϊόν που απομένει μετά τον εμπλουτισμό του μεταλλεύματος και εάν αφεθούν χωρίς ανάκτηση ή αποκατάσταση μπορούν να συμβάλουν στη διασπορά σωματιδίων στο περιβάλλον και στην ολική ρύπανση του περιβάλλοντος της περιοχής εξόρυξης (Gil-Loaiza et al., 2016).

1.6.3 Ρύπανση εδάφους από βαρέα μέταλλα

Οι υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων σε παγκόσμιο επίπεδο έχουν αυξηθεί δραματικά λόγω μιας ποικιλίας δραστηριοτήτων από την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης. Μία από τις κύριες πηγές ρύπανσης από βαρέα μέταλλα είναι η εξόρυξη και η τήξη μεταλλευμάτων. Η μακροχρόνια παραμονή των μετάλλων στο περιβάλλον αποτελεί ανησυχία για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Οι εξορυκτικές δραστηριότητες δημιουργούν μεγάλη ποσότητα αποβλήτων πετρωμάτων και απορριμμάτων που εναποτίθενται στην επιφάνεια του εδάφους. Τα υποβαθμισμένα εδάφη, τα απόβλητα και τα απορρίμματα είναι συχνά πολύ ασταθή και δυνητικά θα αποτελέσουν πηγές ρύπανσης (Freitas et al., 2004).

1.6.4 Κομπόστ

Υπάρχει μια παγκόσμια αυξημένη ανάγκη για επαναχρησιμοποίηση των αυξανόμενων ποσοτήτων οργανικών υποπροϊόντων και απορριμμάτων από νοικοκυριά, βιομηχανίες

και ενεργειακές εγκαταστάσεις. Πολλά από τα ανακυκλώσιμα απόβλητα, όπως το κομπόστ έχουν προταθεί και χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για τη βελτίωση του εδάφους και την δέσμευση άνθρακα για την παροχή ταχύτερης αποκατάστασης της βλάστησης σε εξαιρετικά υποβαθμισμένα εδάφη (Heiskanen et al., 2022).

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Το κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης πραγματεύεται με όλη την ανανεωμένη πληροφορία στη βιβλιογραφία για τα εγκαταλελειμμένα μεταλλεία της Κύπρου και τις επιπτώσεις που επιφέρουν τα απορρίμματα μεταλλείων. Επίσης, αναφέρονται οι ευρέως χρησιμοποιούμενες πρακτικές για αποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών με βαρέα μέταλλα.

2.1 Εισαγωγή

Η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία θα ασχοληθεί εκτενώς με την προσθήκη κομπόστ σε tailings εγκαταλελειμμένου θειούχου μεταλλείου με στόχο τον προσδιορισμό της αποτελεσματικότητας αυτής της πρακτικής για την φύτευση των σπόρων του είδους *Medicago sativa* και των φυτών *Pinus brutia*.

2.1.1 Κομπόστ

Είναι κοινός τόπος ότι, τις τελευταίες δεκαετίες έχουν χρησιμοποιηθεί πολυάριθμες μέθοδοι για την αποκατάσταση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που αποδίδονται στις εξορυκτικές δραστηριότητες, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης φυσικών, χημικών και βιολογικών μηχανισμών (Anning & Akoto, 2018). Μεταξύ των διαθέσιμων πρακτικών, η φυτοαποκατάσταση ή φυτοεξυγνίαση με την χρήση φυτών είτε *in situ* ή *ex situ* για αποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών μέσω της απομάκρυνσης, διάσπασης και σταθεροποίησης των ρυπαντών, έχει τύχει μελέτης τα τελευταία χρόνια από αρκετούς ερευνητές και βασίζεται στην ικανότητα κάποιων φυτών να προσλαμβάνουν τα βαρέα μέταλλα και να τα αποθηκεύουν στους ιστούς τους (Stylianou et al. 2020). Συμπληρωματικά, η φυτοαποκατάσταση εφαρμόζεται σε εδάφη και ύδατα που πάσχουν από χρόνια ρύπανση όπως για παράδειγμα σε απορρίμματα μεταλλείου. Συνεπώς, τα φυτά που χρησιμοποιούνται για την φυτοαποκατάσταση έρχονται αντιμέτωπα με

δυσμενείς συνθήκες όπως οι χαμηλές τιμές pH, υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων και έλλειψη οργανικής ύλης. Με δεδομένο την τεχνολογία της φυτοαποκατάστασης για την αποτελεσματική αποκατάσταση των εγκαταλελειμμένων μεταλλείων, πολλοί επιστήμονες προτείνουν την προσθήκη οργανικών τροποποιήσεων (εδαφοβελτιωτικών) όπως βιοαπανθράκωμα (biochar) (Hagner et al., 2021; Houben et al., 2013), κομπόστ (Businelli et al., 2009), λυματολάσπη (Dindar et al., 2015; Głab et al., 2018) και βιοστερεά (Alday et al., 2011). Πράγματι, η εφαρμογή της οργανικής ύλης σε απορρίμματα μεταλλείων αυξάνει τη συγκέντρωση θρεπτικών ουσιών στο έδαφος. Γενικά, διαφορετικές οργανικές τροποποιήσεις προσδίδουν διαφορετικά αποτελέσματα στα απορρίμματα λόγω των διαφορών στις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των οργανικών ουσιών και των απορριμμάτων. Για παράδειγμα, η λυματολάσπη με υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο, φώσφορο και οργανική ύλη αναγνωρίζεται ως πηγή θρεπτικών συστατικών για τα φυτικά είδη. Η εφαρμογή κομπόστ με σκοπό τη βελτίωση του εδάφους έχει την ικανότητα να αυξάνει το ποσοστό της οργανικής ύλης και την περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά και παράλληλα ενισχύει τη δραστηριότητα των ενζύμων του εδάφους. Επιπλέον, το κομπόστ αυξάνει τη βιομάζα και την ποικιλότητα των μικροοργανισμών του εδάφους, προάγει την ανάπτυξη των φυτών και βελτιώνει τις αποδόσεις των καλλιεργειών. Ταυτόχρονα, αυτή η μέθοδος μειώνει τις συγκεντρώσεις των τοξικών μετάλλων στα εδάφη και τα φυτά (Ai et al., 2020).

Κατά κοινή ομολογία, τα εδάφη των μεταλλείων χαρακτηρίζονται από αστάθεια, σπάνια συνοχή και από χαμηλή περιεκτικότητά σε θρεπτικά συστατικά και σε οργανική ύλη. Επίσης, τα υψηλά επίπεδα βαρέων μετάλλων και ο σχηματισμός OAM από την οξείδωση των θειούχων με εντυπωσιακή πτώση του pH, συμβάλλουν στην υποβάθμιση του εδάφους και στην απώλεια της βιοποικιλότητας. Επομένως, η αποκατάσταση των φυσικών, χημικών και βιολογικών ιδιοτήτων των εδαφών είναι απαραίτητη για τη ενίσχυση της σταθεροποίησης του εδάφους και για την προστασία από τη διάβρωση. Σύμφωνα με τους Abubakari et al. (2017), ιδιαίτερης σημασίας κρίνεται η συμβολή της τροποποίησης του εδάφους με εδαφοβελτιωτικά για την αύξηση του pH, τη σταθεροποίηση των βαρέων μετάλλων και την προώθηση της αναβλάστησης των ρυπασμένων εδαφών. Το κομπόστ αποτελεί ένα καλό εργαλείο για την αποκατάσταση των ρυπασμένων με βαρέα μέταλλα εδαφών. Αναλυτικότερα, το κομπόστ παρέχει θρεπτικά συστατικά και οργανική ύλη στο έδαφος και φέρει ωφέλιμους μικροοργανισμούς, διατηρώντας έτσι τη ζωή τους στο έδαφος. Το κομπόστ γενικά

προάγει την βλαστικότητα και την εδαφική αναπνοή, διαδικασίες που βοηθούν στην πρόληψη της διάβρωσης των ρυπασμένων εδαφών από τον άνεμο και το νερό.

Οι αρνητικές επιπτώσεις της εξορυκτικής δραστηριότητας περιλαμβάνει απώλεια επιφανειακών εδαφών και οργανικής ύλης στο εδάφους, απαιτώντας έτσι την παροχή οργανικών και θρεπτικών συστατικών κατά την φυτοαποκατάσταση οικοσυστημάτων. Βραχυπρόθεσμα, η εφαρμογή οργανικών τροποποιήσεων μπορεί να έχει προσφέρει σημαντικά καθώς βελτιώνει τις φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητες του εδάφους και επομένως την παραγωγικότητα και τη γονιμότητά του. Στις ανεπτυγμένες χώρες, η λυματολάσπη και άλλα υποπροϊόντα που παράγονται από ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά ως τροποποιήσεις εδαφών ρυπασμένων με μέταλλα και απορριμμάτων εξόρυξης. Πλέον, παρατηρείται ευρεία χρήση αυτών των οργανικών τροποποιήσεων λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε οργανική ύλη και θρεπτικά συστατικά, κυρίως N και P και επομένως είναι κατάλληλες για τη δημιουργία βιώσιμης βλάστησης (Mingorance et al., 2017).

Συμπερασματικά, η αύξηση της οργανικής ύλης του εδάφους και της διαθεσιμότητας θρεπτικών ουσιών σχετίζεται άμεσα με την εφαρμογή κομπόστ ή εδαφοβελτιωτικών. Η χρήση του κομπόστ είναι επίσης ευεργετική για τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους αφού αυξάνει το πορώδες, την δομική σταθερότητα, την διαθέσιμη περιεκτικότητα σε νερό και μείωση της διάβρωσης. Εντούτοις, η επίδραση της χρήσης κομπόστ στα επίπεδα βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, τα είδη φυτών και την ποιότητα του κομπόστ (Pinamonti et al., 1997).

2.1.2 Βαρέα Μέταλλα και Ρύπανση εδάφους

Αρχικά, τα μέταλλα έχουν διττό ρόλο καθώς αποτελούν βασικά και ωφέλιμα θρεπτικά συστατικά στη διατροφή των φυτών, των ζώων και του ανθρώπου και επιπλέον σε κάποιες περιπτώσεις αναφέρονται ως επιβλαβείς ρυπογόνες ουσίες που επηρεάζουν αρνητικά την ευημερία των ανθρώπων (Tchounwou et al., 2012). Πιο συγκεκριμένα, η μακροχρόνια εναπόθεση μετάλλων στο έδαφος μπορεί να οδηγήσει σε συσσώρευση, μεταφορά και βιοτοξικότητα/ζωοτοξικότητα που προκαλείται λόγω της κινητικότητας και της βιοδιαθεσιμότητας σημαντικού κλάσματος των μετάλλων. Συμπληρωματικά, σημαντικός αριθμός μετάλλων είναι απαραίτητα στη διατροφή των ζωντανών

οργανισμών και συγχρόνως ακόμη και τοξικά μέταλλα όπως Ni, As και Cr επισημαίνονται ως απαραίτητα για τα ζωικά είδη. Ομοίως, το Ni και το Cr είναι απαραίτητα στην ανθρώπινη διατροφή. Απεναντίας, εάν προσληφθούν σε υπερβολικές ποσότητες, αυτά τα ευεργετικά θρεπτικά συστατικά μπορούν να προκαλέσουν δυσμενείς επιπτώσεις σε αυτούς τους οργανισμούς (Adriano et al., 2004).

Αναντίρρητα, τα βαρέα μέταλλα χρησιμοποιούνται και εκμεταλλεύονται από τον άνθρωπο εδώ και χιλιάδες χρόνια και αρκετές επιβλαβείς επιπτώσεις των βαρέων μετάλλων στην υγεία είναι γνωστές εδώ και πολύ καιρό (Tangahu et al., 2011). Αφενός, η έκθεση σε βαρέα μέταλλα συνεχίζει και αυξάνεται ιδιαίτερα σε λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες, αφετέρου οι εκπομπές έχουν μειωθεί στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες τα τελευταία 100 χρόνια. Οποιοδήποτε είδος μετάλλου (ή μεταλλοειδούς) μπορεί να θεωρηθεί «ρυπαντικός παράγοντας» εάν εμφανίζεται όπου είναι ανεπιθύμητο ή σε μορφή ή συγκέντρωση που προκαλεί επιζήμια επίδραση στον άνθρωπο ή στο περιβάλλον. Ειδικότερα, τα μέταλλα/μεταλλοειδή περιλαμβάνουν μόλυβδο (Pb), κάδμιο (Cd), υδράργυρο (Hg), αρσενικό (As), χρώμιο (Cr), χαλκό (Cu), σελήνιο (Se), νικέλιο (Ni), άργυρο (Ag) και ψευδάργυρος (Zn). Άλλοι λιγότερο συνηθισμένοι μεταλλικοί ρύποι περιλαμβάνουν το αλουμίνιο (Al), το καίσιο (Cs), το κοβάλτιο (Co), το μαγγάνιο (Mn), το μολυβδαίνιο (Mo), το στρόντιο (Sr) και το ουράνιο (U) (Panagos et al., 2013).

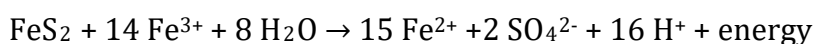
Με γνώμονα την αρνητική επίδραση των μετάλλων στο έδαφος, διεξάχθηκαν ποικίλες έρευνες για την αξιολόγηση των επιπέδων βαρέων μετάλλων σε μεταλλεία της Κύπρου. Για παράδειγμα, μερικές εκατοντάδες μέτρα μακριά από τα κύρια κοιτάσματα θειούχων ορυκτών του νησιού βρέθηκαν υψηλές τιμές Cu και Zn στα πετρώματα και ασθενώς αυξημένα επίπεδα Hg και Ba στα εδάφη. Το φαιόχρωμα και οι ώχρες που αναπτύχθηκαν κοντά σε υδροθερμικά αλλοιωμένους βασάλτες (pillow basalts) φέρουν μέτρια υψηλές τιμές των περισσότερων στοιχείων με τιμές Cu, Pb και Zn έως 2500, 250 και 500 mg kg⁻¹, αντίστοιχα. Επιπλέον, οι συγκεντρώσεις χαλκού στο έδαφος είναι συνήθως αυξημένες σε ακτίνα 2Km από τα μεταλλεία εξόρυξης χαλκού (Cohen et al., 2012).

2.1.3 Όξινη απορροή μεταλλείων (OAM)

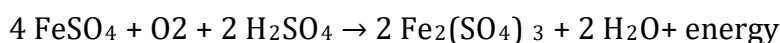
Είναι γνωστό ότι η εξορυκτική δραστηριότητα επιφέρει σοβαρές περιβαλλοντικές συνέπειες εάν δεν ληφθούν μέτρα αποκατάστασης. Η οξείδωση του πυρίτη (FeS_2 , το πιο άφθονο από όλα τα θειούχα ορυκτά) που βρίσκεται στα θειούχα μεταλλεία θεωρείται σημαντικός παράγοντας για το σχηματισμό όξινης απορροής μεταλλείων. Η OAM αποτελεί ένα σημαντικό, παγκόσμιο περιβαλλοντικό πρόβλημα και θεωρείται η κύρια αιτία της ρύπανσης των υδάτων: χαρακτηρίζεται από υψηλές συγκεντρώσεις σιδήρου και χαμηλό pH. Η συνεχής οξείδωση του πυρίτη μπορεί να απελευθερώσει προϊόντα οξείδωσης στο περιβάλλον και συγχρόνως πολλά από τα στοιχεία που εκπλένονται μπορεί να μεταφερθούν κατάντη ως διαλυμένα ελεύθερα ιόντα. Εκτός από την πιθανή υποβάθμιση και εξάντληση των υδάτινων πόρων, η ποιότητα του αέρα μπορεί δυνητικά να τεθεί σε κίνδυνο. Γενικά, η OAM θεωρείται ένα από τα πιο καλά τεκμηριωμένα προβλήματα που προκαλούνται από τις εξορυκτικές δραστηριότητες και είναι αποτέλεσμα της οξείδωσης θειούχων μεταλλευμάτων και αποβλήτων από συνδυασμό νερού, οξυγόνου και υπαρχόντων βακτηρίων (Gavriel et al., 2014).

Η ορυκτολογία των απορριμμάτων του μεταλλείου και των πετρωμάτων είναι θεμελιώδες στοιχείο για την παραγωγή OAM. Σαφέστερα, όταν εκτίθενται σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, ο πυρίτης και ο χαλκοπυρίτης, που είναι τα κυρίαρχα ορυκτά μεταλλεύματος, υπόκεινται σε καιρικές συνθήκες μέσω οξείδωσης (Thisani et al., 2020). Η οξείδωση του πυρίτη επιτυγχάνεται με αβιοτική ή βιοτική έμμεση οξείδωση. Οι αντιδράσεις πυρίτη και χαλκοπυρίτη είναι οι εξής:

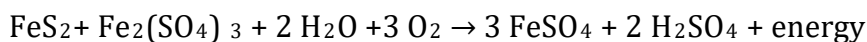
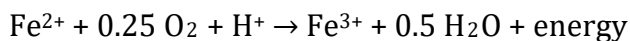
1) Οξείδωση πυρίτη



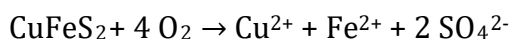
ή



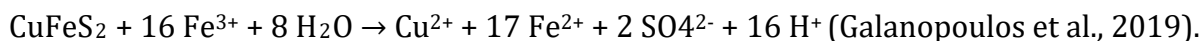
ή



2) Οξείδωση χαλκοπυρίτη



και



Τα περισσότερα εγκαταλελειμμένα μεταλλείου χαλκού στην Κύπρο καταλαμβάνονται από τεράστιους σωρούς εξορυκτικών απορριμμάτων. Αναλυτικότερα, τα απορρίμματα αυτά αποτελούνται από στείρα υλικά με ανάμεικτο μετάλλευμα χαμηλής περιεκτικότητας που δεν ήταν εκμεταλλεύσιμο την τότε εποχή. Σε συνέχεια, η έκθεση των απορριμμάτων των μεταλλείων στις περιβαλλοντικές συνθήκες και πιο συγκεκριμένα σε βροχοπτώσεις, επιδρά σημαντικά στην εμφάνιση του φαινομένου της όξινης απορροής που προκαλεί άμεσα ρύπανση σε επιφανειακά και υπόγεια ύδατα (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, 2022). Για παράδειγμα, εκτός από την πιθανή ρύπανση με κυάνιο που προέκυψε από τη λειτουργία του «πληντυρίου» στο Μιτσερό, οι σωροί τόσο των απορριμμάτων όσο και του μεταλλεύματος ενέχουν πρόσθετους κινδύνους όσον αφορά την ΟΑΜ, λόγω της οξείδωσης του πυρίτη. Η ΟΑΜ είναι ουσιαστικά όξινο νερό που περιέχει σίδηρο και θειικό και σχηματίζεται υπό φυσικές συνθήκες όταν γεωλογικά στρώματα που περιέχουν πυρίτη εκτίθενται στην ατμόσφαιρα ή σε ένα οξειδωτικό περιβάλλον. Η έκθεση τόσο στο οξυγόνο όσο και στο νερό προκαλεί αυθόρμητη οξείδωση. Το χαμηλό pH της ΟΑΜ διαλύει τοξικά στοιχεία και αυτά τα ελεύθερα ιόντα μεταφέρονται, προκαλώντας ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων με αποτέλεσμα την ανυπολόγιστη ρύπανση σημαντικά μεγάλων περιοχών και συστημάτων υπόγειων υδάτων (Lortzie et al., 2015).

Επιπρόσθετα, τα εγκαταλελειμμένα μεταλλεία αποτελούν ένα επαναλαμβανόμενο πρόβλημα για τις γειτονικές κοινότητες σε περιοχές της Μεσογείου, διότι τα απορρίμματα μεταλλείων αντιπροσωπεύουν μια σημαντική πηγή πολυμεταλλικής περιβαλλοντικής ρύπανσης. Η λεκάνη της Μεσογείου έχει αναγνωρισθεί ως η περιοχή που εκτίθεται περισσότερο στις κλιματικές και ανθρωπογενείς αλλαγές στον κόσμο. Μεταξύ των πολλών ανθρωπογενών διαταραχών, ιδίως η ανάπτυξη του οδικού δικτύου, οι βιομηχανικές δραστηριότητες, η παραγωγή ενέργειας και οι προηγούμενες και σημερινές δραστηριότητες εξόρυξης έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος της Μεσογείου (Gokcekus et al., 2003). Αφενός, οι

εγκαταλειμμένες τοποθεσίες εξόρυξης προκαλούν ιδιαίτερη ανησυχία, αφετέρου αποτελούν καλές τοποθεσίες για τη διερεύνηση των επιπτώσεων των μεταλλικών ρύπων στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία. Τα πολυμεταλλικά μεταλλεύματα για την παραγωγή Ag, Au, Cu, Fe και Pb έχουν επεξεργασθεί σε μεγάλο βαθμό στις μεσογειακές περιοχές από την προ-ρωμαϊκή εποχή. Τα Mn, Sb, Sn, W και Zn έχουν επίσης εξορυχθεί εκτενώς από την αρχή της βιομηχανικής επανάστασης στις αρχές του 19^{ου} αιώνα. Απότοκο της εξορυκτικής δραστηριότητας, παρατηρείται πλέον απόρριψη τεράστιων ποσοτήτων απορριμμάτων μεταλλείων με υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων. Εκτός από τα εξαγόμενα στοιχεία, των οποίων η τοξικότητα είναι συνήθως γνωστή, άλλα επικίνδυνα στοιχεία όπως το Cd και το As εμφανίζονται στα tailings και παραμένουν σε χωματερές. Αξίζει να σημειωθεί ότι, το μεσογειακό κλίμα χαρακτηρίζεται από ήπιους χειμώνες, ζεστά ξηρά καλοκαίρια και σπάνια με έντονες βροχοπτώσεις που προκαλούν ξαφνικές πλημμύρες. Κατά συνέπεια, το υδρολογικό καθεστώς των λεκανών απορροής της Μεσογείου ακολουθεί ένα πολύ ακανόνιστο εποχιακό μοτίβο που χαρακτηρίζεται από υψηλούς όγκους απορροής λόγω των καταιγίδων. Συνεπώς, ο τοπικός πληθυσμός εκτίθεται σε βαρέα μέταλλα λόγω των χαρακτηριστικών του μεσογειακού κλίματος, το οποίο ενισχύει την εξάπλωση της ρύπανσης από μέταλλα στον αέρα, το νερό και το έδαφος. Άρα, η OAM είναι μια σημαντική πηγή ρύπανσης στο περιβάλλον κάτω από μεσογειακά κλίματα (Doumas et al., 2018).

Εν συντομία, το ίδιο αρνητικά αντανακλά η ύπαρξη της OAM στην ρύπανση του περιβάλλοντος με την κύρια αιτία να είναι η επιταχυνόμενη οξειδωση του σιδηροπυρίτη (FeS₂) και άλλων θειούχων μεταλλευμάτων που προκύπτει από την έκθεση αυτών των ορυκτών τόσο στο οξυγόνο όσο και στο νερό, ως συνέπεια της εξόρυξης και επεξεργασίας μεταλλευμάτων και άνθρακα (Johnson & Hallberg, 2005).

2.1.4 Χλωρίδα Κύπρου και χλωρίδα σε εγκαταλελειμμένα μεταλλεία

Η γεωγραφική θέση του νησιού, που περιβάλλεται από 3 ηπείρους, εκτός από την ποικιλόμορφη γεωλογία, την τοπογραφία και τη μακρόχρονη ανθρώπινη ιστορία, έχει δημιουργήσει μια πλούσια και ξεχωριστή χλωρίδα 1649 ιθαγενών ταξινομικών κατηγοριών με μεγάλο αριθμό ενδημικών ταξινομήσεων (141 ενδημικά φυτά), τοποθετώντας το νησί ανάμεσα στα hotspots της βιοποικιλότητας στον κόσμο (Hand et al., 2019). Οι αειθαλείς σκληρόφυλλες μεσογειακές θαμνώδεις εκτάσεις καλύπτουν

περίπου το 30% του νησιού, ενώ τα δάση πεύκου και κέδρου εμφανίζονται κατά μήκος μιας υψομετρικής κλίσης που κορυφώνεται στις υψηλότερες κορυφές του ορεινού όγκου του Τροόδους (Stylianou et al., 2020).

Αξιοπρόσεκτο είναι το γεγονός ότι υπάρχει σημαντική αναγέννηση δασικών εκτάσεων στις χωματερές και στην περιοχή γύρω από το μεταλλείο του Μαθιάτη. Στην περιοχή φύονται κυρίως πεύκα (*Pinus brutia*) και θάμνοι (κυρίως *Cistus creticus*). Είναι προφανές ότι μέσα στον κρατήρα των μεταλλείων δεν αναπτύσσεται βλάστηση, ενώ στη γύρω περιοχή φυτρώνουν πεύκα. Πράγματι, πολύ λίγα διάσπαρτα πεύκα φυτρώνουν στις χωματερές, σε σημεία όπου το έδαφος είναι σχετικά πιο μαλακό (όχι πολύ συμπιεσμένο) και όχι έντονα αργιλοποιημένο. Μερικά νεαρά πεύκα αναπτύσσονται σε απόβλητα μέσα στον κρατήρα του μεταλλείου, ενώ τα πεύκα (*Pinus brutia*) (βλ. Εικόνα 1) και οι θάμνοι (*Cistus creticus*) αναπτύσσονται σε οξειδωμένη επιφάνεια μέσα στον κρατήρα του μεταλλείου. Επιπλέον, η *Agave americana* αναπτύσσεται σε απόβλητα μέσα στον κρατήρα του μεταλλείου (Stylianou et al., 2020).



Εικόνα 1: Πεύκα γύρω από κρατήρα στο εγκαταλελειμμένο μεταλλείο Β. Μαθιάτη.

2.1.5 Ανθεκτικότητα φυτών στα μεταλλεία

Αναμφισβήτητα, το περιβάλλον και η γη σε μεταλλεία και χώρους απόρριψης αποβλήτων, νοσεί. Η βιοποικιλότητα και η χλωρίδα τέτοιων περιοχών σημειώνουν μείωση με επακόλουθη απώλεια πληθυσμών και υποβάθμιση του εδάφους και στις περιοχές εξόρυξης, ο κύριος παράγοντας που εμποδίζει τη βλάστηση είναι οι χαμηλές τιμές pH και οι μεγάλες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων. Επομένως, η επαναβλάστηση και αναχλόαση των οικοσυστημάτων πρέπει να περιλαμβάνει την ορθολογική επιλογή

χρήσης φυτών με βάση την ικανότητά επιβίωσης και αναγέννησης ή αναπαραγωγής υπό αντίξοες συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές εξαρτώνται από τη φύση των tailings, τις συνθήκες έκθεσης στην επιφάνεια των απορριμμάτων και από την ικανότητα των φυτών να σταθεροποιούν τη δομή του εδάφους. Η συνήθης πρακτική για την αναβλάστηση συνεπάγεται με την επιλογή ανθεκτικών στην ξηρασία, ταχέως αναπτυσσόμενων καλλιεργειών ή φυτικών ειδών που μπορούν να αναπτυχθούν σε εδάφη με έλλειψη θρεπτικών συστατικών (Cetinkaya & Sozen, 2011). Επιπρόσθετα, τα επιλεγμένα φυτά πρέπει να είναι εύκολο να εγκατασταθούν, να παρουσιάζουν ταχεία ανάπτυξη και να έχουν πυκνούς θόλους και εκτεταμένα ριζικά συστήματα. Πέρα από αυτό, τα αυτόχθονα είδη είναι προτιμότερα από τα ξενικά επειδή καθώς πιθανόν να ταιριάζουν αποδοτικότερα σε ένα πλήρως λειτουργικό οικοσύστημα και είναι κλιματικά προσαρμοσμένα. Έχει προταθεί ότι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη χλωρίδα όπως τα είδη χόρτου είναι αποτελεσματική για τη αποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών. Τα χόρτα έχουν ινώδη ριζικά συστήματα που μπορούν να επιβραδύνουν τη διάβρωση και ως αποτέλεσμα παράγουν ένα στρώμα οργανικής ύλης, σταθεροποιούν το έδαφος, διατηρούν την υγρασία του εδάφους και μπορεί να ανταγωνίζονται ζιζάνια και χωροκατακτητικά είδη (Mingorance et al., 2017). Συμπληρωματικά, τα φυτά που μπορούν να πολλαπλασιαστούν παρουσία υψηλών επιπέδων μετάλλων στο έδαφος, ονομάζονται μεταλλόφυτα και έχουν αναπτύξει 2 κύριες στρατηγικές για την πρόληψη των τοξικών επιδράσεων των μετάλλων στα εδάφη: αποκλεισμό ή συσσώρευση. Αναλυτικότερα, ο αποκλεισμός είναι ένας μηχανισμός που βασίζεται στην πρόσληψη και συσσώρευση μετάλλων μόνο στις ρίζες σε συνδυασμό με τον περιορισμό της μετατόπισης μετάλλου από τις ρίζες στους βλαστούς για τη διατήρηση χαμηλής συγκέντρωσης μετάλλου στους βλαστούς. Η συσσώρευση αναφέρεται στην ικανότητα των φυτών να συσσωρεύουν μέταλλα. Οι συσσωρευτές μετάλλων είναι φυτά που συγκεντρώνουν μέταλλα στους υπέργειους ιστούς και η περιεκτικότητά τους σε μέταλλα είναι υψηλότερη από τις συγκεντρώσεις που μετρούνται στο έδαφος (Doumas et al., 2018).

Τα απορρίμματα μεταλλείων αποτελούν ένα εξαιρετικά στρεσογόνο περιβάλλον λόγω των δυσμενών εδαφικών συνθηκών όπως οι ακραίες τιμές pH, η έλλειψη οργανικής ύλης και θρεπτικών ουσιών και η υψηλή περιεκτικότητα σε μέταλλα. Αφενός, η βλάστηση του *Medicago sativa* αναστέλλεται πλήρως σε ρυπασμένα εδάφη αφετέρου η ενσωμάτωση ενός εδαφοβελτιωτικού μέσου που προμηθεύει οργανική ύλη και θρεπτικά συστατικά σε

εύκολα διαθέσιμες μορφές για τα φυτά επιτρέπει τη βλάστηση του *Medicago*. Το κομπόστ αυξάνει το pH του εδάφους, καθιστώντας τα θρεπτικά συστατικά πιο διαθέσιμα, με αποτέλεσμα μια θετική επίδραση στις βιοχημικές ιδιότητες του εδάφους λόγω της παροχής ασταθούς οργανικής ύλης που διεγείρει την ανάπτυξη του μικροβιακού πληθυσμού του εδάφους και την πιθανή δραστηριότητα στο έδαφος. Κατά συνέπεια, παράγοντες που σχετίζονται με την υγεία του εδάφους κυριαρχούν έναντι της υψηλής περιεκτικότητας σε μέταλλα σε σχέση με την ανάπτυξη των φυτών (Mingorance et al., 2017; Marchand et al., 2016).

Για παράδειγμα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης των Monaci et al. (2011), το *Erica andevalensis* έχει την ικανότητα να αναπτύσσεται σε υποστρώματα με πολύ υψηλές συγκεντρώσεις As, Cu, Fe και Pb (έως 4114, 1050, 71900 και 15614 $\mu\text{g/g}$ ξηρού βάρους, αντίστοιχα), με πολύ χαμηλή διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών και με τιμές pH που κυμαίνονται από 3,3 έως 4,9. Σε αυτές τις επίπονες εδαφικές συνθήκες το *E. andevalensis*, στο συγκεκριμένο πείραμα απορρόφησε επιλεκτικά τα βαρέα μέταλλα, μετατόπισε βασικά θρεπτικά συστατικά και απέκλεισε δυνητικά φυτοτοξικά στοιχεία, τα οποία είχαν συσσωρευτεί στην επιδερμίδα της ρίζας. Οι συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων στα εναέρια μέρη του *E. andevalensis* από την περιοχή εξόρυξης Riotinto ήταν στο φυσιολογικό εύρος για τα φυτά. Συμπερασματικά, στην περιοχή Riotinto της Ισπανίας όπου έλαβε μέρος η έρευνα, το *E. andevalensis* μπορεί να ανεχθεί ευρύ φάσμα συγκεντρώσεων pH και τοξικών στοιχείων σε περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονταν κυρίως από πολύ χαμηλή διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών.

Επιπρόσθετα, η παραγωγή της OAM λόγω της παρουσίας θειούχου και πυριτικού μεταλλεύματος σε εγκαταλελειμμένα μεταλλεία, συνδέεται με τη μεταφορά τοξικών επιδράσεων και διασποράς μετάλλων στις γύρω περιοχές των εγκαταλελειμμένων μεταλλείων. Μια διαδικασία για την αποκατάσταση του οικοσυστήματος είναι η φυσική αναβλάστηση. Ωστόσο, τα φυτά που αναπτύσσονται σε τέτοιες περιοχές βρίσκονται υπό συγκεκριμένες πιέσεις όπως χαμηλή τιμή pH, χαμηλή οργανική ύλη, υψηλά επίπεδα μετάλλων, φτωχή παροχή θρεπτικών στοιχείων, που περιορίζουν την εγκατάσταση πυκνών φυτικών κοινοτήτων (Stylianou et al., 2020). Το γεγονός του περιορισμένου αριθμού δέντρων σε σημεία των σωρών των απορριμμάτων αποδίδεται σε διάφορους παράγοντες: (1) η αυξημένη συμπίεση των απορριμμάτων, (2) το χαμηλό πορώδες κυρίως λόγω της παρουσίας ορυκτών αργίλου, (3) τα ισχυρά πυριτωμένα και

αργιλοποιημένα απόβλητα, (4) η αυξημένη βιοδιαθεσιμότητα των μετάλλων λόγω της οξείδωσης των αποβλήτων, (5) οι απότομες κλίσεις και η αστάθεια των κλίσεων των χωματερών και (6) η χαμηλή διαθεσιμότητα ηλιακού φωτός σε ορισμένες τμήματα των εγκαταλελειμμένων μεταλλείων. Οι καιρικές συνθήκες και η διάβρωση είναι ένα κρίσιμο πρόβλημα σε τέτοιες περιοχές, οι οποίες λόγω των κλιματικών συνθηκών υποφέρουν από ξηρασίες. Στον αντίποδα, κάποια αυτόχθονα φυτά μπορούν να αναπτυχθούν σε τέτοιες συνθήκες σε χωματερές και σωρούς απορριμμάτων με χαμηλό pH και αυξημένη συγκέντρωση μετάλλων. Αυτά τα φυτά είναι κυρίως οξεόφιλα φυτά και δέντρα όπως πεύκα (*Pinus brutia*) και θάμνοι (*Cistus creticus*). Αν και η ακακία είναι ανεκτική σε αυτές τις συνθήκες, η χρήση αυτού του φυτού για φυτοαποκατάσταση δεν ενδείκνυται, καθώς είναι ένα χωροκατακτητικό μη ιθαγενές είδος. Από βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις, άλλα αυτοφυή είδη που βρέθηκαν να υπάρχουν σε αυτές τις περιβαλλοντικές συνθήκες είναι *Pistacia lentiscus*, *Pistacia terebinthus*, *Inula viscosa*, *Capparis spinosa L.*, *Ziziphus lotus* που είναι ανεκτικά στο εγκαταλελειμμένο περιβάλλον των μεταλλείων (Stylianou et al., 2020).

2.2 Ιστορική αναδρομή

Ιστορικά, η Κύπρος ήταν γνωστή σε όλο τον κόσμο για την παραγωγή χαλκού. Ο χαλκός στην Κύπρο υφίσταται σε κοιτάσματα θειούχου μεταλλεύματος, τα οποία βρίσκονται κυρίως στον Οφιόλιθου του Τροόδους. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκαν πολυάριθμα μεταλλεία σε περιοχές όπου βρίσκονταν κοιτάσματα θειούχου. Υπάρχουν ακόμη άφθονα στοιχεία που αποδεικνύουν ότι το νησί ήταν μια σημαντική πηγή μετάλλων, όχι μόνο κατά τους Ρωμαϊκούς και Φοινικικούς χρόνους, αλλά και κατά την Εποχή του Χαλκού, πολλούς αιώνες νωρίτερα. Μολαταύτα, εκτός από εκτεταμένες χωματερές σκωρίας, υπάρχουν υπολείμματα αρχαίων επιφανειακών και υπόγειων εργασιών με τη μορφή φρεατίων, στοών, χωματερών, ξυλείας, λαμπτήρων πετρελαίου, θραυσμάτων κεραμικής (Gavriel et al., 2014).

Η Κύπρος έχει βιώσει μια μακρά ιστορία ανθρώπινου πολιτισμού, ξεκινώντας από την πρώιμη νεολιθική περίοδο. Η εξόρυξη χαλκού έχει διεξαχθεί σε διάφορες περιόδους από την Ύστερη Εποχή του Χαλκού έως τη σύγχρονη εποχή. Οι σύγχρονες ανοιχτές εργασίες εξόρυξης έχουν δημιουργήσει περίπου 200 Mt απορριμμάτων και σωρούς απορριμμάτων. Επιπρόσθετα, το νησί αποψιλώθηκε πάνω από 10 φορές μεταξύ 2000

π.Χ. και 500 μ.Χ. για να τροφοδοτήσει τους φούρνους που χρησιμοποιούνταν για την παραγωγή του Cu, ενώ στη Σκουριώτισσα υπάρχουν σωροί σκωρίας που χρονολογούνται από τη ρωμαϊκή εποχή. Λόγω έλλειψης νομοθεσίας στο παρελθόν, δεν ελήφθησαν μέτρα αποκατάστασης μετά τη διακοπή της εξορυκτικής δραστηριότητας. Ως αποτέλεσμα, οι περιβαλλοντικές συνέπειες από την εξόρυξη εξακολουθούν να υπάρχουν στο νησί της Κύπρου. Τα κοιτάσματα θειούχου της Κύπρου εξορύσσονταν σε μεγάλο βαθμό με ανοιχτές μεθόδους, αν και υπήρχαν επίσης ορισμένες υπόγειες εργασίες και οι εξορυκτικές δραστηριότητες τα τελευταία 100 χρόνια έχουν αφήσει πάνω από 200 εκατομμύρια τόνους αποβλήτων εξόρυξης συγκεντρωμένους γύρω από εγκαταλελειμμένα ορυχεία (Gavriel et al., 2014).

2.3 Θεωρητικό πλαίσιο

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται θεωρητικές και εννοιολογικές προσεγγίσεις και πλαίσια μέσα στα οποία γίνεται κατανοητό το αντικείμενο της μελέτης.

2.3.1 Αποκατάσταση

Η ρύπανση του εδάφους αποτελεί ένα παγκόσμιο περιβαλλοντικό πρόβλημα και πολλές προσπάθειες έχουν γίνει για την εξεύρεση αποτελεσματικών μεθόδων αποκατάστασης την τελευταία δεκαετία. Η ρύπανση του εδάφους από βαρέα μέταλλα και οργανικές ενώσεις, έχει προκαλέσει μεγάλη ανησυχία και ανυπολόγιστες συνέπειες στο περιβάλλον. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι υπάρχουν μικτά ρυπασμένα εδάφη, τα οποία πιθανόν να οδηγήσουν σε πρόσθετα προβλήματα και συνεπώς σε πρόσθετο κόστος αποκατάστασης. Επομένως, η αποκατάσταση αυτών των τοποθεσιών μπορεί να καταστεί πολύ δύσκολη (Zhang et al., 2013).

Με την ανάπτυξη της εκβιομηχάνισης και της αστικοποίησης, η αφθονία των βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον έχει αυξηθεί δραματικά τις τελευταίες δεκαετίες, γεγονός που εγείρει σημαντικές ανησυχίες σε όλο τον κόσμο. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να ληφθούν μέτρα αποκατάστασης για να αποτραπεί η είσοδος βαρέων μετάλλων σε χερσαία, ατμοσφαιρικά και υδάτινα περιβάλλοντα και να μετριαστεί η συνολική έκταση της ρυπασμένης γης. Μέχρι στιγμής, αναπτύχθηκε μια ποικιλία προσεγγίσεων αποκατάστασης για την ανάκτηση εδάφους ρυπασμένου με βαρέα μέταλλα. Αυτές οι

πρακτικές βασίζονται κυρίως σε μηχανικές ή φυσικοχημικές τεχνικές, όπως η αποτέφρωση εδάφους, η εκσκαφή και η υγειονομική ταφή, το πλύσιμο του εδάφους, η στερεοποίηση και η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου. Ωστόσο, υπάρχουν περιορισμοί που προκύπτουν από την εφαρμογή αυτών των φυσικοχημικών προσεγγίσεων, όπως υψηλό κόστος, αναποτελεσματικότητα όταν υπάρχουν προσμείξεις σε χαμηλές συγκεντρώσεις, μη αναστρέψιμες αλλαγές στις φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητες των εδαφών που οδηγούν στην υποβάθμιση του εδαφικού οικοσυστήματος και στην εισαγωγή δευτερογενών ρύπων (Hashim et al., 2011). Απότοκο των πιο πάνω, εγείρεται η ανάγκη για ανάπτυξη οικονομικά αποδοτικών, αποτελεσματικών και φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών αποκατάστασης για την ανάκτηση του εδάφους ρυπασμένου με βαρέα μέταλλα. Ακριβέστερα, η φυτοαποκατάσταση αποτελεί μια φυτική προσέγγιση η οποία περιλαμβάνει τη χρήση φυτών για την εξαγωγή και την απομάκρυνση στοιχειωδών ρύπων ή τη μείωση της βιοδιαθεσιμότητάς τους στο έδαφος. Τα πλεονεκτήματα από τη χρήση φυτοαποκατάστασης περιλαμβάνουν:

- 1) Οικονομικά εφικτή μέθοδος (η φυτοεξυγίανση είναι ένα αυτότροφο σύστημα που τροφοδοτείται από ηλιακή ενέργεια, επομένως είναι απλό στη διαχείριση και το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης είναι χαμηλό).
- 2) Φιλική πρακτική προς το περιβάλλον αφού μπορεί να μειώσει την έκθεση των ρύπων στο περιβάλλον και το οικοσύστημα.
- 3) Δυνατότητα εφαρμογής σε πεδίο μεγάλης κλίμακας.
- 4) Αποτρέπει τη διάβρωση και την έκπλυση μετάλλων μέσω της σταθεροποίησης των βαρέων μετάλλων, μειώνοντας ο κίνδυνος εξάπλωσης των ρύπων.
- 5) Βελτιώνει τη γονιμότητα του εδάφους απελευθερώνοντας διάφορες οργανικές ουσίες στο έδαφος.
- 6) Τα επιλεγμένα είδη φυτών με δυνατότητα φυτοαποκατάστασης έχουν λίγους περιορισμούς όπως η αργή ανάπτυξη, η οποία περιορίζει τις γρήγορες και μεγάλης κλίμακας εφαρμογές αυτών των φυτών και την προσαρμογή σε μια ποικιλία περιβαλλοντικών συνθηκών όπως εδάφη φτωχά σε θρεπτικά συστατικά (Yan et al., 2020).

Η φυτοσταθεροποίηση, ένας κλάδος της φυτοαποκατάστασης, είναι μια *in situ* διαδικασία που χαρακτηρίζεται από τροποποιήσεις του εδάφους και χρήση φυτών ανθεκτικών σε βαρέα μέταλλα. Σκοπός της είναι η προώθηση της αναβλάστησης του

εδάφους, δημιουργώντας ένα όριο που μπορεί να μειώσει τη μετανάστευση μετάλλων στον αέρα, στα επιφανειακά και υπόγεια νερά και μέσω του εδάφους, μειώνοντας την τοξικότητά τους (Novo & Gonzalez, 2014). Επίσης, η διαδικασία της φυτοσταθεροποίησης έχει ως αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση των μεταλλικών ρύπων στα απορρίμματα μεταλλείων και τη μείωση της μεταφοράς των μετάλλων από το έδαφος στα φυτά. Στην πραγματικότητα, τα φυτά που χρησιμοποιούνται για τέτοιες διαδικασίες διαθέτουν μηχανισμούς συσσώρευσης και ανοχής ή αντοχής υψηλών επιπέδων μετάλλων σε ρυπασμένα εδάφη (Diaconu et al., 2020). Ωστόσο, τα φυτά πιθανόν να παρουσιάσουν τοξικότητα λόγω της έλλειψης υγρασίας στο έδαφος, των χαμηλών συγκεντρώσεων θρεπτικών ουσιών και της υψηλής συγκέντρωσης τοξικών βαρέων μετάλλων στα tailings. Συμπληρωματικά, η ροή των ρύπων στο περιβάλλον και στα ενδιαίτηματα βλάπτει τη γη και τους φυσικούς πόρους και παράλληλα, ευαίσθητα και ευάλωτα είδη φυτών τείνουν προς εξαφάνιση. Η μακροπρόθεσμη συνέχιση της μη λήψης αποτελεσματικών μέτρων αποκατάστασης θα διαταράξει την ισορροπία των φυτικών ειδών και ως εκ τούτου θα υπάρξουν αρνητικές συνέπειες στη συχνότητα εμφάνισης και στην κατανομή των φυτικών ειδών στα ρυπασμένα περιβάλλοντα. Επομένως, η βλάστηση μπορεί να είναι κατάλληλος δείκτης για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των εξορυκτικών δραστηριοτήτων. Παρόλ' αυτά, οι επιβλαβείς καταστάσεις που αντιμετωπίζουν τα φυτικά είδη που φυτρώνουν σε ρυπασμένα εδάφη παρουσιάζουν χαρακτηριστικά ανοχής και αντοχής. Ενδεικτικά, στο εγκαταλελειμμένο ορυχείο São Domingos, φυτά και θάμνοι όπως *Erica australis*, *Erica andevalensis*, *Agrostis castellana*, *Agrostis delicatula*, *Rumex induratus*, *Genista hirsuta* και *Daucus carota* ήταν τα πιο άφθονα ανεκτικά είδη φυτών της περιοχής ενδιαφέροντος (Anawar et al., 2013).

Συμπληρωματικά, λόγω της ικανότητας των φυτών να αναπτύσσονται σε περιβάλλοντα πλούσια σε μέταλλα και να παρουσιάζουν χαρακτηριστικά αντοχής και ανοχής, έχουν αναπτυχθεί πολλές πράσινες τεχνολογίες που ομαδοποιούνται υπό τον όρο «φυτοεξυγίανση», που αναφέρεται στη διαδικασία απορρύπανσης του εδάφους με τη χρήση φυτών για την απορρόφηση μεταλλικών ρύπων. Αυτό μπορεί να λάβει 2 κύριες μορφές, τη φυτοεξαγωγή (τα μέταλλα συγκεντρώνονται στα υπέργεια μέρη των φυτών) ή τη φυτοσταθεροποίηση (η κινητικότητα των μετάλλων περιορίζεται). Επιπλέον, διάφοροι παράγοντες συμπεριλαμβανομένης της ικανότητας των ριζών των φυτών να φτάσουν σε ένα ορισμένο βάθος στο έδαφος, ο βαθμός συσσώρευσης των μετάλλων

στους βλαστούς και η πιθανότητα απόκτησης υψηλής βιομάζας σε ρυπασμένο έδαφος, επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της φυτοεξαγωγής. Αντίθετα, η φυτοσταθεροποίηση σημαίνει ότι τα μεταλλικά ρυπασμένα εδάφη ακινητοποιούνται μέσω της απορρόφησης των βαρέων μετάλλων από τις ρίζες, της προσρόφησης στην επιφάνεια της ρίζας και της καθίζησης στην περιοχή των ριζών των φυτών. Η φυτοσταθεροποίηση όμως, δεν μπορεί να θεωρηθεί ως μέθοδος απορρύπανσης, επειδή οι ρύποι εξακολουθούν να υπάρχουν στα εδάφη σε διαφορετικές μορφές. Συνεπώς, φυτά που είναι ανεκτικά και αποκλείουν ορισμένα μέταλλα διαδραματίζουν θεμελιώδη ρόλο στις στρατηγικές φυτοσταθεροποίησης που έχουν σχεδιαστεί για τα απορρίμματα μεταλλείων (Doumas et al., 2018). Συγχρόνως, η φυτοδιαμόρφωση είναι μια πιθανή λύση για την αποκατάσταση των εγκαταλειμμένων θειούχων μεταλλείων. Η απομάκρυνση των απορριμμάτων είναι δαπανηρή και ενδέχεται να προκαλέσει άλλα προβλήματα, όπως σκόνη ή κατολισθήσεις. Ωστόσο, κάποια επεξεργασία των tailings που είναι άγονα είναι απαραίτητη πριν ακολουθηθεί η διαδικασία της επαναφύτευσης (Stylianou et al., 2020).

Μια άλλη συχνά χρησιμοποιούμενη προσέγγιση για την αξιολόγηση των οικολογικών επιπτώσεων των ρυπασμένων περιοχών με ενδεχόμενη αποκατάσταση είναι η παρακολούθηση πεδίου. Ειδικότερα, η παρακολούθηση πεδίου περιλαμβάνει δομικές και λειτουργικές μετρήσεις των ζώντων οργανισμών και μερικές φορές πραγματοποιούνται *in situ* μελέτες. Στο χερσαίο τμήμα των ρυπασμένων περιοχών με βαρέα μέταλλα, προσδιορίζονται δομικές παράμετροι όπως η πυκνότητα των φυτών, τα ασπόνδυλα του εδάφους και η βιομάζα. Οι δομικοί δείκτες περιλαμβάνουν τη συνολική αφθονία, τον πλούτο των ταξινομικών κατηγοριών, τους δείκτες ποικιλότητας και διάφορες αναλογίες διαφορετικών ταξινομικών ομάδων. Επιπλέον, οι δοκιμές ολόκληρων λυμάτων (αξιολόγηση δειγμάτων νερού ή των εκχυλισμάτων τους) και η κατευθυνόμενη από βιοδοκιμή ταυτοποίηση τοξικών ουσιών έχουν αποδειχθεί χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση ρυπασμένων τοποθεσιών (Fent, 2004). Συμπληρωματικά, υπάρχουν εναλλακτικές στρατηγικές για την απόρριψη των απορριμμάτων μεταλλείων, οι οποίες συνεπάγονται με αποφυγή της επαφής των tailings σε οξυγόνο και νερό. Σαφέστερα, οι στρατηγικές αυτές περιλαμβάνουν ταφή σε θαλάμους σφραγισμένους με πηλό και αποθήκευση των απορριμμάτων ως ιζήματα σε λίμνες και φράγματα («tailings dam»). Εντούτοις, η καταστροφική αστοχία στην κατασκευή των τοίχων αντιστήριξης στα φράγματα έχει περιστασιακά οδηγήσει σε σοβαρή ρύπανση των γύρω περιοχών, με πιο

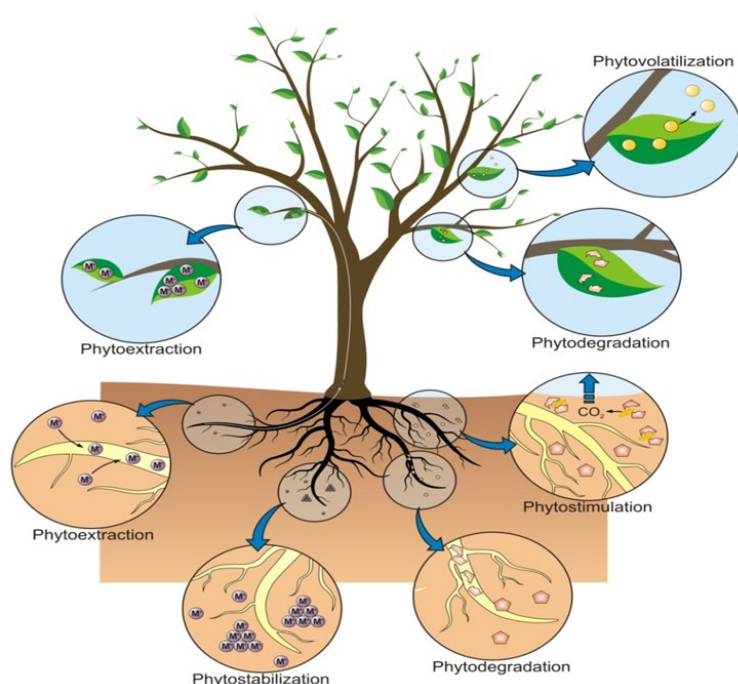
διαβόητη την ρύπανση στα ορυχεία Aznacollar-Los Frailes στη νότια Ισπανία, που οδήγησε στην απελευθέρωση περίπου 2 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων θειούχων απορριμμάτων και 4 εκατομμυρίων κυβικά μέτρα όξινο νερού (Johnson, 2003). Επίσης, οι τοποθεσίες απορριμμάτων εξόρυξης σε ξηρά και ημίξηρα περιβάλλοντα παραμένουν άγονες από βλάστηση μετά την εναπόθεση tailings λόγω ενός συνδυασμού παραγόντων όπως η τοξικότητα μετάλλων, το όξινο pH, η κακή δομή και ποιότητα του εδάφους, τα χαμηλά επίπεδα θρεπτικών ουσιών και οι πιεσμένες μικροβιακές κοινότητες. Ένας τρόπος για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί στην εγκατάσταση των φυτών είναι η προσθήκη υλικού κομποστοποίησης που δρα άμεσα για να αυξήσει το pH, να μετριάσει την τοξικότητα των μετάλλων, να αυξήσει την ικανότητα συγκράτησης νερού (SWHC) και να προσθέσει τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά στο έδαφος (Grandlic et al., 2009).

Εν κατακλείδι, λόγω του συνεχώς αυξανόμενου αριθμού τοποθεσιών υψηλής ρύπανσης από μέταλλα παγκοσμίως, σε συνδυασμό με την οικονομικά απαγορευτική αποκατάστασή τους με τη χρήση σύγχρονων τεχνικών μηχανικού τύπου, η χρήση και φύτευση φυτών σε κλίμακα πεδίου έχει πλέον αποδειχθεί ότι αποτελεί πολλά υποσχόμενη πρακτική στη φυτοαποκατάσταση του εδάφους. Επιπρόσθετα, η πρακτική προσέγγιση της φυσικής αποκατάστασης του ρυπασμένου περιβάλλοντος μπορεί να εφαρμοστεί σε εδάφη με υψηλή ρύπανση από μέταλλα και επιπλέον υποστηρίζεται ότι η ανθρώπινη παρέμβαση όπως η προσθήκη τροποποιήσεων στο έδαφος έχει την ικανότητα να προάγει την μείωση των βαρέων μετάλλων στο έδαφος (Adriano et al., 2004).

Συνοψίζοντας, για τη διαχείριση-αποκατάσταση χώρων ρυπασμένων από βαρέα μέταλλα έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικές μέθοδοι τα τελευταία χρόνια όπου γίνεται χρήση φυτών ως μέσο αποκατάστασης. Παραδείγματα τέτοιων μεθόδων φαίνονται στον Πίνακα 1 και στο Σχήμα 2.

Πίνακας 1: Μέθοδοι φυτοαποκατάστασης εδαφών.

Φυτοσυσσώρευση (Phytoextraction)	Στηρίζεται στην καλλιέργεια φυτών (συσσωρευτές) στο ρυπασμένο έδαφος, τα οποία προσλαμβάνουν βαρέα μέταλλα και τα αποθηκεύουν στους ιστούς τους (Garbisu & Alkorta, 2001).
Φυτοσταθεροποίηση (phytostabilization)	Δεν γίνεται απομάκρυνση του μετάλλου από την περιοχή αλλά μείωση της επικινδυνότητάς του για το περιβάλλον με τη σταθεροποίησή του στην περιοχή της ρίζας, είτε με πρόσληψη ή προσρόφηση στις ρίζες είτε επεμβαίνοντας στη βιοδιαθεσιμότητά του με ουσίες που εκκρίνει το φυτό από τις ρίζες του (Bolan et al., 2011).
Ριζοδιήθηση (Rhizofiltration) ή Φυτοδιήθηση	Η προσρόφηση ή η καταβύθιση πάνω στις ρίζες ή η απορρόφηση από τις ρίζες, των ρύπων που βρίσκονται στο διάλυμα που περιβάλλει τη ζώνη του ριζικού συστήματος (Srivastava et al., 2021).
Φυτοεξάτμιση (Phytovolatilization)	Η πρόσληψη πτητικών ή μη πτητικών ρύπων από το έδαφος, μετατροπή τους σε πτητική μορφή και μεταφορά τους στην ατμόσφαιρα μέσω της διαπνοής (Limmer & Burken, 2016)
Φυτοαποικοδόμηση (Phytodegradation)	Η αποδόμηση οργανικών ρύπων απευθείας, μέσω της απελευθέρωσης ενζύμων από τις ρίζες ή μέσω μεταβολικών δραστηριοτήτων εντός των φυτικών ιστών (Newman & Reynolds, 2004).



Σχήμα 2. Μέθοδοι φυτοαποκατάστασης εδαφών (<https://www.environmentalgovernance.org/>)

2.3.2 Ποιότητα εδάφους

Εννοιολογικά, η ποιότητα του εδάφους ορίζεται ως η ικανότητα του εδάφους να λειτουργεί εντός των ορίων του οικοσυστήματος για τη διατήρηση της βιολογικής παραγωγικότητας, τη διατήρηση της ποιότητας του περιβάλλοντος και την προαγωγή της υγείας των φυτών και των ζώων (Benerjee et al., 1997). Η βιολογία του εδάφους είναι ένα σημαντικό συστατικό της ποιότητας του εδάφους και αποτελεί τον καταλυτικό παράγοντα που είναι υπεύθυνος για πολλούς από τους μετασχηματισμούς που συμβαίνουν στο έδαφος, κυρίως τις αντιδράσεις που εμπλέκονται στον κύκλο των θρεπτικών ουσιών. Επομένως, είναι ουσιαστικό να αξιολογηθούν οι βιολογικές πτυχές της ποιότητας του εδάφους στο πλαίσιο της συνολικής λειτουργίας του συστήματος (Sheoran et al., 2010).

Δεδομένων των συχνά μεγάλων και πολύπλοκων μικροβιωμάτων τους, τα εδάφη μπορούν να θεωρηθούν ως hotspots για τη μικροβιακή ποικιλότητα στη Γη. Ως απόρροια, τα εδάφη παρέχουν μεγάλο αριθμό βιολογικών υπηρεσιών απαραίτητων για την διατήρηση της ζωής, οι οποίες θεωρούνται ως λειτουργίες υποστήριξης της ζωής. Αυτές οι λειτουργίες περιλαμβάνουν την παροχή «εύφορου - γόνιμου εδάφους», την διατήρηση φυσικής ποικιλότητας φυτών, την προστασία του πόσιμου νερού με το φιλτράρισμα και την υποβάθμιση των ρύπων στο έδαφος πριν εισέλθουν στο υπόγειο υδάτινο σώμα, την προστασία από τη διάβρωση και τέλος την ικανότητα των εδαφών να λειτουργούν ως δεξαμενές απορρόφησης και αποθήκευσης ατμοσφαιρικού CO₂. Εντούτοις, αυτή η πολυλειτουργικότητα του εδάφους κινδυνεύει σε μεγάλο βαθμό ως αποτέλεσμα της συνεχιζόμενης παγκόσμιας αλλαγής. Οι αυξημένες εντάσεις χρήσης γης, η εξόρυξη και η ρύπανση θέτουν πρόσθετες προκλήσεις στα εδάφη (Schloter et al., 2018).

2.3.3 Απορρίμματα μεταλλείων / Mine Tailings

Τα απορρίμματα μεταλλείων ορίζονται ως τα υλικά που απομένουν μετά την εξόρυξη και τον εμπλουτισμό των μεταλλευμάτων. Τα απορρίμματα χαρακτηρίζονται από υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων όπως το αρσενικό, το κάδμιο, ο χαλκός, το μαγγάνιο, ο μόλυβδος και ο ψευδάργυρος (Burckhard et al., 1995). Επιπλέον, τα απορρίμματα δεν περιέχουν οργανική ύλη ή μακροθρεπτικά συστατικά και συνήθως παρουσιάζουν όξινο pH, αν και ορισμένα απορρίμματα αναφέρονται ως αλκαλικά (Mendez & Maier, 2008). Οι σωροί απορριμμάτων χαρακτηρίζονται από μεγάλη ετερογένεια και ενδέχεται να

παρουσιάσουν πολύ διαφορετικά χημικά χαρακτηριστικά σε σχετικά μικρές αποστάσεις. Τόσο οι σωροί απορριμμάτων από εξόρυξη άνθρακα όσο και ορυκτών που περιέχουν σημαντικές ποσότητες θειούχων, πιθανόν να αναπτύξουν σχετικά υψηλές θερμοκρασίες ως αποτέλεσμα αντιδράσεων εξώθερμης οξειδωσης (Johnson, 2003).

Αναμφίβολα, μία από τις κύριες πηγές ρύπων του εδάφους είναι τα απορρίμματα μεταλλείων που αφήνουν επί τόπου οι φορείς εκμετάλλευσης των μεταλλευμάτων του μεταλλείου. Για παράδειγμα, τα απόβλητα μεταλλείων στα νοτιοδυτικά της περιοχής εξόρυξης της Σαρδηνίας έχουν υπολογιστεί σε περίπου 45 εκατομμύρια m³. Το κέντρο διύλισης "Lavadero Roberto" στην Καρθαγένη (NA Ισπανία), που ήταν η μεγαλύτερη μονάδα διύλισης στην Ευρώπη, έχει αποβάλει περισσότερους από 57 εκατομμύρια τόνους απορριμμάτων στη Μεσόγειο Θάλασσα από το 1957 έως 1990, γεμίζοντας πλήρως τον κόλπο του Πόρτμαν που θεωρείται ως ο πιο ρυπασμένος κόλπος σε ολόκληρη τη Μεσόγειο (Doumas et al., 2018).

2.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Σύμφωνα με τους Ai et al. (2020), η αποκατάσταση των απορριμμάτων χρυσού είναι συχνά δύσκολη λόγω της εξαιρετικά άγονης φύσης τους και των υψηλών συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων. Τα απορρίμματα μεταλλείων χαρακτηρίζονται από σωματίδια μεγέθους άμμου, με αυξημένες συγκεντρώσεις μετάλλων, ισχυρή οξίνιση ή αλκαλοποίηση, χαμηλή οργανική ύλη, κακή γονιμότητα και χαμηλή μικροβιακή ποικιλότητα και βιομάζα. Αναφέρεται ότι τα απορρίμματα μεταλλείων οδηγούν σε υψηλή υποβάθμιση της περιβαλλοντικής ποιότητας και στην καταστροφή των οικοσυστημάτων και της βιοποικιλότητας επηρεάζοντας έτσι την κοινωνική ανάπτυξη. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να αποκατασταθούν τα απορρίμματα μεταλλείων. Συμπληρωματικά, ερευνήθηκαν σε πείραμα με γλάστρες τα φυτά *Medicago sativa L.* (μηδική), *Lolium perenne Linn.* και *Festuca arundinacea* στα απορρίμματα χρυσού τροποποιημένο με 0%, 5% και 10% (βάρος/βάρος) με κομπόστ με σκοπό την εύρεση της βιοδιαθεσιμότητας ιχνοστοιχείων και τη δομή της κοινότητας των μικροοργανισμών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η φυτική βιομάζα και ο άνθρακας της μικροβιακής βιομάζας στα απορρίμματα αυξήθηκαν σημαντικά μετά την επεξεργασία με κομπόστ. Επιπλέον, το διαθέσιμο N και το διαθέσιμο P και η διαθεσιμότητα του Zn μειώθηκαν αισθητά με την ανάπτυξη του *Medicago sativa L.* και *Lolium perenne Linn.* Διαπιστώθηκε επίσης ότι, η

αύξηση της μηδικής είχε θετικές επιπτώσεις στον πλούτο της βακτηριακής κοινότητας των απορριμμάτων με σχετική αύξηση της αφθονίας των Proteobacteria και Ascomycota. Προκύπτει λοιπόν αβίαστα το συμπέρασμα ότι η εφαρμογή κομπόστ θα μπορούσε να βελτιώσει σημαντικά το περιβάλλον των απορριμμάτων για την ανάπτυξη των φυτών.

Η έρευνα των Gavriel et al. (2014) στο εγκαταλελειμμένο μεταλλείο ανοιχτού τύπου Κοκκινοπεζούλας στο Μιτσερό, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η περιβαλλοντική ρύπανση της περιοχής μεταφέρθηκε τόσο από μηχανικούς, όσο από χημικούς μηχανισμούς. Το συμπέρασμα βασίστηκε μετά από συλλογή δειγμάτων νερού και αφού αναλύθηκε το pH και η περιεκτικότητα τους σε μέταλλα. Το αποτέλεσμα των δειγμάτων, έδειξε χαμηλό pH και υψηλή περιεκτικότητα σε μέταλλα. Επιπρόσθετα, συλλέχθηκαν δείγματα εδάφους από 32 τοποθεσίες οι οποίες επιλέχθηκαν με βάση την γεωλογία, την τοπογραφία της περιοχής, την ορυκτολογία και τέλος σύμφωνα με την ένταση της μεταβολής των απορριμμάτων του μεταλλείου. Συμπερασματικά, φάνηκε ότι στην περιοχή του Μιτσερού παρατηρείται το φαινόμενο της όξινης απορροής το οποίο επιβεβαιώνεται από το χαμηλό pH των δειγμάτων εδάφους και από την υψηλή περιεκτικότητα τους σε μέταλλα. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι η μεταβλητότητα του όγκου του νερού της λίμνης του κρατήρα παίζει σημαντικό ρόλο στις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων με 2 τρόπους: η έντονη εξάτμιση κατά τους καλοκαιρινούς μήνες μειώνει τον όγκο και ως εκ τούτου αυξάνει τις συγκεντρώσεις, ενώ τα γεγονότα βροχοπτώσεων οδηγούν σε φαινόμενα αραιώσης που μπορεί είτε να αυξήσει ή να μειώσει τις συγκεντρώσεις ανάλογα με τις σχετικές αλλαγές στο pH. Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ο ρυθμός παραγωγής OAM από τα αναχώματα που περιβάλλουν τη λίμνη του κρατήρα και από την ίδια τη λίμνη. Πιο συγκεκριμένα, η OAM στα θειούχα μεταλλεία δημιουργείται όταν τα θειούχα μεταλλεύματα (όπως πυρίτης, FeS₂) εκτίθενται και οξειδώνονται παρουσία νερού.

Το νησί Κύπρος βρίσκεται στη βορειοανατολική Μεσόγειο Θάλασσα και καλύπτει έκταση 9251 km². Έχει μέγιστο μήκος 225 km από ανατολή προς δύση και μέγιστο πλάτος 97 km από βορρά προς νότο. Η Κύπρος διαιρείται σε 3 γεωμορφολογικές ζώνες, την οροσειρά του Πενταδακτύλου στα βόρεια, τη ζώνη του Τροόδους στα νότια και την πεδιάδα της Μεσαορίας που χωρίζει τα 2 υψίπεδα. Η εγκαταλελειμμένη περιοχή εξόρυξης του χωριού Σιά της επαρχίας Λευκωσίας εμπίπτει στη Ζώνη του Τροόδους και βρίσκεται κοντά σε λίγα μικρά χωριά, σχεδόν στο κέντρο του νησιού. Μορφολογικά η περιοχή

χαρακτηρίζεται από μικρούς στρογγυλεμένους λόφους και επιμήκεις κορυφογραμμές. Κατά την εξορυκτική περίοδο, εκμεταλλεύτηκαν μαζικά μεταλλεύματα της τάξης των 170 000 τόνων με μέσο όρο ποιότητας 40% άμμο με 0,5–1,0% Cu και διασπαρμένο μετάλλευμα περίπου 164 000 τόνων με μέσο όρο ποιότητας 25% άμμο και 0,2% Cu. Επιπλέον, εντοπίστηκαν στην περιοχή απορρίμματα χαμηλής ποιότητας και υπολογίστηκαν ότι είναι της τάξης των 6,5 εκατομμυρίων τόνων σε μια έκταση 14 000m². Στο πειραματικό κομμάτι της μελέτης, τα χαρακτηριστικά του βρόχινου νερού την περιοχή εξόρυξης της Σιάς έχουν διερευνηθεί με βάση τη μακροπρόθεσμη συλλογή δειγμάτων και τον προσδιορισμό των φυσικών παραμέτρων και της χημικής σύνθεσης. Τα πειραματικά δεδομένα, τα οποία συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα δεδομένα δειγμάτων βρόχινου νερού που συλλέχθηκαν σε ορεινή και παράκτια περιοχή του νησιού, δείχνουν ξεκάθαρα ότι το βρόχινο νερό στην περιοχή του παλιού μεταλλείου χαρακτηρίζεται από σημαντικά χαμηλότερες τιμές pH και αυξημένες συγκεντρώσεις θεικών. Η ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των αυξημένων συγκεντρώσεων θεικών αλάτων και του μειωμένου pH στα δείγματα βρόχινου νερού καθώς και η απουσία άλλων πηγών εκπομπής θείου υποδηλώνουν την κυρίαρχη επίδραση των παλιών απορριμμάτων θειούχων μεταλλείων στις τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες (Charalambides et al., 2003).

Οι εγκαταλειμμένες περιοχές εξόρυξης έχουν αφήσει μια κληρονομιά περιβαλλοντικής ζημίας με πιθανές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία. Η μελέτη των Hadjipanagiotou et al. (2020), στόχευε στην εκτίμηση του επιπέδου ρύπανσης των περιοχών που περιβάλλουν το εγκαταλελειμμένο μεταλλείο χαλκού Αγροκηπιάς στην Κύπρο μέσω της κινητοποίησης δυνητικά τοξικών στοιχείων (PTEs) και στην συσχέτιση αποτελεσμάτων με την ορυκτολογία της περιοχής. Για το σκοπό αυτό, αξιολογήθηκαν τα επίπεδα 22 PTEs και άλλων σημαντικών στοιχείων στο νερό και στα tailings της περιοχής όπου διεξάχθηκε η μελέτη. Οι τιμές pH του νερού (pH < 2,7) αποκάλυψαν τις όξινες και οξειδωτικές συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή. Η οξύτητα και οι εξεταζόμενες συγκεντρώσεις PTEs στα νερά των ρεμάτων ακολούθησαν πτωτική τάση σε συνδυασμό με την αυξανόμενη απόσταση από τα απορρίμματα, φτάνοντας σε τιμές επιτρεπόμενου ορίου σε απόσταση 1500m. Ο σωρός απορριμμάτων που εξετάστηκε χαρακτηρίστηκε από σημαντικά επίπεδα Cu, Zn, Pb, Cd, Cr και Ag. Τα ιζήματα των ρεμάτων και το γεωργικό έδαφος της γύρω περιοχής εμφάνισαν ρύπανση με PTEs (κυρίως Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Ag και Li) και το επίπεδο ρύπανσης συσχετίστηκε με την αναφερόμενη ορυκτολογία της τοποθεσίας. Επιπρόσθετα, οι τιμές του βαθμού ρύπανσης και του δείκτη ρύπανσης

υπέδειξαν ρύπανση των ιζημάτων του ρέματος που ρέει μέσα από το χωριό, υποδηλώνοντας πιθανές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία στην τοπική κοινωνία. Επιπλέον, οι τιμές του παράγοντα οικολογικού κινδύνου υποδηλώνουν ότι τα ρέματα που μελετήθηκαν ενέχουν μέτριους οικολογικούς κινδύνους, κυρίως με τη μεσολάβηση του Cd και του Cu. Συνολικά, τα αποτελέσματα τόνισαν την ανάγκη λήψης μέτρων ανάπλασης για τη διασφάλιση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και της δημόσιας υγείας.

Το εγκαταλελειμμένο εργοστάσιο εμπλουτισμού χρυσού-αργυρού που βρίσκεται στο χωριό Μιτσερό της επαρχίας Λευκωσίας, αποτελεί παράδειγμα των μακροπρόθεσμων περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συμβαίνουν λόγω της εξόρυξης μεταλλευμάτων. Η μελέτη των Lortzie et al. (2015) διενεργήθηκε στο εργοστάσιο εμπλουτισμού, το οποίο εγκαταλείφθηκε πριν 70 χρόνια με σκοπό την αναζήτηση πιθανής περιβαλλοντικής ρύπανσης και συνεπώς την έκταση της. Συλλέχθηκαν δείγματα από το έδαφος και το νερό από την περιοχή ενδιαφέροντος και το κύριο συμπέρασμα των ερευνητών ήταν ότι η ρύπανση της περιοχής προέρχεται από την έντονη μεταλλευτική δραστηριότητα. Πιο συγκεκριμένα, το συμπέρασμα αυτό βασίστηκε στο εξαιρετικά χαμηλό pH των δειγμάτων εδάφους (3,4 - 5,4) και την υψηλή συγκέντρωση μετάλλων στα δείγματα νερού. Μολονότι το εργοστάσιο είναι κλειστό εδώ και 7 δεκαετίες, οι επιπτώσεις είναι εμφανείς μέχρι σήμερα. Ο υψηλός βαθμός κινητικότητας των μετάλλων, σε συνδυασμό με τις όξινες συνθήκες οδηγούν στην δημιουργία όξινων απορροών κατά την διάρκεια καταιγίδων.

Στην μελέτη των Stylianou et al. (2020) επισημάνθηκαν οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν μετά από την μεταλλευτική δραστηριότητα στην Κύπρο. Τα υπό μελέτη μεταλλεία ήταν της Κοκκινοπεζούλας στο Μιτσερό και του Βόρειου και Νότιου Μαθιάτη. Σύμφωνα με τους ερευνητές, τα κύρια περιβαλλοντικά προβλήματα που προκύπτουν από τα εγκαταλελειμμένα μεταλλεία είναι η υποβάθμιση και η ρύπανση του εδάφους, η ποιότητα του νερού, η γεωχημεία των αποβλήτων, η μη φυσιολογική ανάπτυξη και αύξηση της χλωρίδας και τέλος οι πιθανές οικονομικές αρνητικές συνέπειες του κράτους για την αποκατάσταση του φυσικού περιβάλλοντος της περιοχής. Επιπρόσθετα, στις περιοχές όπου διεξάχθηκε η έρευνα αναφέρεται περιβαλλοντική υποβάθμιση. Απεναντίας μερικά φυτικά είδη μπορούν να αναπτυχθούν φυσιολογικά. Ειδικότερα, τα φυτά *Phragmites australis*, *Tamarix smyrnensis*, *Pinus brutia*, *Acacia*

saligna και *Schoenus nigricans* έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν ως φυτοαποκαταστάτες του εδάφους σε περιοχές όπου λαμβάνουν χώρα μεταλλεία. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των ειδών είναι το μεγάλο εύρος αντοχής και ανοχής σε εξαιρετικά χαμηλές τιμές pH και εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε μέταλλα. Συνεπώς, η έκθεση των φυτικών αυτών ειδών σε όξινους και οξειδωτικούς βιοτόπους δεν επηρεάζει την βλάστηση και της επιβίωση τους.

Στην μελέτη των Stylianou et al. (2014) διερευνήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του εγκαταλελειμμένου μεταλλείου ανοιχτού τύπου στον Βόρειο Μαθιάτη. Για την εκτίμηση της ρύπανσης, συλλέχθηκαν δείγματα νερού και εδάφους από τον κρατήρα της λίμνης και από τα απορρίμματα που υπάρχουν στην περιοχή. Τα δείγματα εδάφους συλλέχθηκαν τον Απρίλιο του 2010 και τα σημεία δειγματοληψίας επιλέχθηκαν μετά από εξέταση της γεωλογίας και της τοπογραφίας της περιοχής που περιβάλλει το ορυχείο, καθώς και της ορυκτολογίας και της έντασης αλλοίωσης των απορριμμάτων. Συμπερασματικά, το δείγμα νερού από τον κρατήρα της λίμνης χαρακτηρίστηκε από τους επιστήμονες ως όξινο (pH = 2.93 – 3.04) καθώς βρέθηκαν στο νερό ασβέστιο, μαγνήσιο και θείο και επιπλέον το δείγμα εμφάνισε υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Σε επόμενο στάδιο, συλλέχθηκαν δείγματα από την σωρό των απορριμμάτων και η ανάλυση τους έδειξε αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων και υψηλό επίπεδο όξινης απορροής που συμβαίνει λόγω έντονων βροχοπτώσεων. Τέλος, εξετάστηκε η επίδραση του εγκαταλελειμμένου μεταλλείου στο έδαφος και στην θερμοκρασία. Παρατηρήθηκε ότι όπου ο σιδηροπυρίτης αφέθηκε ακάλυπτος στην επιφάνεια του μεταλλείου, απουσίαζαν τα φυτικά είδη και η θερμοκρασία της περιοχής παρουσίαζε σημαντική αύξηση.

Τα απορρίμματα μεταλλείων αντιπροσωπεύουν μια σοβαρή πηγή ρύπανσης του εδάφους με επιπτώσεις στη δημόσια υγεία. Οι στόχοι της μελέτης των Christou et al. (2017) ήταν να εκτιμηθεί το επίπεδο κινητοποίησης τοξικών και βαρέων μετάλλων από τα tailings του εγκαταλελειμμένου μεταλλείου Λίμνης στην Κύπρο και η έκταση της ρύπανσης του εδάφους στη γύρω περιοχή με τη χρήση δεικτών ρύπανσης. Άλλοι στόχοι ήταν να διερευνηθεί η πρόσληψη και συσσώρευση βαρέων μετάλλων από καλλιέργειες και τέλος να εκτιμηθεί το δυναμικό των αυτοχθόνων ειδών άγριων φυτών που καλλιεργούνται στην υπό μελέτη περιοχή έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν σε πρακτικές φυτοδιαχείρισης. Τα tailings εμφάνισαν σημαντικά υψηλότερες συγκεντρώσεις S, Zn, Cu

και Pb σε σύγκριση με αυτές που βρέθηκαν στα δείγματα αναφοράς ελέγχου. Η πλευρική κινητοποίηση Mg, S, Zn, Cu και Pb είχε ως αποτέλεσμα τη ρύπανση των γύρω περιοχών με αυτά τα μέταλλα. Επιπλέον, οι συγκεντρώσεις Mn και Cu στα απορρίμματα και τις γύρω περιοχές υπερέβησαν τα όρια για τα γεωργικά εδάφη. Οι τιμές του δείκτη ρύπανσης αποκάλυψαν επίσης την εξαιρετικά υψηλή ρύπανση των απορριμμάτων και τη μέτρια ρύπανση των γύρω περιοχών με όλα τα αναλυόμενα στοιχεία. Η συγκέντρωση του Cd στα φρούτα του σύκου, των φιστικιών και των λεμονιών, καθώς στο κριθάρι υπερέβη τα επιτρεπόμενα όρια υπογραμμίζοντας τις πιθανές επικίνδυνες επιπτώσεις που προκαλούνται από το Cd από την κατανάλωση αυτών των προϊόντων. Η εξέταση της περιεκτικότητας σε βαρέα μέταλλα σε άγρια αυτοφυή φυτικά είδη έδειξε ότι το *Inula viscosa L.* έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί για τη φυτοσταθεροποίηση του Cd και του Pb και το *Allium ampeloprasum L.* για τη φυτοσταθεροποίηση του Pb. Συνολικά, τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι τα απορρίμματα του μεταλλείου Λίμνης και οι γύρω τοποθεσίες του είναι εξαιρετικά ρυπασμένα με υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων. Επομένως, η γεωργική δραστηριότητα στην υπό μελέτη περιοχή πρέπει να απαγορευτεί και να πραγματοποιηθεί επείγοντως φυτοδιαχείριση.

Τα απορρίμματα του μεταλλείου ΙΚΜΗΣΣ που μελετήθηκαν από τους Gil-Loaiza et al. (2016), χαρακτηρίζονται πολύ όξινα και με αυξημένα επίπεδα βαρέων μετάλλων. Επιπρόσθετα, τα συγκεκριμένα απορρίμματα δεν έχουν υποστηρίξει την ανάπτυξη φυτών για δεκαετίες. Σε αυτή τη δοκιμή πεδίου διάρκειας 41 μηνών, μια μόνο εφαρμογή κομπόστ με συμπληρωματική άρδευση υποστήριξε τη δημιουργία μιας σταθερής φυτικής κάλυψης παρόμοιας πυκνότητας με την περιοχή γύρω από την τοποθεσία ΙΚΜΗΣΣ. Το κλειδί για την επιτυχία ήταν ο συνδυασμένος αντίκτυπος του κομπόστ ως βελτιωτικού για τη βελτίωση των παραμέτρων ποιότητας του εδάφους και την παροχή μιας πηγής οργανικής ύλης. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι το κομπόστ έχει την ικανότητα να ρυθμίσει το οξύ που παράγεται από την οξείδωση του πυρίτη σε μεγάλο βαθμό. Οι επεξεργασίες των tailings με κομπόστ ρυθμίζουν το pH πιο αποτελεσματικά χωρίς σημαντική μείωση κατά τους 41 μήνες που εξετάστηκαν. Συνεπώς, όλες οι επεξεργασίες που έλαβαν τροποποίηση κομπόστ έδειξαν βλάστηση και ανάπτυξη φυτών επιτυγχάνοντας κάλυψη από 30 - 39% εντός των πρώτων 5 μηνών.

Αφενός, οι μικροοργανισμοί και πιο συγκεκριμένα τα βακτήρια και αρχαία εμπλέκονται και ευθύνονται για τη δημιουργία πολλών από τα περιβαλλοντικά προβλήματα που

σχετίζονται με την εξόρυξη μετάλλων, αφετέρου είναι σαφές ότι υπάρχουν και άλλοι οξεόφιλοι και ουδετερόφιλοι μικροοργανισμοί που καταλύουν αντιδράσεις που μπορούν να συμβάλουν στην αποκατάσταση ρυπασμένων ορυχείων και της OAM (Hottenstein et al., 2019). Ειδικότερα, τα μικρόβια είναι αυτά που καταλύουν την αναγωγή του σιδήρου και του θειικού σιδήρου, αναστρέφοντας έτσι τις αντιδράσεις που εμπλέκονται στην οξείδωση των θειούχων ορυκτών. Συνεπώς, η μεγαλύτερη γνώση της μικροβιολογίας αυτών των οικοσυστημάτων θα οδηγήσει αναμφίβολα σε πιο εστιασμένες και αποτελεσματικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούν φυσικές διαδικασίες για να εξουδετερώσουν τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της εξόρυξης (Johnson, 2003). Οι Li et al. (2015) διαπίστωσαν ότι η έλλειψη επαρκών πόρων του εδάφους για τη φυτοσταθεροποίηση των θειούχων απορριμμάτων σε πολλά μεταλλεία έχει απαιτήσει την ανάπτυξη μεθοδολογίας για την οικολογική αποκατάσταση του εδάφους από τα απορρίμματα μέσω της βελτίωσης των φυσικοχημικών και βιολογικών συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα για την αποτελεσματική αποκατάσταση του εδάφους, ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά είναι η δημιουργία γηγενών μικροβιακών κοινοτήτων και σχετικών βιογεωχημικών λειτουργιών, οι οποίες είναι κρίσιμες για την αποσύνθεση της οργανικής ύλης, τον κύκλο των θρεπτικών στοιχείων και τη βιώσιμη παραγωγικότητα των ιθαγενών φυτικών ειδών μετά την εγκατάστασή τους. Η παρούσα μελέτη στόχευε στη διερεύνηση των επιπτώσεων των tailings με ανάμειξη με τοπικό έδαφος, για τη δημιουργία μικροβιακών κοινοτήτων και λειτουργιών σε απορρίμματα χαλκού(Cu)-μόλυβδου(Pb)-ψευδάργυρου(Zn). Τα απορρίμματα αναμίχθηκαν αναλογικά (% w:w) με επιφανειακό έδαφος από ενδιαίτημα γηγενούς βλάστησης σε αναλογίες 0, 12,5, 25 και 50, τα οποία επώαστηκαν για 8 εβδομάδες υπό ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες. Τα δείγματα χαρακτηρίστηκαν για μικροβιακή ποικιλότητα, ενζυμικές δραστηριότητες, μικροβιακή βιομάζα, αναπνοή του εδάφους και διάφορες φυσικοχημικές ιδιότητες. Συμπερασματικά αναφέρετε ότι, η προσθήκη έως και 50% τοπικού εδάφους αύξησε τη μικροβιακή ποικιλότητα και τις ενζυμικές δραστηριότητες για την ανακύκλωση C και N, με αναπνευστικό πηλίκιο παρόμοιο με αυτό του τοπικού εδάφους. Επιπλέον, τα Proteobacteria, Ascomycota και Bacteroidetes κυριάρχησαν σε όλες τις θεραπείες, αλλά η σύνθεση της μικροβιακής κοινότητας διαφοροποιήθηκε σαφώς μεταξύ των διαφορετικών δειγμάτων απορρίμματος και εδάφους. Η ανάπτυξη μυκήτων στις τροποποιήσεις συσχετίστηκε έντονα με τη μικροβιακή βιομάζα και με ενζυμικές δραστηριότητες. Κατά συνέπεια, υποδηλώνεται η σημαντική συμβολή των μυκήτων στο έδαφος προς τις μικροβιακές κοινότητες που έχουν δημιουργηθεί στα δείγματα εδάφους.

Επομένως, η ανάμειξη απορριμμάτων με τοπικό έδαφος της περιοχής ενδιαφέροντος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιταχύνει τη δημιουργία μικροβιακών κοινοτήτων και να αποτελέσει την έναρξη της αποκατάστασης βιογεωχημικών διεργασιών στο έδαφος για την αποτελεσματική εγκατάσταση ιθαγενών φυτικών ειδών.

Η περιοχή εξόρυξης Riotinto στην Ισπανία μελετήθηκε εκτενώς από τους Mingorance et al. (2017) με σκοπό την διερεύνηση αποκατάστασης του ανενεργού μεταλλείου με την εφαρμογή βελτιωτικών εδάφους όπως η κομποστοποιημένη λυματολάσπη, οργανικό λίπασμα και ασβέστης με παράλληλη φύτευση *Cistus ladanifer L.* ως θάμνος ανθεκτικός σε όξινα περιβάλλοντα και *Medicago sativa L.* που θεωρείται ως καλλιέργεια για ταχεία αναβλάστηση. Υποστηρίζεται ότι οι περιοχές που επηρεάζονται από τις δραστηριότητες εξόρυξης και τήξης στερούνται βλάστησης ή περιέχουν τμήματα απλών φυτικών κοινοτήτων. Επιπλέον, σε αυτήν την περιοχή της Μεσογείου η υποβάθμιση του εδάφους και κατά συνέπεια ο αποικισμός των φυτών, επιδεινώνεται από δυσμενείς περιβαλλοντικούς και κλιματικούς παράγοντες όπως οι μεγάλες περιόδους ξηρασίας που διακόπτονται από έντονες, περιστασιακά καταρρακτώδεις βροχοπτώσεις οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή διάβρωση. Τα αποτελέσματα που βρέθηκαν κατέδειξαν ότι η εισροή οργανικής ύλης από το κομπόστ λυματολάσπης άλλαξε τις φυσικοχημικές συνθήκες του υποστρώματος, αυξάνοντας κυρίως το pH (1–2 μονάδες) και παρέχοντας μια πλούσια πηγή C και ενέργειας η οποία ευνοεί την ανάπτυξη μικροβίων. Η ασβέστωση και η προσθήκη έως και 5% κομπόστ βελτίωσε αποτελεσματικά την υγεία του εδάφους και βοήθησε την ανάπτυξη των φυτών, μειώνοντας σημαντικά την πρόσληψη μετάλλων και αποκαθιστώντας με επιτυχία τα απορρίμματα του μεταλλείου. Η παρούσα μελέτη έδειξε επίσης ότι το επίπεδο μετάλλων δεν είναι ο μόνος αρνητικός παράγοντας που ελέγχει την ανάπτυξη των φυτών στα απορρίμματα μεταλλείων. Η ποιότητα του εδάφους, το επίπεδο pH, ο οργανικός άνθρακας και η συγκέντρωση θρεπτικών αποτελούν τους κύριους παράγοντες για την ανάπτυξη της βλάστησης. Η προσθήκη κομπόστ επηρέασε επίσης θετικά την εγκατάσταση των φυτών, ειδικά για το *Cistus* μια δόση 2% είναι ικανή να βελτιώσει την ανάπτυξη των φυτών.

Η χρήση βραχυπρόθεσμης βλάστησης για τον προσωρινό έλεγχο των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων των απορριμμάτων σε εγκαταλελειμμένα μεταλλεία δεν εφαρμόζεται συχνά κατά τη διάρκεια της επιχειρησιακής εξόρυξης, αλλά θα μπορούσε να

έχει κάποια αξία. Αυτό το άρθρο αναφέρεται σε μια δοκιμή σε θερμοκήπιο που σχεδιάστηκε για να εξετάσει ορισμένα από τα ζητήματα που σχετίζονται με τη βραχυπρόθεσμη βλάστηση δηλαδή γρήγορη βλάστηση μεγάλου ποσοστού σπόρων, ικανότητα των φυταρίων να επιβιώνουν σε μη τροποποιημένα υποστρώματα και σε δυνητικά τοξικό υπόστρωμα. Δοκιμάστηκαν 5 μη αυτόχθονα είδη φυτών (*Hordeum vulgare*, *Secale cereale*, *Lolium multiflorum*, *Trifolium pratense* και *Medicago sativa*) σε 5 διαφορετικούς τύπους υποστρώματος: μη τροποποιημένα απορρίμματα μεταλλείου, απορρίμματα με προσθήκη λιπάσματος, απορρίμματα με πράσινα απόβλητα, κομπόστ με μίγμα βιοστερεών και τοπικό φυτόχωμα. Προσδιορίστηκε η κατάσταση θρεπτικών και βαρέων μετάλλων (As, Cu, Cd, Ni, Pb) κάθε τύπου υποστρώματος. Η δοκιμή σε γλάστρες έδειξε ότι, οι θρεπτικοί και φυσικοί περιορισμοί στην ανάπτυξη των φυτών που είναι εγγενείς στα απορρίμματα ξεπεράστηκαν μέσω της υψηλής εφαρμογής οργανικού κομπόστ. Όλα τα είδη φυτών αναπτύχθηκαν δυναμικά κατά τη διάρκεια της δοκιμής στα απορρίμματα αναμειγμένα με κομπόστ. Τα οφέλη από την προσθήκη οργανικής ύλης σε αυτό το σύστημα απορριμμάτων είναι διπλά. Πρώτον, η χημική κατάσταση των απορριμμάτων βελτιώνεται με την προσθήκη θρεπτικών ουσιών σε οργανική μορφή βραδείας αποδέσμευσης. Δεύτερον, η φυσική κατάσταση βελτιώνεται μέσω της οργανικής ύλης που λειτουργεί ως αποθήκη νερού και βελτιώνει τη δομή των απορριμμάτων (Schroeder et al., 2005).

Ο στόχος της εργασίας των Zubillaga & Lavado (2002) ήταν η αξιολόγηση των επιπτώσεων της εφαρμογής κομποστοποιημένων βιοστερεών στη συσσώρευση βαρέων μετάλλων (Cd, Cu, Ni, Pb και Zn) στα φύλλα μαρουλιού. Γλάστρες που περιείχαν διαφορετικές αναλογίες (0 έως 100%) κομποστοποιημένων βιοστερεών χρησιμοποιήθηκαν από τους ερευνητές για την ανάπτυξη φυτών μαρουλιού σε συνθήκες θερμοκηπίου. Το ξηρό και νωπό βάρος, η επιφάνεια των φύλλων και η πρόσληψη Cd, Cu, Ni, Pb και Zn προσδιορίστηκαν μετά τη συγκομιδή. Διαπιστώθηκε ότι η ξηρή και νωπή βιομάζα των φυτών ήταν σημαντικά χαμηλότερες στην επεξεργασία ελέγχου. Αντίθετα, η προσθήκη κομποστοποιημένων βιοστερεών προκάλεσε αύξηση 20 και 40% στη βιομάζα. Επίσης, αναφέρεται ότι οι συγκεντρώσεις Cd και Pb στα φύλλα ήταν κάτω από τα όρια ανίχνευσης ($0,05 \text{ mg kg}^{-1}$) σε όλες τις τροποποιήσεις. Η συγκέντρωση του Zn στα φύλλα αυξάνεται καθώς μειώνεται η αναλογία κομπόστ, κυμαινόμενη από 57,2 έως $80,4 \text{ mg kg}^{-1}$. Η εφαρμογή κομποστοποιημένων βιοστερεών αύξησε τις συγκεντρώσεις των φυτών Cu και Ni, κυμαινόμενες από 5,1 έως $9,8 \text{ mg Cu kg}^{-1}$ και 2,3 έως $3,7 \text{ mg Ni kg}^{-1}$.

Αξιοπρόσεκτο είναι το γεγονός ότι σε όλες τις επεξεργασίες με κομποστοποιημένα βιοστερεά, οι αναλογίες των βαρέων μετάλλων στα φυτά ήταν κάτω από τα διεθνή πρότυπα τοξικότητας. Συνεπώς, οι επιστήμονες προτείνουν ότι, σε βραχυπρόθεσμες εφαρμογές τα κομποστοποιημένα βιοστερεά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως βελτιωτικά του εδάφους για την παραγωγή μαρουλιού, χωρίς τοξικές επιδράσεις στη χημική σύνθεση του φυτού.

Στην έρευνα των Farrag et al. (2012), πραγματοποιήθηκαν μελέτες θερμοκηπίου και πεδίου για να εξεταστούν οι αποκρίσεις του εδάφους με υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στην ανάπτυξη των φυτών και η πιθανή ικανότητα φυτοαποκατάστασης των φυτών της οικογένειας Brassicaceae (*Brassica alba*, *Brassica carinata*, *Brassica napus* και *Brassica nigra*) και Poaceae (σιτάρι και κριθάρι). Τα εδάφη που χρησιμοποιήθηκαν εμφάνισαν υψηλές συγκεντρώσεις Cr, Cu, Pb και Zn που υπερέβαιναν σε μεγάλο βαθμό τα μέγιστα επίπεδα που επιτρέπονται από την νομοθεσία. Δοκιμάστηκαν διάφορες οργανικές τροποποιήσεις όπως το κομπόστ που προάγει την ανάπτυξη των φυτών. Στο πείραμα του θερμοκηπίου, το μήκος του φυτού και η φυτική βιομάζα αξιολογήθηκαν περιοδικά για τα φυτά Brassicaceae που εξετάστηκαν. Γενικά, όλα τα είδη που δοκιμάστηκαν φάνηκαν να είναι ανεκτικά σε υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στο έδαφος. Μια αξιοσημείωτη αύξηση της ανάπτυξης αποδείχθηκε ότι σημειώθηκε για τα φυτά της οικογένειας Brassicaceae που καλλιεργήθηκαν σε ρυπασμένα εδάφη που έχουν τροποποιηθεί με κομπόστ.

Σύμφωνα με τους Valentín-Vargas et al. (2014), η φυτοσταθεροποίηση σε συνδυασμό με τη εφαρμογή κομπόστ αποτελεί μια ισχυρή εναλλακτική λύση για την αποκατάσταση των απορριμμάτων μεταλλείων. Οι επιστήμονες επισημαίνουν ότι τα μικρόβια που αλληλοεπιδρούν με τις ρίζες πιθανόν να είναι σημαντικά για τη διευκόλυνση της εγκατάστασης φυτών στα tailings. Η κατανόηση της δυναμικής της μικροβιακής κοινότητας στα απορριμμάτων που υποβάλλονται σε αποκατάσταση είναι κρίσιμη επειδή αυτή η δυναμική επηρεάζει βαθιά τόσο τη βιογεωχημική διάβρωση των απορριμμάτων όσο και τη βιωσιμότητα μιας φυτικής κάλυψης. Σε πειραματικό επίπεδο, παρακολούθηθηκε η δυναμική των μικροβιακών κοινοτήτων του εδάφους (π.χ. βακτήρια, μύκητες, αρχαία) κατά τη διάρκεια μιας 12μηνιαίας μελέτης μεσόκοσμου που περιλάμβανε 4 θεραπείες: 2 δείγματα με μη τροποποιημένα και τροποποιημένα με κομπόστ απορρίμματα και 2 επεξεργασίες απορριμμάτων με φυτεμένους σπόρους που

τροποποιήθηκαν με κομπόστ. Οι κοινότητες βακτηρίων, μυκήτων και αρχαίων ανταποκρίθηκαν διακριτά στη διαδικασία της επαναβλάστησης και στις ταυτόχρονες αλλαγές στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Στα αποτελέσματα σημειώνεται ότι η προσθήκη κομπόστ αύξησε σημαντικά τη μικροβιακή ποικιλότητα και είχε άμεση και σχετικά μακροχρόνια ρυθμιστική επίδραση στο pH, επιτρέποντας στα φυτά να βλαστήσουν και να ευδοκιμήσουν κατά τα πρώτα στάδια του πειράματος. Παρατηρήθηκαν άμεσες αλλαγές στις βακτηριακές κοινότητες μετά την εγκατάσταση του φυτού, ενώ οι κοινότητες μυκήτων εμφάνισαν καθυστερημένη απόκριση που προφανώς συσχετίστηκε με τη μείωση του pH.

Σύμφωνα με τους Anawar et al. (2013), διεξάχθηκε έρευνα σχετικά με την ανάπτυξη της βλάστησης και τη διαδοχή των φυτικών κοινοτήτων στην εγκαταλελειμμένη περιοχή εξόρυξης πυρίτη São Domingos. Πραγματοποιήθηκε έρευνα πεδίου για εκτίμηση της ανάπτυξης και της διαδοχής της βλάστησης των φυτικών κοινοτήτων. Πιο συγκεκριμένα, συλλέχθηκαν δείγματα βλάστησης (φυτικά είδη, λειχήνες και βρύα) και tailings (και εδάφους) και τέλος αναλύθηκαν οι φυσικοχημικές και γεωχημικές ιδιότητες και τα επίπεδα μετάλλων στα απορρίμματα ορυχείων. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν ότι τα απορρίμματα κακής ποιότητας εδάφους με υψηλή περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα και πολύ χαμηλό pH ήταν οι κύριοι περιορισμοί για την ανάπτυξη της βλάστησης στο κέντρο και τις εσωτερικές τοποθεσίες του ορυχείου. Σε αντίθεση, ορισμένες τοποθεσίες μελέτης έδειξαν ότι παρόλο που είχαν υψηλή περιεκτικότητα σε μέταλλα, η πολύ καλή ποιότητα του εδάφους τους παρήγαγε εξαιρετική βλάστηση, ανάπτυξη δέντρων και δασών. Επομένως, οι παράγοντες της ποιότητας του εδάφους κυριαρχούσαν έναντι της υψηλής περιεκτικότητας σε μέταλλα για την ανάπτυξη της βλάστησης. Επίσης, επισημαίνεται ότι η φυσική ανάπτυξη του εδάφους σε απορρίμματα μεταλλείων και σε χωματερές είναι μια αργή διαδικασία. Ως εκ τούτου, συνιστάται από τους ερευνητές η ανάμειξη γόνιμου εδάφους με τα tailings με σκοπό την αραίωση της υψηλής συγκέντρωσης των βαρέων μέταλλα έτσι ώστε να μετατραπεί η ποιότητα του εδάφους σε καλή και τελικά να επέλθει η ανάπτυξη και αύξηση της βλάστησης.

Τα οργανικά απόβλητα είναι πλούσια σε άνθρακα και μπορούν να διατηρήσουν τη μικροβιακή δραστηριότητα και ανάπτυξη, ενισχύοντας έτσι τους βιογεωχημικούς κύκλους θρεπτικών συστατικών. Στόχος της μελέτης των Ros et al. (2003) ήταν η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας διαφορετικών τύπων οργανικών τροποποιήσεων

(πχ. κομπόστ) στην αποκατάσταση της μικροβιακής δραστηριότητας και της μικροβιακής βιομάζας ενός υποβαθμισμένου εδάφους. Τα εδάφη που τροποποιήθηκαν με οργανικά απόβλητα αύξησαν σημαντικά το επίπεδο βιομάζας και τη εδαφική αναπνοή, το οποίο αντανακλά τον αυξημένο αριθμό μικροοργανισμών και μικροβιακής δραστηριότητας. Η ανάπτυξη και διατήρηση μιας φυτικής κάλυψης στα εδάφη όπου προστέθηκαν οργανικές τροποποιήσεις σε αντίθεση με το έδαφος ελέγχου χωρίς τροποποιήσεις, είναι σημαντικός παράγοντας για την ποιότητα του εδάφους διότι προστατεύει τα εδάφη από διαβρωτικές διεργασίες και παρέχει οργανικό C ως πηγή ενέργειας για τους μικροοργανισμούς. Ακολουθώντας, τονίζεται ότι η γενική αύξηση της βιομάζας και της εδαφικής αναπνοής που σημειώθηκε μπορεί να αποδοθεί στην ενσωμάτωση εύκολα αποικοδομήσιμων υλικών, τα οποία διεγείρουν την αυτόνομη μικροβιακή δραστηριότητα του εδάφους και στην ενσωμάτωση εξωγενών μικροοργανισμών. Επιπλέον, η φυτική κάλυψη που αναπτύχθηκε στο πείραμα αναφέρεται ως συνέπεια της ενσωμάτωσης οργανικών αποβλήτων που δρουν ως πηγή άνθρακα και θρεπτικών συστατικών διατηρώντας έτσι υψηλότερη μικροβιακή βιομάζα και δραστηριότητα.

2.5 Διεθνής πραγματικότητα

Η ρύπανση του εδάφους δημιουργεί σημαντικό κίνδυνο τόσο για την ανθρώπινη υγεία όσο και για τα φυσικά οικοσυστήματα και αποτελεί προτεραιότητα κατά την επαναχρησιμοποίηση της βιομηχανικής γης. Το 2015 είχε ανακηρυχθεί Διεθνές Έτος Εδαφών από την 68η Γενική Συνέλευση του ΟΗΕ (A/RES/68/232). Επιπρόσθετα, η δημοσίευση LIFE της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) περιγράφει μια σημαντική χρηματοδότηση έρευνας που στοχεύει σε πολλά ζητήματα τα οποία σχετίζονται με το έδαφος όπως η ρύπανση της γης, η αειφόρος γεωργία και η παρακολούθηση του εδάφους. Η ρύπανση του εδάφους είναι ένα σημαντικό ζήτημα σε επίπεδο ΕΕ και πρόσφατες εκτιμήσεις της κατάστασης, πληροφορίες από τις συμμετέχουσες χώρες μέσω του Ευρωπαϊκού Δικτύου Περιβαλλοντικής Πληροφόρησης και Παρατήρησης για το έδαφος (EIONET-SOIL), δείχνουν ότι ο αριθμός των πιθανών ρυπασμένων τοποθεσιών υπολογίζονται σε περισσότερες από 2,5 εκατομμύρια και οι ρυπασμένες τοποθεσίες που έχουν εντοπιστεί είναι περίπου 340.000 και αναφέρεται ότι ορισμένες από αυτές τις τοποθεσίες είναι εγκαταλελειμμένα μεταλλεία. Απότοκο όλων των πιο πάνω, υπάρχει μια αυξανόμενη ανάγκη εντός της ΕΕ για ενιαίες πολιτικές που θα

προστατεύουν αποτελεσματικά το έδαφος από ανθρωπογενείς ρύπους (Kostarelos et al., 2015).

Τα τελευταία χρόνια, τα ανεπαρκή περιβαλλοντικά πρότυπα και η έλλειψη επιβολής της περιβαλλοντικής νομοθεσίας στην περιοχή εξόρυξης πυρίτη São Domingos ενθάρρυναν την απόρριψη τοξικών απορριμμάτων στο περιβάλλον που τελικά ρύπανε τους κήπους, τα γεωργικά χωράφια, τον ανθρώπινο βιότοπο, τα επιφανειακά ύδατα, τα ρέματα και τα υπόγεια ύδατα λόγω του πολύ χαμηλού pH και λόγω έκπλυσης και απελευθέρωσης τοξικών μετάλλων, όπως για παράδειγμα, Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Sb, Zn. Ως απόρροια, τα χερσαία και υδρόβια φυτά, ζωντανοί οργανισμοί και η λειτουργική ποικιλομορφία των μικροβιακών κοινοτήτων προκαλούν τη φθίνουσα τάση στη φυτική, ζωική και οικολογική βιοποικιλότητα. Επομένως, τα εδάφη που έχουν ρυπανθεί από υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων και χαρακτηρίζονται από χαμηλό pH που δημιουργείται από την οξείδωση θειούχων ορυκτών (π.χ. πυρίτη) δεν είναι ευνοϊκά για την ανάπτυξη των φυτών αφού τα φυτά δεν καθίσταται δυνατή η πρόσληψη απαραίτητων θρεπτικών συστατικών (Anawar et al., 2013).

2.5.1 Υφιστάμενες Οδηγίες της ΕΕ

Ορισμένες υπάρχουσες οδηγίες της ΕΕ, αν και δεν στοχεύουν άμεσα στην προστασία του εδάφους, περιλαμβάνουν κανονισμούς για την προστασία του εδάφους. Για παράδειγμα, η οδηγία για τον ολοκληρωμένο έλεγχο και πρόληψη της ρύπανσης (IPPC 2008/1/EC) απαιτεί οι εργασίες που εμπíπτουν στο πεδίο εφαρμογής της, να μην δημιουργούν ρύπανση του εδάφους. Άλλες οδηγίες όπως η οδηγία πλαίσιο για τα ύδατα (WFD 2000/60/EC), η οδηγία πλαίσιο για τα απόβλητα (2008/98/EC) και η οδηγία για την υγειονομική ταφή (99/31/EC) παρέχουν έμμεσους ελέγχους σχετικά με τη ρύπανση του εδάφους και απαιτήσεις για τη διαχείρισή του. Συμπληρωματικά, η οδηγία για τις Βιομηχανικές Εκπομπές (IED 2010/75/EU) παρέχει ένα ρυθμιστικό πλαίσιο για την πρόληψη των εκπομπών στο έδαφος από μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις και ορισμένα μέρη της οδηγίας αναφέρονται στα απορρίμματα εξόρυξης (Kostarelos et al., 2015).

Ακόμη, η νομοθεσία της ΕΕ γνωστή ως οδηγία για τα απόβλητα εξόρυξης (2006/21/EK) περιγράφει τις διαδικασίες που πρέπει να χρησιμοποιούνται από τη βιομηχανία εξόρυξης

και αποσκοπεί στην ορθή διαχείριση των απορριμμάτων μεταλλείων και στην πρόληψη και αντιμετώπιση περιβαλλοντικών ζητημάτων που σχετίζονται με την εξορυκτική δραστηριότητα. Ωστόσο, η συγκεκριμένη οδηγία εφαρμόζεται σε μεταλλεία που είναι ενεργά επί του παρόντος και δεν αφορά εγκαταλελειμμένα μεταλλεία. Άλλη νομοθεσία της ΕΕ που έχει έμμεση σχέση με πρώην εγκαταστάσεις εξόρυξης αποτελεί τόσο η οδηγία πλαίσιο για τα ύδατα (2000/60/ΕΚ) όσο και η οδηγία για τα υπόγεια ύδατα (2006/118/ΕΚ) οι οποίες περιέχουν διατάξεις που στοχεύουν στην προστασία των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση. Αναλυτικότερα, και οι 2 οδηγίες περιέχουν διατάξεις που προστατεύουν τα υδατικά συστήματα από άμεσες και έμμεσες (διάχυτες) εισροές με απόρροια την υποβάθμιση των υδατικών συστημάτων (Kostarelos et al., 2015). Συμπληρωματικά, τα κράτη μέλη οφείλουν να καθορίσουν τιμές κατωφλίου και επιτρεπόμενα όρια των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων χρησιμοποιώντας υπολογισμούς βάσει κινδύνου για έναν κατάλογο ρύπων προτεραιότητας (επί του παρόντος 33) και να έχουν εκδώσει ως ελάχιστα πρότυπα περιβαλλοντικής ποιότητας. Έτσι, εάν αποδειχθεί ότι μια ρυπασμένη τοποθεσία είναι επιζήμια για τα κοντινά υδατικά συστήματα, όσον αφορά τους ρύπους προτεραιότητας, η αρμόδια αρχή του κράτους μέλους θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει αυτή τη νομοθεσία για να ασκήσει πίεση σε έναν ιδιοκτήτη τοποθεσίας να καθαρίσει την τοποθεσία. Σε περιπτώσεις επικείμενης απειλής για το περιβάλλον, η αρμόδια αρχή θα μπορούσε να διεξάγει ενέργειες αποκατάστασης και να ζητήσει αποζημίωση από τους ιδιοκτήτες της ρυπασμένης γης. Η νομική αρχή για την προστασία του περιβάλλοντος σε τέτοιες περιπτώσεις ανήκει στην αρμόδια αρχή κάθε κράτους μέλους στην Οδηγία για την Περιβαλλοντική Ευθύνη (2004/35/CE) (Kostarelos et al., 2015).

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, θα πρέπει να δίνεται προτεραιότητα στους ρύπους με βάση την τοξικότητα, την περιβαλλοντική ανθεκτικότητα, την κινητικότητα και τη βιοσυσώρευση. Ο στόχος των σχετικών πολιτικών της ΕΕ είναι να επιτευχθεί μια ποιότητα περιβάλλοντος, όπου τα επίπεδα ανθρωπογενών ρύπων στις τοποθεσίες να μην προκαλούν σημαντικές επιπτώσεις ή κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα. Οι πιο πρόσφατες εξελίξεις στην πολιτική του εδάφους σε ευρωπαϊκό επίπεδο είναι η εισαγωγή της θεματικής στρατηγικής για την προστασία των εδαφών και η προτεινόμενη οδηγία πλαίσιο για το έδαφος. Ενώ η δημιουργία νέων ρυπασμένων τοποθεσιών περιορίζεται από κανονισμούς, υπάρχει πολύ μεγάλος αριθμός τοποθεσιών με υπάρχουσα ρύπανση που παρουσιάζει ανυπολόγιστους κινδύνους και αυτοί οι χώροι

απαιτούν διαχείριση. Αξιοσημείωτο είναι ότι το 2001, ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος σε συνεργασία με ευρωπαϊκές χώρες ανέπτυξε ένα βασικό σύνολο σχετικών με την πολιτική δεικτών, μεταξύ των οποίων ο δείκτης «Πρόοδος στη Διαχείριση Ρυπασμένων Τοποθεσιών» (CSI015) που αφορούσε το έδαφος. Την περίοδο 2011-2012, το Ευρωπαϊκό Κέντρο Δεδομένων Εδάφους (ESDAC) διοργάνωσε παρόμοια εκστρατεία για την ενημέρωση του CSI015. Σαφέστερα, ο δείκτης αυτός ποσοτικοποιεί την πρόοδο στη διαχείριση της τοπικής ρύπανσης, προσδιορίζει τομείς με σημαντική συμβολή στη ρύπανση του εδάφους, ταξινομεί τους κύριους ρύπους και τέλος, αντιμετωπίζει ζητήματα προϋπολογισμών που δαπανώνται για αποκατάσταση και απορρύπανση. Επομένως, ο δείκτης είναι πολύ σημαντικός για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, καθώς παρακολουθεί την πρόοδο στη διαχείριση ρυπασμένων τοποθεσιών και την παροχή δημόσιων και ιδιωτικών χρημάτων για αποκατάσταση. Με αυτόν τον δείκτη, μια σειρά από δραστηριότητες που προκαλούν ρύπανση του εδάφους μπορούν να εντοπιστούν σαφώς σε ολόκληρη την Ευρώπη. Ο δείκτης υποστηρίζει επίσης την εφαρμογή των υφιστάμενων νομοθετικών και ρυθμιστικών πλαισίων (οδηγία για την ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχο της ρύπανσης, οδηγία για την υγειονομική ταφή, οδηγία πλαίσιο για τα ύδατα) καθώς θα οδηγήσουν σε μειωμένη πιθανότητα πρόκλησης νέα ρύπανση του εδάφους. Συμπληρωματικά, οι περιορισμοί που θέτει η νομοθεσία περί ιδιωτικότητας στην Ευρώπη αποτελούν σημαντικό εμπόδιο για τον εντοπισμό και τη διαχείριση της ρύπανσης του εδάφους. Η κατάσταση και τα δεδομένα της ιδιωτικής γης δεν είναι εύκολα προσβάσιμη από τις δημόσιες αρχές με αποτέλεσμα επικείμενες επιπτώσεις για τον ιδιοκτήτη της γης. Επομένως, οι συγκρούσεις μεταξύ του δημοσίου συμφέροντος και της ιδιωτικής ζωής όσον αφορά τη γη και γενικά τα περιβαλλοντικά προβλήματα θα πρέπει να επιλυθούν σε νομική βάση (Panagos et al., 2013).

2.6 Κυπριακή πραγματικότητα

Εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης, δεν υπάρχει καθοδήγηση με τη μορφή ενιαίας Οδηγίας για το Έδαφος και τα κράτη μέλη αφήνονται να θεσπίσουν τη δική τους νομοθεσία που διέπει την ιστορική ρύπανση του εδάφους. Στο νησί της Κύπρου, ένα κράτος μέλος της ΕΕ με μακρά ιστορία εξόρυξης και σημαντικό αριθμό εγκαταλελειμμένων τοποθεσιών εξόρυξης, υπάρχουν αρκετά παραδείγματα με ιστορικές περιοχές με έντονη εξορυκτική δραστηριότητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην Κύπρο, η οποία έγινε μέλος της ΕΕ το 2004, συστήματα επεξεργασίας λυμάτων και χώροι υγειονομικής ταφής έχουν κατασκευαστεί

την τελευταία δεκαετία για συμμόρφωση με αυτές τις Οδηγίες της ΕΕ που περιγράφονται στο κεφάλαιο 2.5.1 Υφιστάμενες Οδηγίες της ΕΕ. Ως αποτέλεσμα, τα αποχετευτικά συστήματα έχουν εγκατασταθεί σε αστικές περιοχές και εγκαθίστανται σε απομακρυσμένες περιοχές. Η ανακύκλωση απορριμμάτων είναι επί του παρόντος διαδεδομένη ενώ στο παρελθόν γινόταν σπάνια και οι εξορυκτικές δραστηριότητες συμμορφώνονται πλέον με την οδηγία της ΕΕ για τα μεταλλεία, περιορίζοντας μελλοντικές ανησυχίες σχετικά με τη ρύπανση του εδάφους. Παρόλο που έχει επιτευχθεί πλήρης συμμόρφωση με τις οδηγίες, αυτές οι περιβαλλοντικές πρόοδοι ήταν αποτέλεσμα της θέσπισης νομοθεσίας καθώς και της επιβολής κανονισμών από την ΕΕ. Σαφέστερα, πλέον επιβάλλονται πρόστιμα σε κράτη μέλη που δεν συμμορφώνονται και αυτό συνέβη και στην Κύπρο. Ασφαλώς, δεν πρέπει να επικρατήσει η αντίληψη ότι οι ενέργειες αντιμετώπισης των ζητημάτων ρύπανσης του εδάφους υλοποιούνται λόγω της νομοθεσίας και την επιβολής προστίμων από την ΕΕ (Kostarelos et al., 2015).

Συμπληρωματικά, το Τμήμα Περιβάλλοντος ταξινόμησε τα εγκαταλελειμμένα μεταλλεία της Κύπρου σε σειρά σημαντικότητας ως προς την επικινδυνότητα και την ανάγκη αποκατάστασης - διαχείρισης. Πιο συγκεκριμένα, η αρμόδια αρχή με βάση τον Νόμο 82(I)/2009 ένταξε όλα τα εγκαταλελειμμένα μεταλλεία στην Κατηγορία Α η οποία χαρακτηρίζεται από 3 επιμέρους παράγοντες. Οι παράγοντες και προϋποθέσεις για ένταξη των εγκαταστάσεων εξορυκτικών αποβλήτων στην Κατηγορία Α είναι: (i) βάσει εκτίμησης κινδύνου (μέγεθος, θέση και περιβαλλοντικές επιπτώσεις) συμπεραίνεται ότι θα προκαλέσουν σοβαρό ατύχημα, λόγω βλάβης ή λανθασμένου χειρισμού, όπως η κατάρρευση σωρού αποβλήτων ή η ρήξη φράγματος (ii) οι εγκαταστάσεις εξορυκτικών αποβλήτων περιέχουν επικίνδυνα απόβλητα και σε ποσότητες που υπερβαίνουν τα όρια (iii) οι εγκαταστάσεις εξορυκτικών αποβλήτων περιέχουν επικίνδυνες ουσίες και σε ποσότητες που υπερβαίνουν τα όρια. Αξιοπρόσεκτο είναι το γεγονός ότι, το εγκαταλελειμμένο μεταλλείο Μαθιάτη ταξινομείται στην Κατηγορία Α βάσει του Νόμου 82(I)/2009 και ο κύριος λόγος ταξινόμησης σε αυτή την κατηγορία είναι η ποιοτική σύσταση των αποβλήτων που υπάρχουν στον χώρο του μεταλλείου (Τμήμα Περιβάλλοντος, 2022).

2.7 Συμπεράσματα Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης

Αναμφισβήτητα, τα εγκαταλειμμένα μεταλλεία διαφέρουν από τοποθεσία σε τοποθεσία. Αποτελούνται κυρίως από ερειπωμένα κτίρια, σωρούς από απορρίμματα και ασταθείς εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται ως χώροι απόρριψης αλλοιωμένων υλικών εκτός εργοταξίου. Άλλα εγκαταλελειμμένα μεταλλεία έχουν υποβληθεί σε μικρά ή μεγάλα προγράμματα αποκατάστασης, σχεδιασμένα για να μειώσουν τις επιβλαβείς επιπτώσεις στο τοπικό περιβάλλον, να βελτιώσουν αισθητικά τη γύρω περιοχή και δυνητικά να επιτρέψουν την εκ νέου ανάπτυξη της εγκαταλελειμμένης τοποθεσίας (Johnson, 2003).

Η ρύπανση από βαρέα μέταλλα αναγνωρίζεται ως ένα ζωτικό ζήτημα για τη γεωργική παραγωγή, την υγεία των τροφίμων, την ποιότητα του εδάφους και γενικά για τα οικοσυστήματα λόγω των τοξικών επιπτώσεων και της ταχείας συσσώρευσης τους στο περιβάλλον. Για την πρόληψη ή τον μετριασμό της ρύπανσης από βαρέα μέταλλα και την εκ νέου βλάστηση του ρυπασμένου εδάφους, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές. Η φυτοαποκατάσταση έχει αποδειχθεί ότι είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για την επαναβλάστηση ρυπασμένου από βαρέα μέταλλα εδάφους με καλή δημόσια αποδοχή και παρουσιάζει ποικίλα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλες φυσικοχημικές τεχνικές. Η εφαρμογή υπερσυσσωρευτών φυτών βαρέων μετάλλων είναι η πιο απλή προσέγγιση για φυτοαποκατάσταση και μέχρι στιγμής έχουν εντοπιστεί εκατοντάδες φυτά με τέτοιες ιδιότητες. Ωστόσο, η φυτοεξυγίανση με αυτούς τους φυσικούς υπερσυσσωρευτές εξακολουθεί να υποφέρει από μερικούς περιορισμούς, καθώς είναι μια χρονοβόρα διαδικασία, η οποία απαιτεί πολύ χρόνο για να αποκατασταθεί το ρυπασμένο με βαρέα μέταλλα έδαφος, ιδιαίτερα σε περιοχές μέτριας και υψηλής ρύπανσης. Αυτό μπορεί εν μέρει να οφείλεται στον αργό ρυθμό ανάπτυξης και στη χαμηλή παραγωγή βιομάζας αυτών των υπερσυσσωρευτών (Yan et al., 2020).

Αφενός, υπάρχει κατάλογος δυνητικά ρυπασμένων τοποθεσιών για την Κύπρο που περιλαμβάνει πολλαπλές τοποθεσίες, αφενός δεν ενσωματώνει το πλήρες μέγεθος των πιθανών ρύπων (όπως κυανιούχα), κάτι που αποδεικνύεται ξεκάθαρα μετά από πιο λεπτομερείς μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από τους Lortzie et al. (2014), Gavriel et al. (2014) και Tsiftes et al. (2010). Έλλειψη νομοθεσίας ή καθοδήγησης που να περιγράφει με σαφήνεια και λεπτομερώς τις παραμέτρους που πρέπει να μελετηθούν σε τέτοιους χώρους συνεπάγεται με ανεπάρκεια δέουσας προσοχής από τους αρμόδιους

φορείς. Επιπλέον, οι τιμές υποβάθρου για τους ρύπους που προκαλούν ανησυχία (ρυπαντές προτεραιότητας) δεν είναι σαφώς καθορισμένες στο νησί (Kostarelos et al., 2015).

Συμπερασματικά, σύμφωνα με όσα έχουν υπογραμμιστεί στο κεφάλαιο 2.5 Διεθνής Πραγματικότητας, διαπιστώνεται ότι μέχρι σήμερα δεν έχουν θεσπιστεί νομικές απαιτήσεις για τη γενική προστασία του εδάφους σε επίπεδο ΕΕ. Επομένως, τέτοιες πολιτικές ενδέχεται να έχουν ήδη θεσπιστεί σε επίπεδο χώρων ως αυτόνομα σύνολα (Ferguson, 1999). Αναμφίβολα, το νομικό πλαίσιο της Κύπρου σχετικά με περιβαλλοντικά ζητήματα έχει πρόσφατα ενισχυθεί τόσο μετά την ένταξη της Κύπρου στην ΕΕ όσο και μέσω των προσπαθειών για ενίσχυση της εσωτερικής νομοθεσίας. Παράδειγμα αποτελεί η πρόσφατη νομοθεσία που ψηφίστηκε από το Κυπριακό Κοινοβούλιο που ρυθμίζει την εφαρμογή γεωλογικών ερευνών και τη χρήση κρατικών γεωτρήσεων υπόγειων υδάτων (Ν. 140(I)/2013) η οποία ρυθμίζει επίσης χώρους γεωλογικής σημασίας ή γεωλογικούς χώρους αρχαιολογικής σημασίας. Ο νόμος για τον έλεγχο της ρύπανσης των υδάτων και του εδάφους {106(I)/2002, 160(I)/2005, 181(I)/2013} μπορεί επίσης να θεωρηθεί εύλογο νομικό πλαίσιο για τον έλεγχο της ρύπανσης των υδάτων που σχετίζεται με το έδαφος (Kostarelos et al., 2015). Επιπρόσθετα, ορισμένες χώρες επιβάλλουν στις εξορυκτικές εταιρείες να αποκαθιστούν ή να περιορίζουν τους σωρούς απορριμμάτων, ενώ άλλες δεν έχουν τέτοιες απαιτήσεις και εξακολουθούν να επιτρέπουν την απόρριψη των απορριμμάτων σε υδάτινα και χερσαία συστήματα, κλιμακώνοντας έτσι το μείζον πρόβλημα χιλιάδων εγκαταλελειμμένων τοποθεσιών απορριμμάτων μεταλλείων παγκοσμίως (Mendez & Maier, 2008).

Λόγω του μικρού μεγέθους σωματιδίων, των περιορισμένων ποσοτήτων βασικών θρεπτικών συστατικών και οργανικής ύλης, της υψηλής περιεκτικότητας σε μέταλλα, του όξινου pH και της έλλειψης κανονικής δομής του εδάφους, αυτά τα απορρίμματα μεταλλείων γενικά δεν υποστηρίζουν την ανάπτυξη των φυτών ή μια κανονική μικροβιακή κοινότητα του εδάφους. Η αδυναμία υποστήριξης των φυτών επιδεινώνεται σε ξηρά περιβάλλοντα λόγω των κλιματικών συνθηκών και των υψηλών επιπέδων αλατότητας. Διάφορες μέθοδοι για την υποβοηθούμενη ανάπτυξη φυτών σε σωρούς απορριμμάτων και άλλες ρυπασμένες με μέταλλα τοποθεσίες σε ξηρά περιβάλλοντα έχουν προταθεί για την ελαχιστοποίηση της διασποράς των ρύπων μέσω της

επαναβλάστησης (Valentín-Vargas et al., 2014). Η επαναβλάστηση των απορριμμάτων των μεταλλείων μετά την εξόρυξη είναι πλέον κοινή πρακτική, ως μέρος των στρατηγικών φυτοαποκατάστασης των μεταλλείων. Η πλειονότητα αυτών των στρατηγικών αναβλάστησης συχνά κατευθύνεται στη δημιουργία μόνιμης φυτικής κάλυψης, για σταθεροποίηση και για αισθητικούς λόγους μόλις σταματήσει η εξόρυξη. Η επιλογή των κατάλληλων φυτών είναι συνήθως βασισμένη σε συγκεκριμένη τοποθεσία ενδιαφέροντος και είναι επηρεασμένη από το τοπικό κλίμα και τις αισθητικές προτιμήσεις των ρυθμιστικών αρχών. Τα εγγενή ή τοπικά εγκλιματισμένα φυτά επιλέγονται συνήθως για την επίτευξη των διπλών στόχων της μακροπρόθεσμης φυτικής κάλυψης και της αποκατάστασης μιας οικολογικής κατάστασης παρόμοιας με αυτή που επικρατούσε πριν την έναρξη της εξορυκτικής δραστηριότητας (Schroeder et al., 2005; Mendez et al., 2007). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ιδιότητες της λυματολάσπης, του biochar και των βιοστερεών είναι παρόμοιες με άλλες οργανικές τροποποιήσεις, αλλά ορισμένες πτυχές περιορίζουν τη χρήση της (Tsadilas & Shaheen, 2013). Μεταξύ αυτών, η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών και παρασίτων, τα οποία επιβιώνουν μετά τη διαδικασία απομάκρυνσης θέτει σε κίνδυνο τους ζωντανούς οργανισμούς. Η κομποστοποίηση λύνει αυτό το μειονέκτημα και παράγει ένα σταθερό προϊόν, απαλλαγμένο από παθογόνους παράγοντες, ενώ είναι φθηνό και ανανεώσιμο. Πρόκειται για μια πολύτιμη πηγή θρεπτικών συστατικών και οργανικής ουσίας, τα οποία μπορούν να αντικαταστήσουν τα ανόργανα λιπάσματα (Zubillaga & Lavado, 2002).

Κεφάλαιο 3

Μεθοδολογία

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρεται εκτενέστερα το πειραματικό στάδιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας που είχε ως στόχο την εφαρμογή κομπόστ σε απορρίμματα εγκαταλελειμμένου μεταλλείου για την επιτυχή φύτευση και ανάπτυξη των ειδών *Medicago sativa* και *Pinus brutia*.

3.1 Σκοπός – Στόχοι

Με στόχο την βελτίωση των ρυπασμένων εδαφών ενός εγκαταλελειμμένου μεταλλείου, σχεδιάστηκε το πείραμα με κύριο στόχο την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της χρήσης κομπόστ σε συνδυασμό με το υφιστάμενο δείγμα εξορυκτικών αποβλήτων (tailings) που βρίσκεται στην περιοχή του εγκαταλελειμμένου μεταλλείου του Βόρειου Μαθιάτη.

Συμπληρωματικά, επιπλέον στόχος του πειράματος ήταν η εύρεση της κατάλληλης συγκέντρωσης αναμειγμένου κομπόστ με tailings για την επακόλουθη αύξηση και ανάπτυξη των ειδών που φύονται φυσικά σε ρυπασμένα εδάφη από βαρέα μέταλλα.

Επιπρόσθετα, με γνώμονα το ποσοστό αποδοτικότητας της ανάμειξης tailings με κομπόστ που θα εξαχθεί ως αποτέλεσμα από το πείραμα, μπορεί δυνητικά να προταθεί ως μέτρο βελτίωσης της βλαστικότητας με μακροπρόθεσμο στόχο την φυτοαποκατάσταση του περιβάλλοντος σε άλλα εγκαταλελειμμένα μεταλλεία με παρόμοιες περιβαλλοντικές συνθήκες.

3.2 Ερευνητικά ερωτήματα

- Ποια η ποιοτική κατάσταση των εδαφών στα εγκαταλελειμμένα μεταλλεία;
- Η προσθήκη κομπόστ σε tailings έχει την ικανότητα να προωθήσει την βλάστηση, την ανάπτυξη και την αύξηση τους είδους *Medicago sativa*;
- Η προσθήκη κομπόστ σε tailings αποτελεί αποτελεσματική πρακτική για την αύξηση του ύψους της τραχείας πεύκης; Αν ναι, σε τι ποσοστό;
- Σε ποια αναλογία tailings με κομπόστ, η ανάπτυξη και αύξηση των ειδών είναι πιο αποδοτική;
- Μπορεί τελικά η εφαρμογή κομπόστ να χρησιμοποιηθεί για την απορρύπανση των εγκαταλελειμμένων μεταλλείων;
- Πως το χαμηλό pH και οι υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων των tailings επηρεάζει τα είδη;
- Η μικροβιακή αναπνοή που λαμβάνει χώρα στο έδαφος με ποιο τρόπο επηρεάζεται με την προσθήκη κομπόστ;
- Η πρακτική της ανάμειξης κομπόστ με tailings μπορεί να προταθεί ως in situ μέτρο αποκατάστασης σε περιοχές με εγκαταλελειμμένα μεταλλεία;

3.3 Σχεδιασμός

- Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Επιχειρείται η συγκέντρωση όλης της πληροφορίας για το εγκαταλελειμμένο μεταλλείο του Βόρειου Μαθιάτη, τα υφιστάμενα μέτρα αποκατάστασης που πραγματοποιούνται και τέλος γίνεται αναφορά στη χλωρίδα που φύεται φυσικά στην περιοχή. Για την αναζήτηση της σχετικής με την διπλωματική εργασία βιβλιογραφίας χρησιμοποιήθηκαν έγκυρες διεθνείς βάσεις δεδομένων.

- Επιλογή κατάλληλης μεθόδου για αποκατάσταση

Ποικίλες μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση του περιβάλλοντος σε χώρους όπου βρίσκονται εγκαταλελειμμένα μεταλλεία και το έδαφος καταπονείται λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων. Οι πλείστες μέθοδοι είναι δαπανηρές και πολύ μακριά από την βέλτιστη απόδοση τους, άλλες μέθοδοι είναι τεχνικά δύσκολες και χρονοβόρες. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη τα πιο πάνω επιλέχθηκε η πρακτική μέθοδος

ανάμειξης tailings με συγκεκριμένη ποσότητα κομπόστ (εδαφοβελτιωτικό) και μεταφορά του δείγματος σε θερμοκήπιο με ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Σκοπός της πρακτικής αυτής είναι η αξιολόγηση της αποδοτικότητας της χρήσης κομπόστ για την αύξηση και ανάπτυξη της χλωρίδας της περιοχής.

- Επιλογή κατάλληλου φυτικού είδους

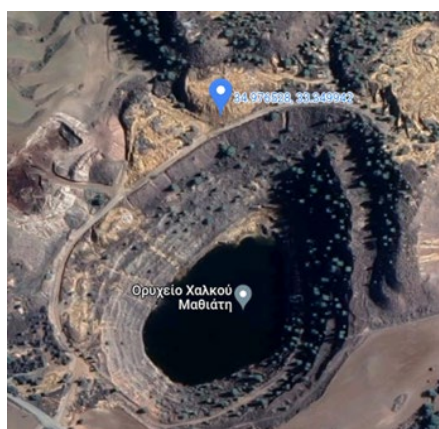
Η μηδική (*Medicago sativa*) είναι πολύ ταχέως αναπτυσσόμενη, με πολύ βαθιές ρίζες και αποτελεί φυτό υψηλής παραγωγής βιομάζας που χρησιμοποιείται για φυτοαποκατάσταση και πρόσληψη τοξικών μετάλλων (Jadia & Fulekar, 2008). Επιπρόσθετα, τα φυτά πεύκου (*Pinus brutia*) συμπεριλήφθηκαν στο πείραμα διότι σύμφωνα με την βιβλιογραφία παρατηρούνται πεύκα σε περιοχές όπου βρίσκονται εγκαταλελειμμένα μεταλλεία στην Κύπρο (Stylianou et al., 2020) και χρησιμοποιούνται ευρέως για οικολογική αποκατάσταση (Fuentes et al., 2007; Peralta-Videa et al., 2002).

- Δειγματοληψία πεδίου

Αρχικά, για την διεκπεραίωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε ένα εγκαταλελειμμένο μεταλλείο της Κύπρου όπου παρατηρούνται ποικίλα περιβαλλοντικά προβλήματα λόγω της έλλειψης νομοθεσίας για την αποκατάσταση του. Αναλυτικότερα, επιλέχθηκε το εγκαταλελειμμένο μεταλλείο του Βόρειου Μαθιάτη με το όνομα «Κοκκινοαντώνης», το οποίο εγκαταλείφθηκε από το 1987, αφού αποτελεί ανοικτό θειούχο μεταλλείο χωρίς περίφραξη ή νομοθεσία που να μην επιτρέπει την είσοδο στον χώρο του μεταλλείου (βλ. Εικόνα 2). Επιπλέον, για την επιλογή του συγκεκριμένου μεταλλείου συνέβαλε το γεγονός ότι σύμφωνα με το Τμήμα Περιβάλλοντος ταξινομήθηκε στην Κατηγορία Επικινδυνότητας Α που σημαίνει ότι τα απορρίμματα αποτελούν τεράστια πηγή ρύπανσης για το περιβάλλον και οι σωροί χρήζουν άμεσης διαχείρισης. Σε επόμενο στάδιο, μετά από επί τόπου παρατήρηση της περιοχής μελέτης επιλέχθηκε να συλλεχθεί υφιστάμενο έδαφος (tailings) από συγκεκριμένη τοποθεσία όπου δεν φύτευε κανένα φυτικό είδος (βλ. Εικόνα 3 & 4). Ο λεπτομερής τρόπος δειγματοληψίας αναφέρεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.6.1 Δειγματοληψία πεδίου.



Εικόνα 2: Εγκαταλελειμμένο μεταλλείο Βόρειου Μαθιάτη.



Εικόνα 3 & 4: Ακριβής θέση δειγματοληψίας.

- Πείραμα σε γλάστρες

Εν πρώτοις, η υλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας επιλέχθηκε να διεξαχθεί σε θερμοκήπιο και γλάστρες έτσι ώστε οι συνθήκες να είναι ελεγχόμενες (πχ. θερμοκρασία και ποσότητα νερού ανάλογα με τις ανάγκες των φυτών). Κατά δεύτερο, προτιμήθηκαν να χρησιμοποιηθούν τα είδη *Medicago sativa* και *Pinus brutia*, τα οποία παρουσιάζουν ανοχή σε τοξικά περιβάλλοντα και φύονται φυσιολογικά σε χώρους εγκαταλελειμμένων μεταλλείων. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε ανάμειξη κομπόστ με τα δείγματα που συλλέχθηκαν σε αναλογίες 0, 10, 25 και 50% για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότερης ποσότητας κομπόστ που χρειάζεται για την επιτυχή βλαστικότητα και ανάπτυξη των ειδών. Σε συνέχεια, οι γλάστρες κατανεμήθηκαν τυχαία σε 5 blots (βλ. Εικόνα 5).



Εικόνα 5: Τυχαία κατανομή γλαστρών σε 5 blots.

- Παρακολούθηση γλαστρών

Οι γλάστρες με τα φυτεμένα είδη παρακολουθούνταν συχνά έτσι ώστε να καταγράφονται οποιεσδήποτε αλλαγές. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφηκαν τα ποσοστά βλαστικότητα της κάθε γλάστρας, η αύξηση του ύψους των φυτών *Pinus brutia*, η αύξηση του ύψους του *Medicago sativa* μετά την βλάστηση των σπόρων, την επικείμενη φυτοτοξικότητα της μηδικής αφού ο βλαστός και τα φύλλα ορισμένων φυτών μετατράπηκαν σε κίτρινα.

- Πειράματα σε εργαστήριο

Τα πειράματα στο εργαστήριο διεξάχθηκαν με σκοπό την κατανόηση της επίδρασης των βαρέων μετάλλων στο έδαφος και στα φυτά και την επαλήθευση της θεωρίας. Σαφέστερα, διενεργήθηκαν ερευνητικές μέθοδοι κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες για την μέτρηση της ικανότητας συγκράτησης νερού στο έδαφος (SWHC), της εδαφικής αναπνοής, καθορισμός pH και EC, μέτρηση βιομάζας και επίδραση φυτοτοξικότητας στα φυτά.

3.4 Μέθοδος συλλογής δεδομένων

Αναντίρρητα, η εξόρυξη ορυκτών και μετάλλων είναι γνωστή από την αρχαιότητα. Ωστόσο, η εξορυκτική βιομηχανία γνώρισε τεράστια ανάπτυξη κατά τους τελευταίους αιώνες, καθώς υπήρξε η βασική κινητήρια δύναμη πίσω από τη βιομηχανική και

οικονομική ανάπτυξη των κοινωνιών. Εκτός από την εποικοδομητική συμβολή τους στην ανθρώπινη ανάπτυξη, οι εξορυκτικές δραστηριότητες δημιούργησαν επίσης τεράστιες ποσότητες απορριμμάτων, με την μέση ποσότητα εκμεταλλεύσιμου μεταλλεύματος να είναι μόνο το 1–3% του μεταλλεύματος που εξορύσσετε. Μολαταύτα, τα απορρίμματα αποτελούνται από μη εκμεταλλεύσιμα λεπτόκοκκα στερεά υποπροϊόντα που περιέχουν μικρές ποσότητες πολύτιμων ορυκτών ή μετάλλων, όξινα υλικά πλούσια σε θειούχα και θειικά άλατα, βαρέα μέταλλα και χαρακτηρίζονται από χαμηλό pH. Συνήθως εναποτίθενται χωρίς επεξεργασία με απόρροια να σχηματίζονται τεράστιοι σωροί απορριμμάτων που καλύπτουν σημαντικές περιοχές παγκοσμίως (Christou et al., 2017). Η ρύπανση προερχόμενη από τα απορρίμματα μεταλλείων με επακόλουθη υποβάθμιση του εδάφους και των υδάτων με μεγάλες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων που εισάγονται είτε από γεωλογικές είτε από ανθρωπογενείς πηγές, αποτελούν σημαντικό παγκόσμιο περιβαλλοντικό πρόβλημα και επηρεάζουν αρνητικά την δημόσια υγεία (Gündüz et al., 2016). Οι ενέργειες διαχείρισης που στοχεύουν στην πρόληψη ή τον μετριασμό των κινδύνων που προκαλούνται από τα απορρίμματα μεταλλείων για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία λόγω ρύπανσης του περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένης της σταθεροποίησης των απορριμμάτων και της αποκατάστασης των ρυπασμένων περιοχών, είναι υψίστης σημασίας (Hadjipanagiotou et al., 2020).

Σκοπός λοιπόν της διπλωματικής εργασίας ήταν η εφαρμογή κομπόστ με συγκεκριμένη αναλογία σε απορρίμματα μεταλλείου για την αποδοτική αποκατάσταση τέτοιων ρυπασμένων εδαφών με φυτική κάλυψη (*Medicago sativa* και *Pinus brutia*). Το πείραμα έλαβε χώρα σε γλάστρες και σε θερμοκήπιο με ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Αξίζει να σημειωθεί ότι για να καταστεί εφικτός ο σκοπός της εργασίας πραγματοποιήθηκε συλλογή δεδομένων μετά από εκτενή βιβλιογραφική ανάλυση των πρακτικών που χρησιμοποιούνται για κάθε πείραμα.

3.4.1 Ποσοτική μεθοδολογία

Οι πειραματικές διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν είχαν στόχο την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της εφαρμογής κομπόστ σε απορρίμματα μεταλλείου. Οι πειραματικές μετρήσεις και τα εξαγόμενα αποτελέσματα μετατράπηκαν σε ποσοτικά και αριθμητικά αποτελέσματα με την χρήση μαθηματικών μοντέλων και εξισώσεων από την

διεθνή βιβλιογραφία. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται στο κεφάλαιο 3.6 Πειραματική Διαδικασία.

3.4.2 Ποιοτική μεθοδολογία

Εν πρώτοις, υλοποιήθηκε η συγκέντρωση όλης της πληροφορίας για την κυπριακή εξορυκτική δραστηριότητα και για τα μεταλλεία της Κύπρου. Ακολούθως, δεδομένα για την ρύπανση των εγκαταλελειμμένων μεταλλείων καταγράφηκαν και διεξάχθηκε βιβλιογραφική ανάλυση των διαδικασιών αποκατάστασης με φυτική κάλυψη που συμβαίνουν σε παγκόσμιο επίπεδο. Σαφέστερα, για την ολοκλήρωση της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, πραγματοποιήθηκε αναζήτηση πρωτογενών ερευνών μέσα από τις έγκυρες ηλεκτρονικές βάσεις δεδομένων EBSCO, Science Direct, Google Scholar και Scopus. Η αναζήτηση έγινε με τη χρήση των σχετικών με τη βιβλιογραφική ανασκόπηση λέξεων κλειδιών όπως Cyprus, mines, tailings improvement, fertility, compost, plant growth. Επιπλέον, ανευρέθηκαν άρθρα με έμφαση στην πιο πρόσφατη βιβλιογραφία, συνεπώς συγκεντρώθηκε όλη η ανανεωμένη πληροφορία που υπάρχει μέχρι στιγμής.

3.5 Έννοιες και θέματα

- Βλαστικότητα

Η βλάστηση είναι μια πολύπλοκη διαδικασία κατά την οποία ο σπόρος πρέπει να ανακάμψει γρήγορα φυσικά από την ξήρανση ωρίμανσης, να επαναλάβει μια σταθερή ένταση μεταβολισμού, να ολοκληρώσει βασικά κυτταρικά συμβάντα για να επιτρέψει την ανάπτυξη του εμβρύου και να προετοιμαστεί για την επακόλουθη ανάπτυξη δενδρυλλίων (Nonogaki et al., 2010). Η βλάστηση ξεκινά με την πρόσληψη νερού από τον σπόρο (ρόφηση) και τελειώνει με την εμφάνιση του εμβρυϊκού άξονα, συνήθως της ρίζας, μέσω των δομών που το περιβάλλουν. Η ορατή ένδειξη ότι η βλάστηση έχει ολοκληρωθεί είναι όταν η ρίζα αναδύεται από τους ιστούς που το περικλείουν. Αυτό το σημείο σηματοδοτεί ένα ξεκάθαρο τέλος στη βλάστηση και την έναρξη της ανάπτυξης των φυταρίων. Συμπληρωματικά, ένα θεμελιώδες μέτρο της βλαστικής ικανότητας ενός πληθυσμού σπόρων είναι το ποσοστό των σπόρων που έχουν ολοκληρώσει τη βλάστηση σε μια δεδομένη στιγμή (Bewley et al., 2013).

- Ικανότητα συγκράτησης νερού στο έδαφος (SWHC)

Το SWHC περιγράφει τη μέγιστη ποσότητα νερού που ένα έδαφος μπορεί να απορροφήσει και να διατηρήσει στη δομή του. Άλλοι κοινοί όροι που χρησιμοποιούνται εναλλακτικά στη βιβλιογραφία είναι η ικανότητα απορρόφησης νερού, η ικανότητα πρόσληψης νερού, η ικανότητα ενυδάτωσης με νερό και η ικανότητα δέσμευσης νερού (Schmitz et al., 2021). Το καθεστώς των υδάτων του εδάφους αναγνωρίζεται ως ένας από τους πιο σημαντικούς εδαφικούς παράγοντες για την ανάπτυξη των φυτών, που επηρεάζει την κατανομή άνθρακα, τη μικροβιακή δραστηριότητα, τον κύκλο των θρεπτικών ουσιών και τον ρυθμό της φωτοσύνθεσης. Το νερό που συγκρατείται στο έδαφος είναι σε θέση να αντισταθμίσει την έλλειψη βροχής κατά τις ξηρές περιόδους του έτους. Επιπρόσθετα, η μέγιστη ποσότητα νερού που αποθηκεύεται στο έδαφος και είναι διαθέσιμη για τα φυτά αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της ικανότητας του εδάφους να παρέχει νερό για την ανάπτυξη των φυτών. Υπολογίζεται από την ικανότητα συγκράτησης νερού του εδάφους (SWHC), η οποία ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της περιεκτικότητας σε νερό στην χωρητικότητα του τοπίου και του σημείου μαρασμού (καθορίζεται σε cm νερού για ένα έδαφος δεδομένου βάθους) (Piedallu et al., 2011).

- Εδαφική αναπνοή – Μικροβιακή αναπνοή

Η αναπνοή του εδάφους είναι μια διαδικασία του οικοσυστήματος που απελευθερώνει διοξείδιο του άνθρακα από το έδαφος με την αναπνοή των ριζών, τη μικροβιακή αποσύνθεση των απορριμμάτων και την οργανική ύλη του εδάφους και την αναπνοή της πανίδας που ζει στο έδαφος. Ως βασική διαδικασία του οικοσυστήματος, η αναπνοή του εδάφους σχετίζεται με την παραγωγικότητα του οικοσυστήματος, τη γονιμότητα του εδάφους και τους περιφερειακούς και παγκόσμιους κύκλους άνθρακα. Συμπληρωματικά, οι εδαφικές διαδικασίες ασκούν μεγάλο έλεγχο στον κύκλο του άνθρακα. Η αναπνοή του εδάφους είναι η κύρια διαδρομή μέσω της οποίας το CO₂ που παράγεται από τα χερσαία φυτά να επιστρέφει στην ατμόσφαιρα. Η αναπνοή του εδάφους αποτελείται κυρίως από ριζική αναπνοή (και σχετικούς μυκόρριζους μύκητες) και την μικροβιακή αναπνοή (Xu et al., 2016).

- Ξηρή και Νωπή Βιομάζα

Η εκτίμηση της φυτικής βιομάζας αποτελεί κεντρικό μέρος πολλών οικολογικών ερευνών. Για παράδειγμα, η φυτική βιομάζα χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει μεγακοινότητες και οικοσυστήματα, για τη μέτρηση της παραγωγικότητας, της πίεσης που ασκεί η βόσκηση και πολλών άλλων διαδικασιών. Γενικά, η βιομάζα φυτών εκτιμάται με καταστροφική συγκομιδή τυχαία επιλεγμένων φυτών και στη συνέχεια ζύγισμα των φυτών σε νωπή και σε ξηρή φάση. Επίσης, ο υπολογισμός της βιομάζας είναι το προτιμώμενο μέτρο κατά την αξιολόγηση της αφθονίας των φυτικών ειδών, του πλούτου των ειδών και της ομοιότητας των ειδών (Jonasson, 1988).

- pH και EC

Στο φυσικό περιβάλλον, το pH του εδάφους έχει τεράστια επίδραση στις βιογεωχημικές διεργασίες του εδάφους. Ως εκ τούτου, το pH του εδάφους περιγράφεται ως η «κύρια μεταβλητή του εδάφους» που επηρεάζει μυριάδες βιολογικές, χημικές και φυσικές ιδιότητες του εδάφους και διαδικασίες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών και την απόδοση βιομάζας. Το pH του εδάφους ελέγχει τη διαλυτότητα, την κινητικότητα και τη βιοδιαθεσιμότητα των ιχνοστοιχείων, τα οποία καθορίζουν τη μετατόπισή τους στα φυτά. Επιπλέον, το pH έχει συνέπειες για την ανακύκλωση θρεπτικών ουσιών και τη διαθεσιμότητα για τη φυτική παραγωγή, τη διανομή επιβλαβών ουσιών στο περιβάλλον και την απομάκρυνση ή τη μετατόπισή τους. Αυτός ο λειτουργικός ρόλος του pH στη βιογεωχημεία του εδάφους έχει αξιοποιηθεί για την αποκατάσταση των ρυπασμένων εδαφών και τον έλεγχο της μετατόπισης και μετατροπής των ρύπων στο περιβάλλον (Neina, 2019).

Η ποσοτική ανάλυση των διαλυτών αλάτων σε εδάφη και σε υπόγεια ύδατα είναι μία από τις βασικές διαδικασίες για τη μελέτη της δυναμικής των αλάτων του εδάφους και την αξιολόγηση της αλατότητας του εδάφους. Η συνολική περιεκτικότητα σε αλάτι και η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) ενός εκχυλίσματος εδάφους είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες παράμετροι για την περιγραφή της αλατότητας του εδάφους. Το EC_{1:5} το οποίο είναι το EC ενός εκχυλίσματος εδάφους σε διάλυμα 1 μέρους εδάφους αραιωμένο με 5 μέρη νερού, είναι μια ολοκληρωμένη παράμετρος που αντικατοπτρίζει πληροφορίες για την αποτελεσματική αλατότητα του εδάφους κάτω από μια συγκεκριμένη περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους (Liu et al., 2006).

- Φυτοτοξικότητα

Οι φυτοτοξικές επιδράσεις που παράγονται από τα οργανικά απόβλητα είναι το αποτέλεσμα ενός συνδυασμού πολλών παραγόντων. Αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν την παρουσία βαρέων μετάλλων, αμμωνίας, αλάτων και οργανικών οξέων χαμηλού μοριακού βάρους τα οποία έχουν αποδειχθεί ότι έχουν ανασταλτικά αποτελέσματα για τα φυτικά είδη (Fuentes et al., 2004). Πολλά ιχνοστοιχεία (όπως Cu, Mn και Zn) είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη φυτών και ζώων, αλλά είναι τοξικά σε υψηλές συγκεντρώσεις. Βασικοί παράγοντες της διακύμανσης της φυτοτοξικότητας αποτελεί η εγγενής τοξικότητα των διάφορων ιχνοστοιχείων, η ευαισθησία και οι ανοχές που παρουσιάζουν τα φυτά στις φυτοτοξικές διαδικασίες (Kopittke et al., 2010).

- Δείκτης βλαστικότητας (Germination Index – GI)

Ο δείκτης βλαστικότητας (GI) είναι ένας ευρέως χρησιμοποιούμενος, ευαίσθητος και έγκυρος βιολογικός δείκτης για την αξιολόγηση της ωριμότητας και της φυτοτοξικότητας των φυτών. Η δραστηριότητα διαφόρων μικροβιακών πληθυσμών, οι περιβαλλοντικές παράμετροι, οι φυτοτοξίνες και τα μικρόβια έχουν σημαντική επίδραση στο GI. Ο δείκτης βλαστικότητας, ο οποίος προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Zucconi το 1981 και εφαρμόστηκε ευρέως αργότερα, χρησιμοποιείται συχνά για την αξιολόγηση της φυτοτοξικότητας. Επιπρόσθετα, για τον υπολογισμό της επίδρασης της φυτοτοξικότητας και επομένως τον υπολογισμό του δείκτη βλαστικότητας μετρείται ο ρυθμός βλάστησης των σπόρων και το μήκος των ριζών σε δεδομένο χρονικό διάστημα (Wang et al., 2022).

3.6 Πειραματική Διαδικασία

Το πειραματικό στάδιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας έγινε με βάση τον στρατηγικό σχεδιασμό που εμφανίζεται στο κεφάλαιο 3.3 Σχεδιασμός.

3.6.1 Δειγματοληψία πεδίου

Εν πρώτοις, συλλέχθηκε δείγμα εξορυκτικών αποβλήτων (tailings) από το εγκαταλελειμμένο μεταλλείο του Βόρειου Μαθιάτη και πιο συγκεκριμένα το έδαφος χαρακτηρίστηκε ως θειούχος πυρίτης. Σαφέστερα, το δείγμα από τους σωρούς εξορυκτικών αποβλήτων μετά από επί τόπου παρατήρηση χαρακτηρίστηκε ως

αργιλώδες υλικό το οποίο αποτελείται από άργιλο με κιτρινωπές, γκριζωπές, κοκκινωπές αποχρώσεις και από θραύσματα πετρώματος λάβας. Επιπλέον, το αργιλώδες υλικό διακρίνεται ως έντονα λειμωνιτικό και αιματιστικό και παράλληλα βρέθηκε διάσπαρτος λεπτόκοκκος πυρίτης. Παρατηρήθηκαν επίσης οξειδία μαγγανίου σε θραύσματα από πέτρωμα λάβας, θραύσματα πετρώματος λάβας με διάσπαρτο λεπτόκοκκο πυρίτη και τέλος θραύσματα γκρι χρώματος έντονα πυριτιωμένης λάβας. Συμπληρωματικά, οι σωροί των μπάζων είναι μαλακοί το χειμώνα όταν είναι υγροί και πολύ σκληροί το καλοκαίρι όταν είναι ξηροί.

Για την υλοποίηση του πειράματος, επιλέχθηκε έδαφος το οποίο φαίνεται ότι δεν φέρει καθόλου βλάστηση και δεν έχει την ικανότητα να φυτρώσει σχεδόν τίποτα σε αντίθεση με το πετρώδες έδαφος που γειτνιάζε με την περιοχή ενδιαφέροντος. Επίσης, στο μεταλλείο παρατηρήθηκε το φαινόμενο της OAM λόγω οξείδωσης του πυρίτη. Με την βοήθεια του Google Maps βρέθηκε η ακριβής τοποθεσία της συλλογής του δείγματος η οποία είναι 34.976528, 33.349942. Στην συνέχεια, το δείγμα τοποθετήθηκε σε κάδους των 50L και 7L και μεταφέρθηκε στο θερμοκήπιο του Ινστιτούτου Γεωργικών Ερευνών έτσι ώστε οι περιβαλλοντικές συνθήκες να είναι ελεγχόμενες. Ακολούθως, το δείγμα αναμείχθηκε με κομπόστ σύμφωνα με τις επιθυμητές συγκεντρώσεις και μετά τοποθετήθηκε σε γλάστρες των 7L. Σαφέστερα, για την συγκέντρωση των 10% κομπόστ αναμείχθηκαν 50L δείγματος μεταλλείου και 5L κομπόστ και το αναμειγμένο πλέον δείγμα τοποθετήθηκε σε συνολικά 6 γλάστρες. Για την συγκέντρωση 25% κομπόστ ανακατεύτηκαν 50L εδάφους μεταλλείου και 17L κομπόστ για 7 γλάστρες των 7L. Τέλος, για την συγκέντρωση 50% αναμείχθηκαν 50L εδάφους μεταλλείου και 50L κομπόστ και μεταφέρθηκαν σε γλάστρες των 7L. Επιπλέον, για την συγκέντρωση κομπόστ 0% δεν χρησιμοποιήθηκε καθόλου κομπόστ και οι γλάστρες περιείχαν μόνο τα tailings του μεταλλείου, ενώ για το control συλλέχθηκε γόνιμο χώμα από άλλο θερμοκήπιο του Ινστιτούτου Γεωργικών Ερευνών (βλ. Πίνακας 2) . Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι μεγάλες πέτρες των tailings έχουν αφαιρεθεί πριν την ανάμειξη του δείγματος με το κομπόστ (βλ. Εικόνα 6). Κατόπιν, δημιουργήθηκαν 5 blots με τις γλάστρες από κάθε συγκέντρωση να κατανέμονται τυχαία. Κάποιες γλάστρες, δεν συμπεριλήφθηκαν στα blots και αφέθηκαν για εργαστηριακές μετρήσεις όπως η μέθοδος της εκχύλισης. Σε επόμενο στάδιο, σε όλες τις γλάστρες φυτεύτηκαν συνολικά 20 σπόροι *Sinapis alba* όμως παρατηρήθηκε ότι δεν φύτεψαν. Συνεπώς, με γνώμονα την γρήγορη βλαστικότητα επιλέχθηκε το φυτικό είδος *Medicago sativa* για την διεκπεραίωση της διπλωματικής εργασίας. Κατόπιν, σε όλες τις

γλάστρες φυτεύτηκαν 20 σπόροι *Medicago sativa* με σκοπό την επιτυχή βλαστικότητα του είδους σε tailings με την προσθήκη εδαφοβελτιωτικού κομπόστ. Συγχρόνως, λήφθηκαν φυτάρια πεύκων *Pinus brutia* από το φυτώριο του Τμήματος Δασών και τοποθετήθηκαν σε γλάστρες με tailings και κομπόστ ανάλογα με τις επιθυμητές συγκεντρώσεις. Ειδικότερα, σε 3 γλάστρες τα φυτά τραχείας πεύκης φυτεύτηκαν σε 0% κομπόστ, σε 5 γλάστρες τοποθετήθηκαν 50% κομπόστ και 1 γλάστρα αφέθηκε για control (βλ. Εικόνα 7). Αξιοσημείωτο είναι, ότι το πείραμα έλαβε χώρα σε θερμοκήπιο με ελεγχόμενες θερμοκρασίες και οι γλάστρες ποτίζονταν ανάλογα με τις ανάγκες των ειδών από καταρτισμένο λειτουργό του Ινστιτούτου Γεωργικών Ερευνών. Σε τελικό στάδιο, μετά την επιτυχή φύτευση των φυτών του είδους *Medicago sativa* έγινε αραίωση (αφέθηκαν 3 φυτά σε κάθε γλάστρα) με σκοπό την μείωση του ανταγωνισμού των φυτών που αυξάνονται και αναπτύσσονται στο ίδιο ενδιαίτημα.

Πίνακας 2: Ποσότητα ανάμειξης tailings με κομπόστ και αριθμός γλαστρών.

	Γλάστρες (7L)	Tailings (L)	Compost (L)
0%	8	50	-
10%	6	50	5
25%	7	50	17
50%	10	50	50
Control	6	-	-



Εικόνα 6: Πέτρες που αφαιρέθηκαν πριν την ανάμειξη tailings με κομπόστ.



Εικόνα 7: Φυτά *Pinus brutia* σε γλάστρες.

3.6.2 Soil Water Holding Capacity (SWHC) / Ικανότητα συγκράτησης νερού στο έδαφος

Αρχικά, για την μέτρηση της ικανότητα συγκράτησης νερού εδάφους (SWHC) που συλλέχθηκε από το εγκαταλελειμμένο μεταλλείο του Βόρειου Μαθιάτη, τα δείγματα εδάφους με την ανάλογη ποσότητα κομπόστ αφέθηκαν στο θερμοκήπιο σε σακούλες έτσι ώστε να χάσουν όλη την υγρασία που περιείχαν. Ακολούθως, τα δείγματα μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο και κοσκινίστηκαν με την χρήση κόσκινου για την μετέπειτα επεξεργασία τους (βλ. Εικόνα 8). Στην συνέχεια, με την βοήθεια ζυγαριάς ακριβείας ζυγίστηκαν τα δείγματα που χρειάζονταν και μεταφέρθηκαν σε ειδικό δοχείο αφού πρώτα τοποθετήθηκε στο δοχείο διηθητικό χαρτί (βλ. Πίνακας 4). Αφού τα δείγματα εδάφους μεταφέρθηκαν στο ειδικό δοχείο, το δοχείο τοποθετήθηκε πάνω σε δοκιμαστικό σωλήνα και μετά προστέθηκε νερό σε κάθε δείγμα μέχρις ότου να γεμίσει το δοχείο και στο δείγμα να επέλθει κορεσμός (βλ. Εικόνα 9). Σε τελικό στάδιο, ζυγίστηκε ξανά το χώμα μετά την προσθήκη νερού και υπολογίστηκε η ικανότητα συγκράτησης νερού (%) σε κάθε δείγμα.

Πίνακας 4: Ποσότητα χώματος και νερού που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση του SWHC.

	Ποσότητα κοσκινισμένου χώματος (gr)	Ποσότητα νερού (ml)
Control	90gr	20ml
0%	70gr	9ml
10%	70gr	13ml
25%	60gr	14ml
50%	50gr	20ml



Εικόνα 8: Κοσκίνισμα δειγμάτων με την χρήση κόσκινου.



Εικόνα 9: Πειραματική διαδικασία για υπολογισμό SWHC.

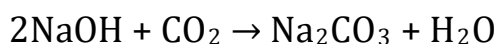
3.6.3 Εδαφική Αναπνοή

Καταρχάς, από κάθε κατηγορία εδαφικού δείγματος ζυγίστηκαν 50g και τοποθετήθηκαν σε πλαστικά ποτήρια. Στην συνέχεια, σε δοχεία που κλείνουν αεροστεγώς προστέθηκε λίγο νερό στον πυθμένα κάθε δοχείου και τοποθετήθηκε μέσα στο δοχείο το δείγμα και ένα άλλο ποτήρι με 40ml NaOH 0,5N. Κατόπιν το δοχείο κλείσθηκε αεροστεγώς και τοποθετήθηκε στο επωαστήριο στους 28 ± 2 (βλ. Εικόνα 10).



Εικόνα 10: Δείγματα στο επωαστήριο.

Το CO₂ το οποίο παράγεται κατά την αναπνοή των μικροοργανισμών του εδάφους «παγιδεύεται» από το NaOH, με το οποίο έχει μεγάλη χημική συγγένεια και σχηματίζει Na₂CO₃, σύμφωνα με την αντίδραση:



Σε ορισμένα χρονικά διαστήματα γινόταν ποσοτική παραλαβή του NaOH και αντικατάσταση από νέα ποσότητα 10ml NaOH στο ποτήρι. Πιο συγκεκριμένα, η παραλαβή και η αντικατάσταση του NaOH έγινε την ημέρα 0, 3, 5, 7 και 13. Η ποσότητα του NaOH που δεν έλαβε μέρος στην αντίδραση προσδιορίστηκε με τιτλοδότηση με διάλυμα HCl 0,1N παρουσία BaCl₂ και φαινολοφθαλεΐνης (βλ. Εικόνα 11). Σαφέστερα, η φαινολοφθαλεΐνη προσθέτει ροζ - κοκκινωπό χρώμα στο διάλυμα όμως με την προσθήκη κατάλληλης ποσότητας HCl το διάλυμα μετατρέπεται σε διαφανές υγρό. Η ποσότητα του NaOH που δεν χρησιμοποιήθηκε για την αλλαγή του χρώματος στο διάλυμα μετριέται και στην συνέχεια η μέτρηση αυτή αξιοποιείται για την τιτλοδότηση. Από την τιτλοδότηση και με τη βοήθεια της παραπάνω εξίσωσης, υπολογίστηκε το CO₂ το οποίο προέρχεται από την αναπνευστική δραστηριότητα των μικροοργανισμών του εδάφους στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και εκφράστηκε ως mg CO₂ ανά g εδάφους ανά ημέρα.



Εικόνα 11: Πειραματική διαδικασία για υπολογισμό εδαφικής αναπνοής.

3.6.4 Βιομάζα

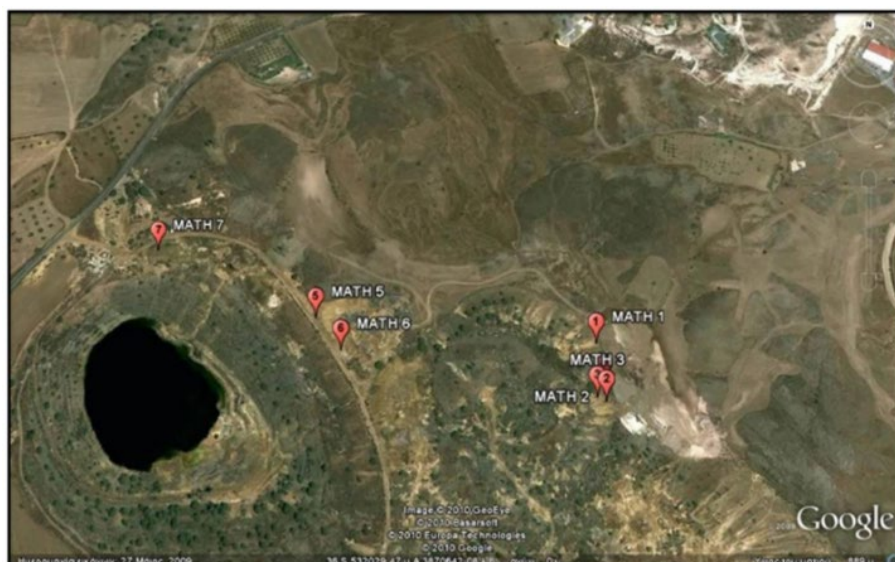
Σε πρώτο στάδιο, για τον υπολογισμό της βιομάζας λήφθηκαν τυχαία 10 φυτά με τις ρίζες τους από κάθε γλάστρα από τις συγκεντρώσεις 25%, 50% και control (στις υπόλοιπες συγκεντρώσεις δεν βλάστησε το *Medicago sativa*), πριν πραγματοποιηθεί η διαδικασία της αραίωσης. Ακολούθως, με την χρήση ζυγαριάς ακριβείας ζυγίστηκαν τα νωπά φυτά και στην συνέχεια αφέθηκαν στον φούρνο στους 60°C για 48 ώρες. Τα αποξηραμένα πλέον φυτά ζυγίστηκαν ξανά στη ζυγαριά ακριβείας και η βιομάζα υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\text{Τελική Ξηρή Βιομάζα (\%)} = \frac{\text{Βάρος ξηρής βιομάζας}}{\text{Βάρος νωπής βιομάζας}} \times 100$$

3.6.5 Φυσικοχημικές ιδιότητες εδάφους

Η χημικές ιδιότητες του εδάφους που μετρήθηκαν είναι το pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC). Ακριβέστερα για την μέτρηση του pH και της EC χρησιμοποιήθηκαν δείγματα από κάθε συγκέντρωση tailings με κομπόστ. Ο υπολογισμός του pH έγινε σύμφωνα με την αναλογία εδάφους : νερού (1 : 2,5).

Επιπρόσθετα, για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν προηγούμενες μετρήσεις των Stylianou et al. (2014) που φαίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 5 και στην Εικόνα 12.



Εικόνα 12: Σημεία δειγματοληψίας εδάφους που καταγράφηκαν με τη χρήση GPS (Stylianou et al., 2014).

Πίνακας 5: XRF ανάλυση σε δείγματα εδάφους (Stylianou et al., 2014).

Sample	Fe %	Cu ppm	Pb ppm	Zn ppm	As ppm	Ti ppm	Sr ppm	Mo ppm	Se ppm	Bal [*] %
MATH 1	24.6	330	ND ^{**}	120	ND ^{**}	2180	50	ND ^{**}	20	75.08
MATH 2	19	190	140	140	50	1880	140	20	50	80.6
MATH 3	24.71	390	ND ^{**}	60	ND ^{**}	860	ND ^{**}	ND ^{**}	ND ^{**}	75,095
MATH 4	12.31	690	200	3320	160	ND ^{**}	40	40	ND ^{**}	87,142
MATH 5	14	120	310	990	90	2370	90	30	ND ^{**}	85.08
MATH 6	15.54	190	110	ND ^{**}	60	2560	50	ND ^{**}	30	84,107
MATH 7	5.92	120	80	4060	30	940	30	30	ND ^{**}	93,428
Agriculture ¹	N.I.	63	70	200	12	N.I.	N.I.	5	1	N.I. ^{***}
Residential/Parkland ¹	N.I.	63	140	200	12	N.I.	N.I.	10	1	N.I.
Industrial ¹	N.I.	91	600	360	12	N.I.	N.I.	40	2.9	N.I.

^{*}Bal: Non metallic elements

^{**}ND: Not Detected (below detection limit)

^{***}N.I. Not Included

¹: Canadian Environmental Quality Guidelines (2007) (<http://st-ts.ccme.ca/>)

3.6.6 Φυτοτοξικότητα

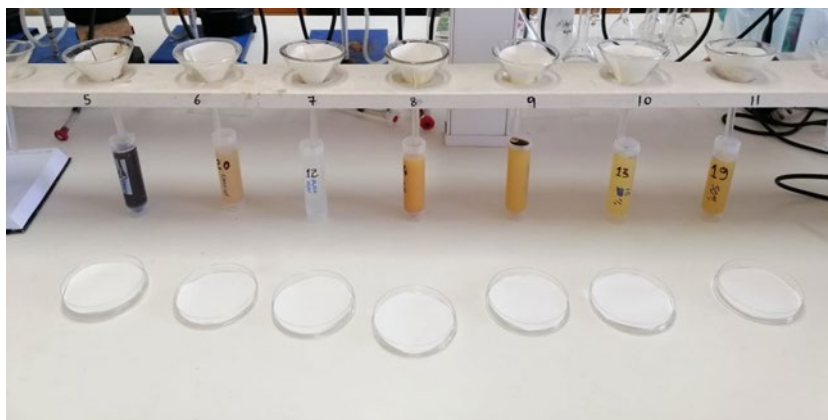
Σε πρώτο στάδιο, εκχυλίσματα από κάθε κατηγορία δείγματος παρασκευάστηκαν με ανακίνηση 10gr χώματος με 100ml απιονισμένου νερού (βλ. Εικόνα 13). Για τον έλεγχο του συγκεκριμένου πειράματος (control), χρησιμοποιήθηκε απιονισμένο νερό. Ακολούθως, έγινε διήθηση του κάθε εκχυλίσματος με την χρήση διηθητικού χαρτιού και 10 ml από το υγρό που διηθήθηκε μεταφέρθηκαν σε τρυβλία Petri αφού τοποθετήθηκαν στα τρυβλία 2 διηθητικά χαρτιά. Μετά, σε κάθε τρυβλίο προστέθηκαν 20 σπόροι κάρδαμου (*Lepidium sativum*) για τον έλεγχο της φυτοτοξικότητας (3 επαναλήψεις) (βλ.

Εικόνα 14). Το *Lepidium sativum* είναι ένα ευαίσθητο είδος δοκιμής, που χρησιμοποιείται ευρέως στις δοκιμές τοξικότητας επειδή αναπτύσσεται γρήγορα, είναι φθινό και εύκολο στην ανάλυση. Τέλος, τα τρυβλία επώαστηκαν στο σκοτάδι και στους 25°C. Η βλάστηση των σπόρων και το μήκος της ρίζας σε κάθε τρυβλίο μετρήθηκε στις 4 ημέρες. Για τις δοκιμές βλάστησης των σπόρων καρδάμου, τα ποσοστά σχετικής βλάστησης σπόρων (RSG), σχετικής ανάπτυξης ριζών (RRG) και δείκτης βλαστικότητας (GI) μετά την έκθεση σε εκχυλίσματα κομπόστ υπολογίστηκαν ως εξής:

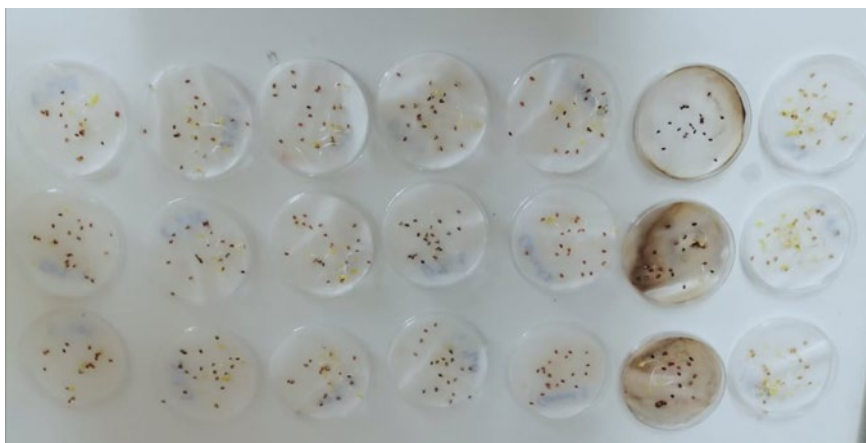
$$RSG (\%) = \frac{\text{αριθμός σπόρων που βλάστησαν σε κάθε εκχύλισμα}}{\text{αριθμός των σπόρων που βλάστησαν στο απ. νερό}} \times 100$$

$$RRG (\%) = \frac{\text{μέσο μήκος ρίζας στο εκχύλισμα κομπόστ}}{\text{μέσο μήκος ρίζας στο απ. νερό}} \times 100$$

$$GI (\%) = \frac{RSG \times RRG}{100}$$



Εικόνα 13: Εκχύλιση εδαφικών δειγμάτων.



Εικόνα 14: Έλεγχος φυτοτοξικότητας σε τρυβλία Petri.

3.7 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έγινε μετά από παρακολούθηση και παρατήρηση των γλαστρών. Στα εργαστηριακά πειράματα, τα αποτελέσματα εξάχθηκαν και υπολογίστηκαν με τις εξισώσεις που φαίνονται στο κεφάλαιο 3.6 Πειραματική Διαδικασία.

Κεφάλαιο 4

Πειραματικά Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται τα αποτελέσματα από την διεξαγωγή του πειράματος της διπλωματικής εργασίας με στόχο την αξιολόγηση της αποδοτικότητας της εφαρμογής κομπόστ σε tailings για την επιτυχή βλάστηση των ειδών *Medicago sativa* και ανάπτυξη *Pinus brutia*.

4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

4.1.1 Αποτελέσματα από το πείραμα στο θερμοκήπιο

Τα κύρια αποτελέσματα που εξάχθηκαν μετά την φύτευση και την ανάπτυξη των σπόρων του είδους *Medicago sativa* ήταν η μέτρηση της επιτυχίας βλαστικότητας των σπόρων (μετά από 12 ημέρες) (βλ. Πίνακας 6 & Διάγραμμα 1) για κάθε συγκέντρωση tailings με ανάμειξη κομπόστ. Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του κομπόστ επισημαίνονται στον Πίνακα 7. Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε η αύξηση του ύψους των φυτών για διάστημα 2 μηνών και τα αποτελέσματα φαίνονται στο Διάγραμμα 2 & 3 και υπό μορφή εικόνων στο Παράρτημα Α.

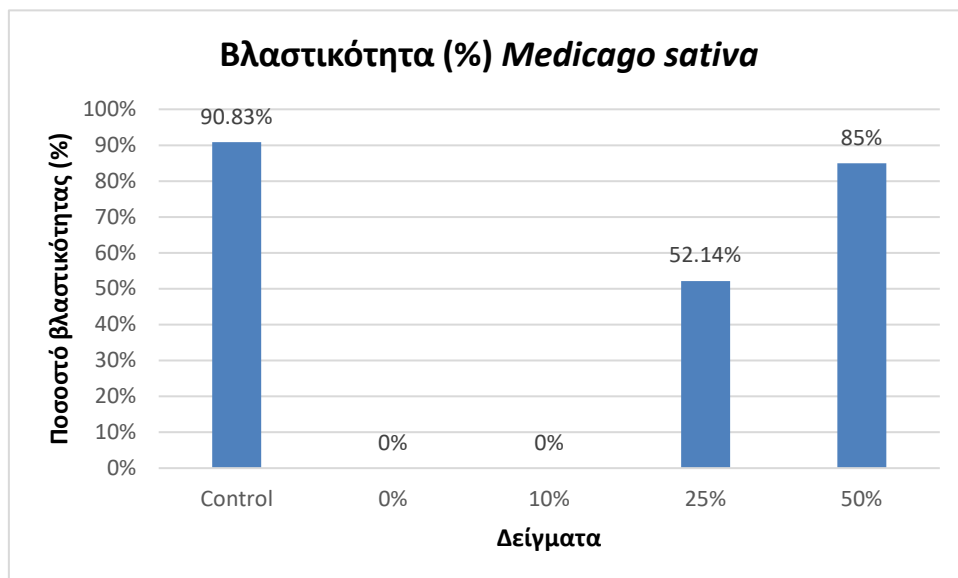
Πίνακας 6: Αριθμός σπόρων *Medicago sativa* που βλάστησαν και Ποσοστιαία Επιτυχία βλαστικότητα

	Γλάστρα										Ποσοστό Βλαστικότητας (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Control	19*	20	18	20	12	20	0	0	0	0	0	90.83%
0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
10%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
25%	4	10	11	16	14	16	2	0	0	0	0	52.14%
50%	16	20	17	17	15	20	17	16	18	16	0	85%

■: Καμία γλάστρα

*Αριθμός σπόρων που βλάστησαν από 20 ανά γλάστρα

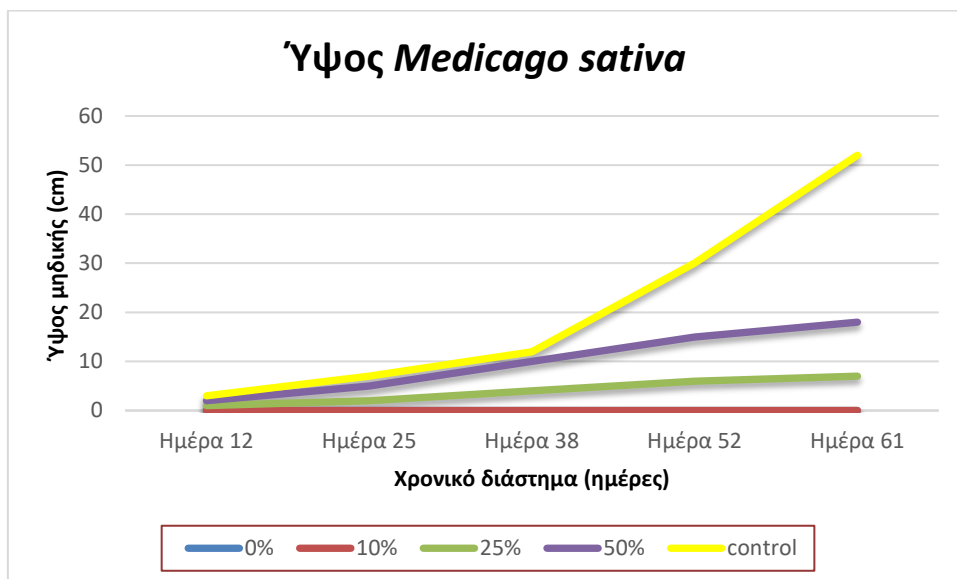
Διάγραμμα 1: Ποσοστιαία (%) επιτυχία βλαστικότητα μηδικής.



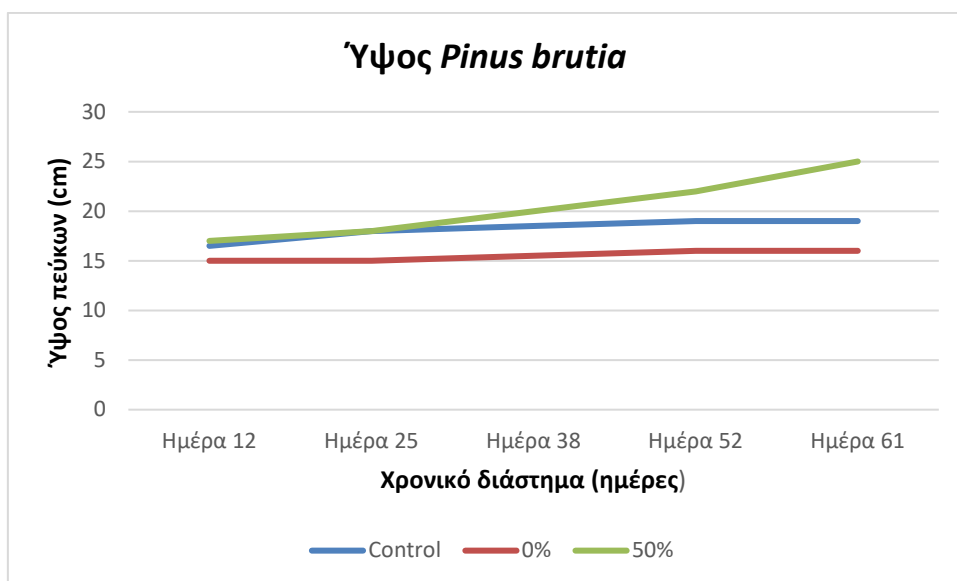
Πίνακας 7: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά κομπόστ.

Παράμετρος	Μέτρηση
pH	8.6
EC (mS/cm)	1.86
Organic matter (% dry basis)	28.38
C/N	21.1

Διάγραμμα 2: Ύψος *Medicago sativa* για διάστημα 2 μηνών.



Διάγραμμα 3: Ύψος *Pinus brutia* για διάστημα 2 μηνών.



4.1.2 Soil Water Holding Capacity (SWHC) / Ικανότητα συγκράτησης νερού στο έδαφος

Η διαθέσιμη χωρητικότητα νερού είναι η μέγιστη ποσότητα διαθέσιμου νερού που μπορεί να παρέχει ένα έδαφος. Αποτελεί ένα δείκτη της ικανότητας ενός εδάφους να συγκρατεί νερό και να το κάνει επαρκώς διαθέσιμο για χρήση στα φυτά. Επιπλέον, η διαθέσιμη υδάτινη χωρητικότητα επηρεάζεται από το είδος του εδάφους, την παρουσία

και την αφθονία θραυσμάτων από πέτρες και από το βάθος και τα στρώματα του εδάφους. Για παράδειγμα, τα αμμώδη εδάφη υποφέρουν από έλλειψη υγρασίας και στον αντίποδα τα αργιλώδη εδάφη έχουν υψηλή ικανότητα συγκράτησης νερού (Reynolds et al., 2000).

Για τον υπολογισμό της ικανότητας συγκράτησης νερού για κάθε δείγμα tailing με κομπόστ χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση:

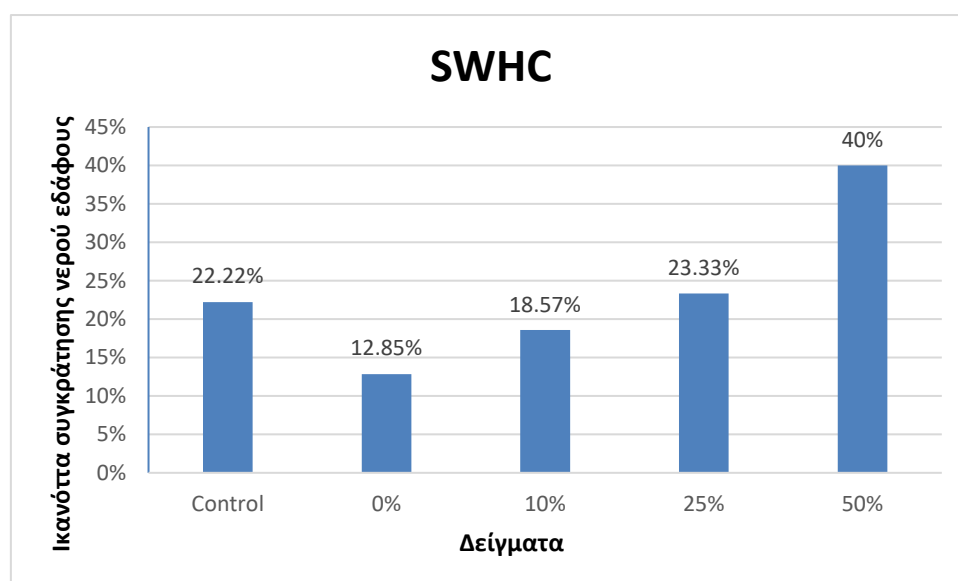
$$SWHC = \frac{\text{Ποσότητα νερού (ml)}}{\text{Ποσότητα χώματος (gr)}} \times 100$$

Τα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς εμφανίζονται στον Πίνακα 8 και στο Διάγραμμα 4.

Πίνακας 8: Υπολογισμός ικανότητας συγκράτησης νερού εδάφους για κάθε συγκέντρωση δείγματος.

Δείγμα	SWHC
Control	22.22%
0%	12.85%
10%	18.57%
25%	23.33%
50%	40%

Διάγραμμα 4: Ποσοστιαία (%) SWHC.

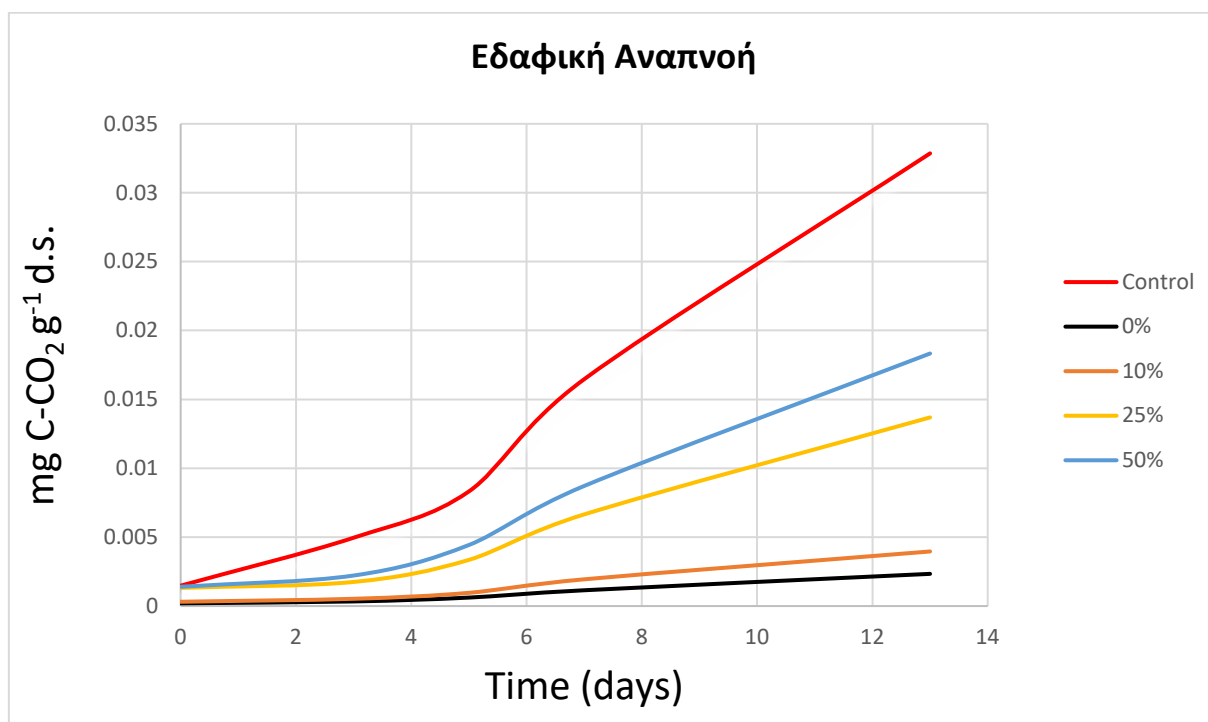


4.1.3 Εδαφική Αναπνοή

Η αναπνοή του εδάφους αποτελεί μια από τις σημαντικότερες βιολογικές διαδικασίες για τον καθορισμό της ποιότητας του εδάφους. Σαφέστερα, αναφέρεται στην πρόσληψη O₂ και στην απελευθέρωση CO₂ από ζωντανές, μεταβολιζόμενες οντότητες στο έδαφος. Επίσης, η μικροβιακή αναπνοή ορίζεται ως η πρόσληψη O₂ και απελευθέρωση CO₂ από κύτταρα βακτηρίων, μυκήτων, φυκών και πρωτόζωων στο έδαφος και περιλαμβάνει τις ανταλλαγές αερίων που προκύπτουν τόσο από τον αερόβιο όσο και από τον αναερόβιο μεταβολισμό (Anderson, 1982).

Η εδαφική αναπνοή υπολογίζει το CO₂ που απελευθερώνεται από το έδαφος ως αποτέλεσμα της μικροβιακής αναπνοής. Η ποσότητα του CO₂ υπολογίζεται με την χρήση της εξίσωσης $2\text{NaOH} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$. Στο Διάγραμμα 5 παρουσιάζεται η ποσότητα του CO₂ σε mg ανά ημέρα για κάθε συγκέντρωση δείγματος tailing με κομπόστ.

Διάγραμμα 5: Ποσότητα CO₂ που απελευθερώθηκε από το έδαφος ανά ημέρα.



4.1.4 Βιομάζα

Η βιομάζα είναι μια μέτρηση του πόση μάζα ζωντανού ιστού για έναν πληθυσμό υπάρχει σε μια στιγμή στο χρόνο (ή υπολογίζεται κατά μέσο όρο σε πολλές χρονικές περιόδους) και οι μονάδες μέτρησης της είναι μάζα (ή ενέργεια) ανά μονάδα επιφάνειας (Benke & Huryn, 2007)

Η φυτική βιομάζα υπολογίστηκε μετά από το ζύγισμα του νωπού και του ξηρού βάρους των φυτών που συλλέχθηκαν για τις συγκεντρώσεις 25%, 50% και control. Στον Πίνακα 9 εμφανίζονται οι μετρήσεις που έγιναν στα ξηρά και στα νωπά φυτάρια και στην συνέχεια η τελική βιομάζα (%) κάθε φυτού.

Πίνακας 9: Υπολογισμός βιομάζας (%).

	Υγρή Βιομάζα (gr)	Ξηρή Βιομάζα (gr)	Τελική Βιομάζα (%)	Μέσος όρος Βιομάζας
	0.5797	0.1106	19.07883388	
	0.5829	0.1223	20.98130039	
	0.5116	0.1125	21.98983581	
	0.6816	0.1487	21.81631455	
Control	0.6338	0.1348	21.26853897	22.47
	0.1949	0.0718	36.83940482	
	0.4134	0.0872	21.09337204	
	0.3184	0.0698	21.92211055	
	0.12	0.0221	18.41666667	
	0.2498	0.05337	21.36509207	
	0.1418	0.0238	16.7842031	
	0.1413	0.0745	52.72469922	
	0.1553	0.0283	18.22279459	
	0.1106	0.0163	14.73779385	
50%	0.1286	0.0195	15.16329705	22.06
	0.0876	0.013	14.84018265	
	0.1227	0.0199	16.21841891	
	0.131	0.0221	16.87022901	
	0.1255	0.0222	17.68924303	
	0.1979	0.0741	37.44315311	
	0.0822	0.0198	24.08759124	
	0.0758	0.0046	6.068601583	
	0.0959	0.019	19.81230448	
	0.0713	0.0149	20.89761571	
	0.0343	0.0072	20.99125364	
25%	0.0539	0.0137	25.4174397	20.23
	0.0329	0.0077	23.40425532	
	0.0476	0.0072	15.12605042	
	0.0577	0.0131	22.70363951	
	0.047	0.0112	23.82978723	

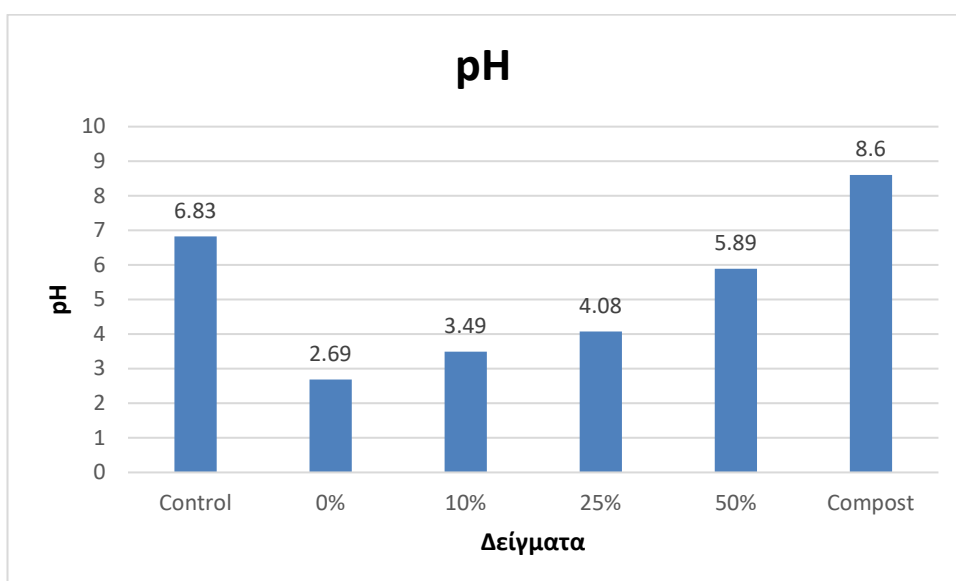
4.1.5 Φυσικό-Χημικές ιδιότητες εδάφους

Οι μετρήσεις του pH και της EC (1 μήνα μετά την συλλογή των δειγμάτων) για κάθε κατηγορία δείγματος φαίνονται στον Πίνακα 10 και στο Διάγραμμα 6 και 7.

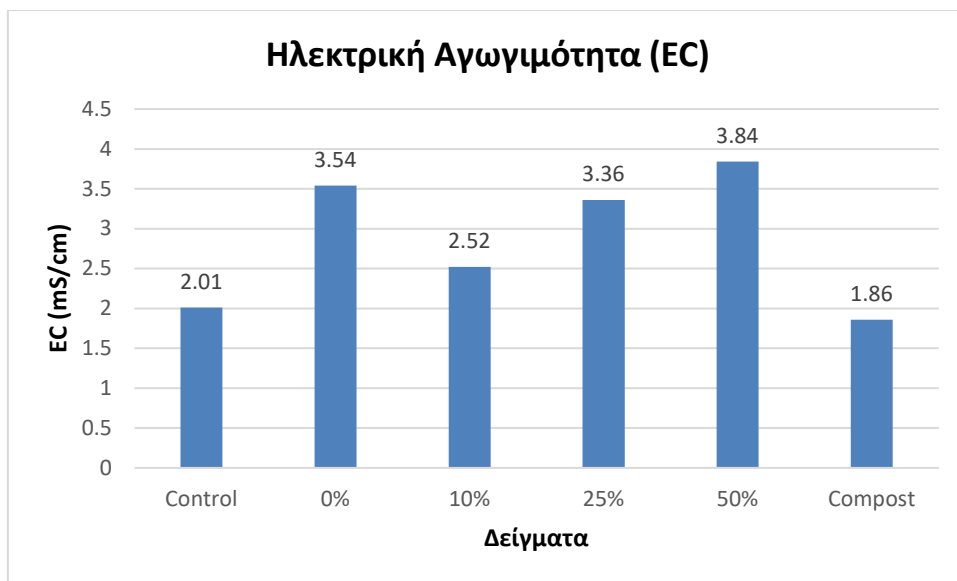
Πίνακας 10: Μετρήσεις pH και EC για κάθε συγκέντρωση.

	pH	EC (mS/cm)
Control	6.83	2.01
0%	2.69	3.54
10%	3.49	2.52
25%	4.08	3.36
50%	5.89	3.84
Compost	8.6	1.86

Διάγραμμα 6: Υπολογισμός pH.



Διάγραμμα 7: Υπολογισμός Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας (EC)



4.1.6. Φυτοτοξικότητα

Ο προσδιορισμός του επιπέδου φυτοτοξικότητας στο κομπόστ δείχνει εάν η οργανική ουσία έχει σταθεροποιηθεί πλήρως και επίσης, εάν η διαδικασία κομποστοποίησης έχει αναπτυχθεί ομαλά (στις περισσότερες περιπτώσεις η παραγωγή φυτοτοξινών υποδηλώνει δυσμενείς συνθήκες κατά την κομποστοποίηση, όπως ανεπαρκής αερισμός και υψηλή υγρασία επίπεδο). Επιπλέον, φυτοτοξικότητα μπορεί να προκληθεί από την παρουσία βαρέων μετάλλων και συγκεκριμένων οργανικών ουσιών (Papadopoulos et al., 2009).

Για την διερεύνηση της επίδρασης της φυτοτοξικότητας του εδάφους στην συμπεριφορά βλάστησης τους είδους *Lepidium sativum* (κάρδαμο), σχεδιάστηκε το πείραμα που εξηγείται στο 3.6.6 Φυτοτοξικότητα με 3 επαναλήψεις για την κάθε συγκέντρωση tailings με κομπόστ. Πιο συγκεκριμένα, η βλαστικότητα των σπόρων (RSG), το ύψος των ριζών (RRG) και ο δείκτης βλάστησης (GI) αξιολογήθηκε σύμφωνα με τις εξισώσεις:

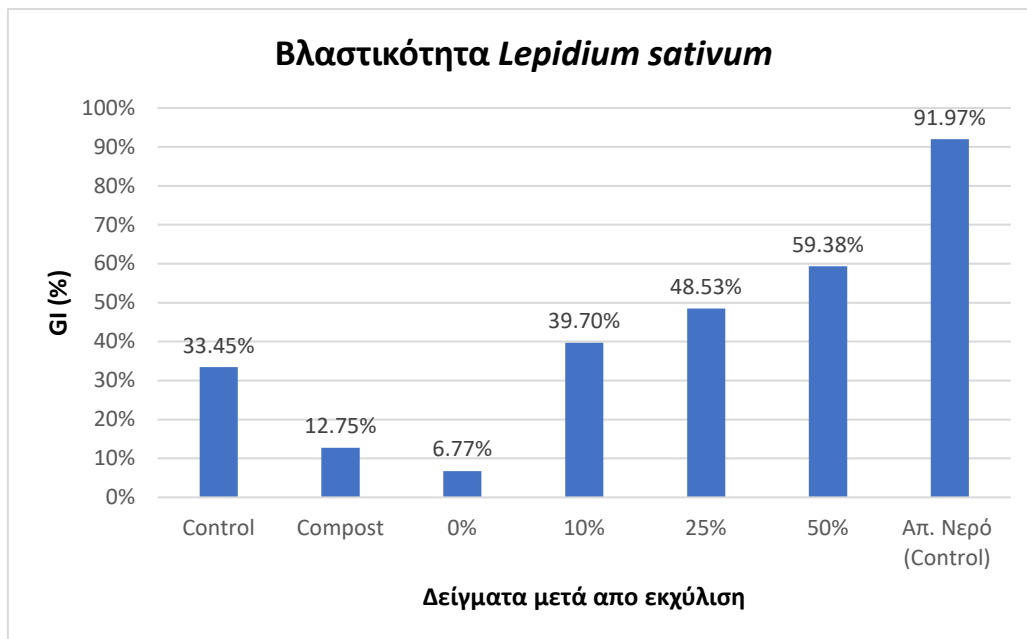
$$RSG (\%) = \frac{\text{αριθμός σπόρων που βλάστησαν σε κάθε εκχύλισμα}}{\text{αριθμός των σπόρων που βλάστησαν στο απ. νερό}} \times 100$$

$$RRG (\%) = \frac{\text{μέσο μήκος ρίζας στο εκχύλισμα κομπόστ}}{\text{μέσο μήκος ρίζας στο απ. νερό}} \times 100$$

$$GI (\%) = \frac{RSG \times RRG}{100}$$

Τα δεδομένα που ελήφθησαν σε αυτά τα πειράματα αντιπροσωπεύουν τον μέσο όρο 3 επαναλήψεων και παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 7.

Διάγραμμα 7: Επίδραση φυτοτοξικότητας στην βλαστικότητα του *Lepidium sativum*.



Κεφάλαιο 5

Συζήτηση – Συμπεράσματα – Εισηγήσεις

Τα συμπεράσματα από το πειραματικό στάδιο της διπλωματικής εργασίας αναφέρονται σε αυτό το κεφάλαιο. Επιπλέον, γίνεται συζήτηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων με μελέτες άλλων επιστημόνων. Τέλος, αναφέρονται εισηγήσεις αναφορικά με την προσθήκη κομπόστ σε απορρίμματα μεταλλείων σε επίπεδο εφαρμογής πεδίου.

5.1 Συζήτηση

Αναμφισβήτητα, οι εγκαταλειμμένες τοποθεσίες εξόρυξης αποτελούν σημαντικές πηγές ρύπανσης από βαρά μέταλλα ακόμη και μετά από αιώνες. Τα τοξικά μέταλλα που παραμένουν στα απορρίμματα μπορεί να μεταναστεύσουν και να ρυπάνουν φυσικά περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένου του εδάφους, του νερού, των υπόγειων υδάτων και του αέρα. Τα βαρέα μέταλλα έχουν την ικανότητα να αλλάξουν την υφή και σύσταση του εδάφους, να προκαλέσουν εξάντληση θρεπτικών συστατικών, να εισέλθουν στην τροφική αλυσίδα, να εμφανίσουν τοξικές επιδράσεις, να καταστρέψουν οικολογικούς οικοτόπους και τη βιολογική ποικιλότητα, συμπεριλαμβανομένων των αυτοφυών φυτών. Μολαταύτα, η απορρόφηση και η συσσώρευση μετάλλων από τα φυτά μπορεί να αλλάξει ανάλογα με τη στοιχειακή συγκέντρωση, τη βιοδιαθεσιμότητα, την κινητικότητα, την ιδιότητα του εδάφους, τη θερμοκρασία και το είδος των φυτικών ειδών (Baycu et al., 2015; Zhang et al., 2018).

Είναι κοινά παραδεκτό ότι, η πρόληψη ή ο μετριασμός των κινδύνων που προκαλούνται από τα απορρίμματα μεταλλείων για τη ομαλή λειτουργία των οικοσυστημάτων και την ανθρώπινη υγεία λόγω ρύπανσης από βαρέα μέταλλα, περιλαμβάνει τη σωστή διαχείριση των tailings, η οποία με τη σειρά της μπορεί να διευκολύνει τη σταθεροποίηση

των απορριμμάτων και την αποκατάσταση των ρυπασμένων περιοχών (Christou et al., 2017). Συμπληρωματικά, ποικίλες στρατηγικές και πρακτικές με γνώμονα την αποκατάσταση των εγκαταλελειμμένων μεταλλείων έχουν εφαρμοστεί. Οι κύριες τεχνικές που χρησιμοποιούνται, πραγματεύονται με τις βιολογικές ιδιότητες των φυτών και την χρήση εδαφοβελτιωτικών όπως το κομπόστ, το biochar και την λυματολάσπη. Αναλυτικότερα, η φυτοσταθεροποίηση παρέχει μια μακροχρόνια φυτική κάλυψη που μπορεί να μετριάσει την αιολική και υδάτινη διάβρωση και να ακινητοποιήσει βαρέα μέταλλα εντός της ριζόσφαιρας (Christou et al., 2017). Επιπρόσθετα, οι Farrag et al. (2012) συμπέραναν ότι το κομπόστ αποτελεί κατάλληλη και αποτελεσματική πρακτική για βελτίωση του εδάφους και για τη βελτίωση ορισμένων αναπτυξιακών και φυσιολογικών βιολογικών διεργασιών φυτών υπό μεταλλική καταπόνηση.

Σκοπός της μεταπτυχιακής διατριβής ήταν ο προσδιορισμός της αποτελεσματικότητας της χρήσης κομπόστ σε απορρίμματα μεταλλείου με επικείμενη βλάστηση και ανάπτυξη χλωρίδας. Για την επίτευξη του στόχου, έγινε εκτενής βιβλιογραφική ανάλυση των αρνητικών επιδράσεων που επιφέρουν τα απορρίμματα στο περιβάλλον και ειδικότερα στα φυτά. Επίσης, υλοποιήθηκε *ex situ* πείραμα σε θερμοκήπιο με ελεγχόμενες συνθήκες και εργαστηριακά πειράματα για την εξακρίβωση της αποδοτικότητας της εφαρμογής κομπόστ σε tailings.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, για την επίτευξη του *ex situ* πειράματος έγινε δειγματοληψία απορριμμάτων μεταλλείων από το εγκαταλελειμμένο μεταλλείο του Βόρειου Μαθιάτη. Το κοιτάσμα Μαθιάτη στον Οφιόλιθο Τρόδους της Κύπρου χαρακτηρίζεται από αυξημένη περιεκτικότητα σε Zn και ένα υδροθερμικό ορυκτό σύνολο στο οποίο ο γαληνίτης είναι τοπικά σημαντικό συστατικό και ο βαρύτης ένα κοινό ορυκτό με χαρακτηριστικά που το κάνουν να ξεχωρίζει από άλλα κοιτάσματα κυπριακού τύπου. Τα κοιτάσματα θειούχου μεταλλεύματος στην Κύπρο βρίσκονται στη σειρά PillowLava του Οφιόλιθου του Τρόδος, ο οποίος γενικά θεωρείται ότι είναι ένα θραύσμα του πυθμένα του Μεσοζωικού ωκεανού που ανασηκώθηκε ως αποτέλεσμα της σύγκρουσης μεταξύ Ευρασιατικής και Αφρικανικής τεκτονικής πλάκας. Επιπλέον, τα θειούχα κοιτάσματα είναι κατά κύριο λόγο πλούσια σε Cu και Zn, αν και σε άλλες περιπτώσεις παρουσιάζονται εξ ολοκλήρου πυριτικά κοιτάσματα χωρίς Cu ή Zn (Adamides, 2014).

5.1.1 Πείραμα στο θερμοκήπιο

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε λεπτομερής ανάλυση της υφιστάμενης βιβλιογραφίας με σκοπό την παρουσίαση όλης της ανανεωμένης πληροφορίας με άξονα το φλέγον περιβαλλοντικό πρόβλημα των εγκαταλελειμμένων μεταλλείων της Κύπρου. Κατόπιν, στο πειραματικό κομμάτι της διπλωματικής έγινε δειγματοληψία tailings από το πεδίο (εγκαταλελειμμένο μεταλλείο Βόρειου Μαθιάτη) με κύριο στόχο την εξακρίβωση της αποτελεσματικότητας της ανάμειξης των απορριμμάτων μεταλλείου με κομπόστ για την επιτυχή βλάστηση του είδους *Medicago sativa* και την ανάπτυξη φυταρίων *Pinus brutia*.

Εν πρώτοις, για την διεκπεραίωση του πειράματος έγινε ανάμειξη συγκεκριμένης αναλογίας κομπόστ με απορρίματα μεταλλείου και ακολούθως, φυτεύτηκαν σπόροι του φυτικού είδους *Medicago sativa* και φυτά *Pinus brutia*. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι περιβαλλοντικές συνθήκες ήταν ελεγχόμενες καθώς το πείραμα έλαβε χώρα σε θερμοκήπιο. Τα κύρια συμπεράσματα που εξάχθηκαν από το πείραμα είναι ότι η προσθήκη και η ανάμειξη κομπόστ σε απορρίματα μεταλλείου έχει την ικανότητα να αυξάνει την επιτυχία βλαστικότητας των σπόρων όπως φαίνεται στον Πίνακα 6 και Διάγραμμα 1. Το χώμα control που λήφθηκε από χωράφι της περιοχής παρατηρείται ότι αποδίδει σημαντικά στην επιτυχή βλαστικότητα των σπόρων αφού το χώμα ήταν γόνιμο. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι το χώμα με 0% περιεκτικότητα σε απορρίματα μεταλλείου και με επιτρεπόμενες τιμές βαρέων μετάλλων είναι ικανό να υποστηρίξει την ανάπτυξη και την αύξηση του *Medicago sativa*. Η μηδική (*Medicago sativa*) είναι πολυετές, πώδες φυτό με μωβ ανθούς και το ριζικό του σύστημα είναι χαρακτηριστικό λόγω του μεγάλου βάθους διείδυσης των ριζών στο έδαφος. Επίσης, η μηδική παρουσιάζει ευρεία προσαρμοστικότητα σε διαφορετικά κλίματα και τύπους εδάφους γεγονός που την καθιστά κατάλληλη επιλογή για φυτοαποκατάσταση και αναβλάστηση ρυπασμένων εδαφών από βαρέα μέταλλα (Chen et al., 2015).

Επιπρόσθετα, η αποδοτικότερη πρακτική για την ενίσχυση της βλαστικότητας των σπόρων αποτελεί η προσθήκη 50% κομπόστ στα tailings καθώς σύμφωνα με τον Πίνακα 6, με την συγκεκριμένη ανάμειξη επιτεύχθηκε το μεγαλύτερο ποσοστό βλαστικότητας των σπόρων με 85% επιτυχία. Πράγματι, η τροποποίηση του εδάφους με κομπόστ όχι μόνο αυξάνει τις αποδόσεις της χλωρίδας, αλλά είναι επίσης αποτελεσματική στην ενίσχυση της περιεκτικότητας της οργανικής ουσίας στο χώμα, στον κύκλο των θρεπτικών

ουσιών και στη βελτίωση των φυσικών, χημικών και βιολογικών ιδιοτήτων του εδάφους (Beldantoni et al., 2016). Επιπλέον, στην κατηγορία δειγμάτων με ανάμειξη 25% κομπόστ η ποσοστιαία επιτυχία βλάστησης ανήλθε στα 52.14% όμως παραμένει σχετικά χαμηλό ποσοστό σε σύγκριση με τα δείγματα της κατηγορίας control και ανάμειξης tailings με 50% κομπόστ. Συνεπώς, όλες οι επεξεργασίες που έλαβαν τροποποίηση κομπόστ έδειξαν βλάστηση και ανάπτυξη φυτών και διαπιστώνεται ότι υπάρχει μια συνολική καθαρή τάση αύξησης του αριθμού του πληθυσμού του είδους μηδικής σε συνδυασμό με την εφαρμογή κομπόστ σε απορρίμματα μεταλλείου.

Συμπληρωματικά, μετά το πέρας των 2 μηνών για την υλοποίηση του πειράματος στις γλάστρες εξάχθηκε το αποτέλεσμα που επισημαίνει ότι η προσθήκη 50% κομπόστ σε tailings αποδίδει καλύτερα στην αύξηση του ύψους της μηδικής, συγκριτικά με τις υπόλοιπες τροποποιήσεις. Όπως προκύπτει από τις εικόνες του Παραρτήματος Α και τα Διαγράμματα 2 και 3, την μεγαλύτερη αύξηση των ειδών *Medicago sativa* και *Pinus brutia* παρουσίασαν τα δείγματα με 50% προσθήκη κομπόστ. Επιπλέον, τα φυτά μηδικής που φύτευαν στην συγκέντρωση 25% κομπόστ με tailings δεν εμφάνισαν σημαντική αύξηση ύψους. Συνεπώς, παρουσίασαν καθυστερημένο ρυθμό ανάπτυξης που ταυτίζεται με τις όξινες συνθήκες (pH 4.08) που επικρατούσαν στις γλάστρες και στην υψηλή περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα. Αξιοπρόσεκτο είναι το γεγονός ότι τα φυτά σε αυτή την αναλογία κομπόστ με απορρίμματα μεταλλείου εμφάνισαν σημάδια χλώρωσης, φαινόμενο που συνδέεται άμεσα με την επίδραση φυτοτοξικότητας στα φυτά. Συνεπώς, όπως προκύπτει και από το πείραμα της φυτοτοξικότητας και όπως επισημαίνεται στο Διάγραμμα 7, οι σπόροι του *Lepidium sativum* είχαν ποσοστό βλαστικότητας μόνο 48.53% στην εφαρμογή 25% κομπόστ, κάτι που οφείλεται στις επιβλαβείς συνθήκες που επικρατούσαν στο δείγμα. Ωστόσο, η τροποποίηση των tailings με 50% κομπόστ απέδωσε καθώς ο δείκτης βλαστικότητας ανήλθε στο 59.38%. Επίσης, αναφορικά με τους σπόρους της μηδικής στις συγκεντρώσεις 0% και 10% δεν κατάφερε να φυτρώσει κανένας σπόρος με ποσοστό βλαστικότητας 0%. Απεναντίας, τα φυτά μηδικής που φύτευαν και αναπτύχθηκαν σε γόνιμο χώμα από θερμοκήπιο (control) σημείωσαν αξιόλογη αύξηση ύψους σε διάστημα μόνο 2 μηνών.

Επιπλέον, φυτά τραχείας πεύκης συμπεριλήφθηκαν στην μελέτη καθώς είδη πεύκων παρατηρήθηκαν σε εγκαταλελειμμένα μεταλλεία της Κύπρου όπως το μεταλλείο Μαθιάτη και Κοκκινοπεζούλας. Σύμφωνα με τους Cohen et al. (2021), τα γυμνόσπερμα

(ειδικά το γένος *Pinus*) έχουν γενικά αποδειχθεί πιο βιογεωχημικά ανταποκρινόμενα στις διακυμάνσεις του εδάφους από τα αγγειόσπερμα και ενδέχεται να αντικατοπτρίζουν λιγότερη ευαισθησία στην πρόσληψη δυνητικά τοξικών στοιχείων ή διακύμανση στη διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων. Τα φυτά ωστόσο του *P. brutia* είναι σχετικά ανεκτικά σε ξηρές συνθήκες, χαμηλό pH και σε ρυπασμένα εδάφη με βαρέα μέταλλα. Το *Pinus brutia* είναι συνήθως ένα από τα πρώτα είδη που αποικίστηκαν (ή φυτεύτηκαν σκόπιμα) για να βοηθήσουν στη σταθεροποίηση των σωρών απορριμμάτων σε τοποθεσίες μεταλλείων χαλκού σε ολόκληρη την Κύπρο και χαρακτηρίζονται από εκτεταμένα ριζικά συστήματα.

Επιπρόσθετα, σύμφωνα με το Διάγραμμα 3 το ύψος των πεύκων *Pinus brutia* δεν σημείωσε τεράστια αύξηση στα δείγματα χώματος control με αύξηση μόνο 1-2cm. Ταυτόχρονα, στην περίπτωση των δειγμάτων tailings με 0% κομπόστ δεν παρατηρήθηκε καμιά μεταβολή του ύψους των πεύκων. Απεναντίας, η εφαρμογή κομπόστ σε αναλογία 50% σε απορρίμματα μεταλλείου προώθησε σημαντικά την ανάπτυξη των φυτών *Pinus brutia* αφού σημειώθηκε αύξηση ύψους ~10cm για συνολικό χρονικό διάστημα 2 μηνών. Επομένως, η τροποποίηση απορριμμάτων μεταλλείων με κομπόστ έχει την ικανότητα να ενισχύει την ανάπτυξη των πεύκων.

5.1.2 SWHC

Αναμφίβολα, η ικανότητα συγκράτησης νερού στο έδαφος επηρεάζεται άμεσα από τον τύπο του εδάφους. Η ικανότητα συγκράτησης νερού οποιουδήποτε εδάφους καθορίζεται από την υφή, τη δομή και την περιεκτικότητά του σε οργανική ύλη. Συμπληρωματικά, ο τύπος του εδάφους επηρεάζει τις δυνατότητες συγκράτησης νερού εδαφών, καθώς τα εδάφη με υψηλό ποσοστό αργίλου και περιεκτικότητα σε οργανική ουσία τείνουν να έχουν υψηλό SWHC (Olorunfemi, 2016).

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 8 και στο Διάγραμμα 4, η μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης νερού στο έδαφος παρουσιάζεται από τα δείγματα tailings με ανάμειξη 50% κομπόστ (40%). Επιπρόσθετα, το μικρότερο ποσοστό SWHC (12.85%) εμφανίστηκε στην κατηγορία tailings με 0% κομπόστ. Στα δείγματα tailings με 10% κομπόστ, η SWHC είχε ποσοστό 18.57% και στα δείγματα με προσθήκη 25% κομπόστ το ποσοστό υπολογίστηκε ως 23.33%. Συμπερασματικά, η χρήση και προσθήκη εδαφοβελτιωτικού

κομπόστ σε άγωνα απορρίμματα μεταλλείων έχει την ικανότητα αύξησης της ικανότητας συγκράτησης νερού στο έδαφος και συνεπώς προάγεται η αποτελεσματική αύξηση και ανάπτυξη φυτικών ειδών. Ως εκ τούτου, για την αποδοτική αύξηση συγκράτησης νερού στο έδαφος, η προσθήκη κομπόστ πρέπει να είναι σε μεγάλη ποσότητα και αναλογία με το έδαφος.

Σύμφωνα με τους Suzuki et al. (2007), η ικανότητα συγκράτησης νερού είναι ένα μέτρο της ποσότητας νερού στην οποία μια καλλιέργεια είναι αποτελεσματική. Το διαθέσιμο νερό για την ανάπτυξη των καλλιεργειών είναι η διαφορά μεταξύ της περιεκτικότητας σε νερό και του μόνιμου σημείου μαρασμού σε δεδομένη περιοχή ενδιαφέροντος. Η μελέτη έλαβε χώρα στην ΒΑ Ταϊλάνδη και πραγματοποιήθηκαν επιτόπιες μελέτες και πρακτικές βελτίωσης του εδάφους. Σαφέστερα, η παρούσα μελέτη διεξάχθηκε με σκοπό τον προσδιορισμό εάν οι τροποποιήσεις εδάφους (πχ. προσθήκη κομπόστ) άλλαξαν την ικανότητα συγκράτησης νερού και τη δομική σταθερότητα του εδάφους 2 χρόνια μετά την αρχική εφαρμογή. Στα αποτελέσματα οι ερευνητές αναφέρουν ότι, η εφαρμογή των τροποποιήσεων ενίσχυσε το πορώδες και άλλαξε την κατανομή του μεγέθους των πόρων με αποτέλεσμα την αύξηση της διαθέσιμης περιεκτικότητας σε νερό για την ανάπτυξη των καλλιεργειών της περιοχής. Επιπλέον, η τροποποίηση εδάφους με κομπόστ αύξησε το πορώδες του εδάφους κατά 4-8% και αυτό πιθανόν να οφείλεται στην οργανική ύλη που προστίθεται με το κομπόστ.

5.1.3 Εδαφική Αναπνοή

Η αναπνοή του εδάφους υπογραμμίζει το CO₂ που παράγεται από τη βιολογική δραστηριότητα των οργανισμών του εδάφους, συμπεριλαμβανομένων των ριζών των φυτών, των μικροβίων και της πανίδας του εδάφους. Η εδαφική αναπνοή, η οποία γενικά μετριέται ως ροή CO₂ από την επιφάνεια του εδάφους (π.χ. mmol CO₂ m⁻² s⁻¹), αποτελεί βαρόμετρο της μεταβολικής δραστηριότητας του εδάφους, που αντιπροσωπεύει μια ολοκληρωμένη απόκριση διαφορετικών οργανισμών που λαμβάνουν χώρα στο έδαφος. Επίσης, οι ρυθμοί αναπνοής που προσδιορίζονται με τις εργαστηριακές επωάσεις εδάφους αναφέρονται συχνά ως η απώλεια μάζας CO₂-C ανά μάζα εδάφους (π.χ. mg C-CO₂ g⁻¹ C-soil day⁻¹) (Phillips & Nickerson, 2015). Συμπληρωματικά, η υγεία του εδάφους εστιάζει σε μεγάλο βαθμό στα βιοτικά συστατικά ενός εδάφους, αντανακλώντας δηλαδή, τη διατήρηση των οργανισμών του εδάφους και τη σωστή λειτουργία τους ως ρυθμιστές

του κύκλου των θρεπτικών συστατικών, του οξυγόνου και κατά συνέπεια, της γονιμότητας του εδάφους. Επομένως, οι μικροοργανισμοί διαδραματίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο στην ανάπτυξη και διατήρηση του εδάφους (Anderson et al., 2003).

Καταρχάς, η εδαφική αναπνοή υπολογίστηκε μετά από επώαση των δειγμάτων και με την χρήση δεικτών όπως NaOH και φαινολοφθαλεΐνης για την εξακρίβωση της ποσότητας του CO₂ σε mg ανά ημέρα για κάθε ξεχωριστή τροποποίηση tailings με κομπόστ. Στο Διάγραμμα 5 εκφράζονται οι καμπύλες της συνολικής εδαφικής αναπνοής για κάθε ομάδα δείγματος σε συνολικά 13 ημέρες. Πιο συγκεκριμένα, τα δείγματα απορριμμάτων του εγκαταλελειμμένου μεταλλείου του Βόρειου Μαθιάτη με προσθήκη κομπόστ 10% και 25% παρουσίασαν μικρή αύξηση του ρυθμού της εδαφικής αναπνοής αφού η προσθήκη οργανικής ουσίας μέσω του κομπόστ δεν κατέστη δυνατή για περαιτέρω αναπνοή των ζωντανών οργανισμών που βρίσκονται στα συγκεκριμένα εδάφη. Επίσης, τα δείγματα 0% κομπόστ με tailings παρουσίασαν την μικρότερη ποσότητα παραγόμενου CO₂ που απελευθερώθηκε από το έδαφος. Στον αντίποδα, η προσθήκη κομπόστ σε ποσοστό 50% έδειξε ευεργετικά αποτελέσματα στους οργανισμούς καθώς η αντίστοιχη καμπύλη στο Διάγραμμα 5 τονίζει την ραγδαία αύξηση της μικροβιακής αναπνοής μετά το πέρας των πρώτων 3 ημερών. Όπως προκύπτει από το πείραμα της εδαφικής αναπνοής, οι τιμές του CO₂ που απελευθερώθηκαν παρουσίασαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δειγμάτων tailings με προσθήκη κομπόστ. Η ομάδα δειγμάτων με 50% κομπόστ εμφάνισε την μεγαλύτερη αύξηση της μικροβιακής αναπνοής στο έδαφος ενώ τα απορρίμματα του μεταλλείου με 0% κομπόστ παρουσίασε το μικρότερο ποσοστό CO₂. Πράγματι, η προσθήκη κομπόστ σε tailings μεταλλείων προωθεί την αναπνοή που διεξάγεται στο έδαφος.

Τα αποτελέσματα του πειράματος της εδαφικής αναπνοής για την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ταυτίζονται με τα αποτελέσματα της μελέτης των Borcken et al. (2002) οι οποίοι υπογραμμίζουν ότι η εφαρμογή κομπόστ αύξησε σημαντικά τους ρυθμούς αναπνοής του εδάφους από 5,1 σε 6,3 mg C ha⁻¹ yr⁻¹ και από 4,2 σε 7,0 mg C ha⁻¹ yr⁻¹ σε λασπώδη και αμμώδη εδάφη αντίστοιχα. Επίσης, αξιοπρόσεκτο είναι το γεγονός ότι η ποσότητα του C-CO₂ που υπολογίστηκε στο control συνάδει με τα αναμενόμενα αποτελέσματα του πειράματος. Ακριβέστερα, το χώμα control που συλλέχθηκε από θερμοκήπιο εμφάνισε τεράστια αύξηση εδαφικής αναπνοής καθώς οι ουδέτερες τιμές pH

προάγουν την διαδικασία της εδαφικής αναπνοής. Ωστόσο, σε άλλες περιπτώσεις η εδαφική αναπνοή συνδέεται άμεσα με την εποχή του έτους και τις μεταβολές της θερμοκρασίας (Karhu et al., 2014), την καταπόνηση που υφίσταται το έδαφος κατά την καλλιεργητική περίοδο και την συνεχόμενη μη ελεγχόμενη άρδευση ή ξηρασία (Zheng et al., 2021).

5.1.4 Βιομάζα

Δεν παρήχθη ανιχνεύσιμη βιομάζα από κανένα φυτό σε μη τροποποιημένα απορρίμματα (0% κομπόστ) και σε απορρίμματα με 10% προσθήκη κομπόστ όπως φαίνεται στον Πίνακα 9. Εντούτοις, στις επεξεργασίες με 25% και 50% που τροποποιήθηκαν με κομπόστ παρήγαγαν μέσο όρο βιομάζας 20.23% και 22.06% αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, τα φυτά του είδους *Medicago sativa* στην επεξεργασία 25% ήταν σαφώς στρεσαρισμένα και εμφάνισαν σημάδια χλώρωσης και καθυστερημένης ανάπτυξης σε σύγκριση με τα φυτά στις επεξεργασίες κομπόστ 50% που φαινόταν υγιή. Αφενός η συγκέντρωση 25% φανέρωσε σημάδια φυτοτοξικότητας, αφετέρου η παραγωγή βιομάζας ήταν παρόμοια στις επεξεργασίες 25 και 50%, υποδηλώνοντας ότι το 25% είναι η ελάχιστη μετρούμενη τροποποίηση κομπόστ που απαιτείται για τη βέλτιστη ανάπτυξη της μηδικής στα απορρίμματα του εγκαταλελειμμένου μεταλλείου του Βόρειου Μαθιάτη. Τα εδάφη των μεταλλείων περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα περιοριστικών παραγόντων για την ανάπτυξη των φυτών, όπως εξαιρετικά όξινο pH και χαμηλή περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά. Η απουσία βλάστησης στα tailings με 0% και 10% προσθήκη κομπόστ πολύ πιθανό να σχετίζεται με την αυξημένη οξύτητα των απορριμμάτων του μεταλλείου. Μολαταύτα, η προσθήκη κομπόστ σε συγκέντρωση 25% και 50% αύξησε το pH, επιτρέποντας τη βλάστηση και την ανάπτυξη των φυτών μηδικής.

Οι Benerjee et al. (1997) επισημαίνουν ότι το κομπόστ έχει υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ουσία και φυτικά θρεπτικά συστατικά και ως εκ τούτου έχει τη δυνατότητα να ενισχύσει την παραγωγικότητα του εδάφους και συνεπώς την φυτική βιομάζα. Επιπλέον, η εκτεταμένη ρύπανση των εδαφών από βαρέα μέταλλα είχε ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση της βιομάζας των φυτικών ειδών, της μικροβιακή βιομάζα και των ενζυμικών δραστηριοτήτων του εδάφους.

5.1.5 pH & EC

Στην παρούσα μελέτη, η προσθήκη κομπόστ αύξησε αμέσως το αρχικό pH των απορριμμάτων (pH 2.69) αλλά το αποτέλεσμα ήταν ακόμα πιο βέλτιστο για τις επεξεργασίες κομπόστ 10% (pH 3.49), 25% (pH 4.08) και 50% (pH 5.89) (βλ. Πίνακας 10 και Διάγραμμα 6). Τα φυτά που αυξήθηκαν και αναπτύχθηκαν καλύτερα ήταν αυτά στις συγκεντρώσεις 25 και 50% προσθήκης κομπόστ σε tailings. Ως απόρροια, εκφράζεται ξεκάθαρη θετική συσχέτιση μεταξύ των αυξημένων τιμών pH στο έδαφος με την παραγωγή φυτικής βιομάζας.

Για παράδειγμα, στην έρευνα των Anawar et al. (2013) σχολιάζεται η αρνητική συσχέτιση χαμηλού pH και βλαστικότητας στην περιοχή εξόρυξης πυρίτη São Domingos. Σαφέστερα, οι επιστήμονες αναφέρουν ότι το έδαφος με χαμηλό pH εμπόδισε τις ρίζες των φυτών να απορροφήσουν θρεπτικά συστατικά με αποτέλεσμα τη χαμηλή ανάπτυξη και κάλυψη της βλάστησης στο μεταλλείο. Απεναντίας, τονίζεται ότι υπό συνθήκες σχεδόν ουδέτερου pH εμφανίζεται εκτεταμένη έκταση και ποικιλία φυτικής κάλυψης επειδή η κατάσταση του εδάφους λόγω του υψηλότερου pH υποστήριξε την διαδικασία βλάστησης και επιβίωσης των σπόρων ακόμα και σε μεγάλες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων.

Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τον Πίνακα 5 των Stylianou et al. (2014) η σύνθεση του δείγματος εδάφους μετρήθηκε για 9 στοιχεία. Ελλείψει κυπριακής νομοθεσίας που αφορά άμεσα τη ρύπανση του εδάφους, αναζητήθηκαν τα επιτρεπόμενα όρια που ισχύουν σε άλλες χώρες και επιλέχθηκε η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα καναδικά πρότυπα. Τα κύρια αποτελέσματα ήταν ότι, όλα τα δείγματα που εξετάστηκαν ήταν πλούσια σε περιεκτικότητα σε σίδηρο και επιβεβαιώνουν την παρουσία πυρίτη που εντοπίστηκε κατά την οπτική περιγραφή. Επίσης, τα δείγματα εδάφους που συλλέχθηκαν από τους σωρούς πυρίτη (MATH4 και 7) περιείχαν υψηλότερες συγκεντρώσεις ψευδάργυρου σε σχέση με τα άλλα δείγματα και πάνω από τα επιτρεπτά όρια από τις καναδικές οδηγίες. Τα δείγματα χαρακτηρίστηκαν από υψηλές συγκεντρώσεις χαλκού, αρσενικού και σεληνίου, οι οποίες επίσης υπερβαίνουν τα όρια για τα καναδικά πρότυπα. Ακόμη, οι συγκεντρώσεις μόλυβδου είναι πάνω από τα όρια για τη γεωργία και για εδάφη οικιστικών περιοχών. Επιπλέον, κρούστες αλατιού παρατηρήθηκαν σε εφήμερα ρυάκια εντός και εκτός του κρατήρα του μεταλλείου που

ενδέχεται να απειλήσουν το παρακείμενο οικοσύστημα λόγω της υψηλής οξύτητας και των μετάλλων που μπορούν να εκπλυθούν κατά τη διάρκεια μιας βροχόπτωσης.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), αποτελεί ένας χρήσιμος δείκτης ποιότητας του εδάφους ο οποίος μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και να μετρηθεί. Η EC ενός διαλύματος σχετίζεται με τα συνολικά κατιόντα ή ανιόντα που βρίσκονται σε ένα διάλυμα. Τα ιόντα αυτά μπορεί να είναι είτε κατιόντα (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+) είτε ανιόντα (NO_3^- , SO_4^- , Cl^- , HCO_3^- , CO_3^- , OH^-), τα οποία είναι διαλυτά σε εδαφικά διαλύματα. Επιπλέον, η ηλεκτρική αγωγιμότητα έχει γενικά συσχετιστεί με τον προσδιορισμό της αλατότητας του εδάφους, ωστόσο, μπορεί επίσης να χρησιμεύσει ως μέτρο διαλυτών θρεπτικών συστατικών - τόσο κατιόντων όσο και ανιόντων. Επομένως, εντός ενός συγκεκριμένου εύρους, η EC θα υποδείκνυε καλή διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών για τα φυτά, με τις χαμηλότερες τιμές να υποδηλώνουν φτωχό σε θρεπτικά συστατικά έδαφος που είναι δομικά ασταθές (Smith & Doran, 1996).

Σύμφωνα με τους Stylianou et al. (2014) οι αναλύσεις δειγμάτων νερού αποκαλύπτουν ότι το pH των δειγμάτων νερού που λήφθηκαν από τη λίμνη του κρατήρα θεωρήθηκαν ως πολύ όξινα ($\text{pH} = 2,93\text{-}3,04$) με πολύ υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα (5690 - 5730 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Παράλληλα, οι τιμές της EC που μετρήθηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας έδειξαν ότι η προσθήκη οργανικής ουσία μέσω κομπόστ αύξησε την ηλεκτρική αγωγιμότητα αφού συγκρατούνται περισσότερα ιόντα.

5.1.6 Φυτοτοξικότητα

Το επίπεδο επίδρασης φυτοτοξικότητας στα είδη αξιολογείται με την χρήση του δείκτη βλαστικότητας (GI) και σαφέστερα με υπολογισμό του ποσοστού βλάστησης των σπόρων στα δείγματα και το συνολικό ύψος των ριζών που αναπτύχθηκαν. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 7, τα δείγματα απορριμμάτων με 0% τροποποίηση κομπόστ εμφάνισαν μεγάλη έως μέτρια τοξικότητα καθώς ο δείκτης βλαστικότητας ήταν μόλις 6.77%, ενώ στα tailings με 10% κομπόστ το GI ήταν 39.70%. Ταυτόχρονα, σημαντική αύξηση του ποσοστού GI έδειξαν οι υπόλοιπες τροποποιήσεις με κομπόστ 25% και 50% με το GI να σημειώνει μεγάλη αύξηση με 48.53% και 59.38% αντίστοιχα. Επιπλέον, το κομπόστ φανέρωσε τεράστια επίδραση φυτοτοξικότητας στους σπόρους καρδάμου καθώς το GI ήταν μόλις 12,75%. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να συνδεθεί με το γεγονός

ότι το κομπόστ από μόνο του δεν έχει την δυνατότητα να προωθήσει την βλάστηση και την ανάπτυξη φυτών καθώς δεν μπορεί να παρέχει στα φυτά όλα τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά. Συνεπώς, το κομπόστ χωρίς ανάμειξη με γόνιμο χώμα δεν μπορεί να υποστηρίξει φυσιολογικές βιολογικές διαδικασίες όπως η ανάπτυξη και η αύξηση σπερμάτων και σπόρων φυτικών ειδών. Σε αντίθεση, η εφαρμογή κομπόστ σε συνδυασμό με απορρίμματα μεταλλείου έχει την ικανότητα να ενισχύσει την βλαστικότητα των σπόρων.

Συμπερασματικά, γενικά οι τροποποιήσεις με αυξημένα ποσοστά κομπόστ εξασφάλισαν θετικά αποτελέσματα ανάπτυξης ριζών και βλαστών συγκρίσιμα με αυτά των σπόρων του ίδιου είδους που αναπτύχθηκαν χωρίς την επίδραση κομπόστ ή με μικρή συγκέντρωση κομπόστ. Κατά συνέπεια, το GI (germination index) των φυτών που υποβλήθηκαν σε 25% και 50% κομπόστ παρουσίασαν πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα σε σχέση με τις επερχόμενες φάσεις ανάπτυξης των φυτών. Εντούτοις, σημαντικές διαφορές διαπιστώθηκαν στο μήκος και το ξηρό βάρος της ρίζας, του βλαστού και των φύλλων στις συγκεντρώσεις tailings με κομπόστ. Συνεπώς, εκφράζεται ξεκάθαρη υπεροχή των τροποποιήσεων 25% και 50% με κομπόστ για την αποδοτική προώθηση της ανάπτυξης των φυτών. Τα εδάφη των μεταλλείων είναι γνωστό ότι χαρακτηρίζονται από έλλειψη θρεπτικών ουσιών που θέτει σε σοβαρό κίνδυνο την ανάπτυξη των φυτών. Εντούτοις, η εφαρμογή κομπόστ είναι μια αποτελεσματική πρακτική όχι μόνο για την αύξηση του pH και τη σταθεροποίηση των ιχνοστοιχείων, αλλά και για την παροχή θρεπτικών ουσιών και οργανικής ύλης που είναι θεμελιώδη για την φυσιολογική ανάπτυξη των φυτών.

Αναντίρρητα, οι ρίζες των φυτικών ειδών επηρεάζονται περισσότερο από την τοξικότητα των βαρέων μετάλλων σε σύγκριση με τους βλαστούς, αφού οι ρίζες είναι υπεύθυνες για την απορρόφηση του νερού και των θρεπτικών συστατικών από το έδαφος (Novo & Gonzalez, 2014). Σε άλλη μελέτη των Pavel et al. (2013), μελετήθηκαν οι φυτοτοξικές επιδράσεις των βαρέων μετάλλων στη βλάστηση και την ανάπτυξη των φυτών. Το φυτικό είδος *Lepidium sativum* χρησιμοποιήθηκε ως δοκιμαστικό φυτό, με τη διεξαγωγή δοκιμών βλάστησης για 3 ημέρες έκθεσης σε εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα βαρέων μετάλλων. Η τοξικότητα των εκχυλισμάτων που δοκιμάστηκαν παρατηρείται στον βαθμό ανάπτυξης του μήκους της ρίζας και συνεπώς στον δείκτη βλαστικότητας (GI). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα βαρέα μέταλλα έχουν ανασταλτική επίδραση στη

διαδικασία βλάστησης των σπόρων. Ο βαθμός αναστολής εξαρτάται από τα δοκιμασμένα μέταλλα και τις συγκεντρώσεις τους σε υδατικό διάλυμα. Σε χαμηλές συγκεντρώσεις, έως 20-25 mg/L, η ανασταλτική δράση στη διαδικασία βλάστησης είναι χαμηλή καθώς τα μεταλλικά ιόντα πιθανόν να συμπεριφέρονται ως θρεπτικά συστατικά. Στον αντίποδα, σε συγκεντρώσεις 250-300 mg/L παρατηρείται αναστολή της βλάστησης κατά 50% περίπου. Επιπλέον, σε υψηλές συγκεντρώσεις κομπόστ, η ανασταλτική δράση στη διαδικασία βλάστησης μειώνεται και τα βαρέα μέταλλα πιθανότατα συμπεριφέρονται ως θρεπτικά συστατικά, ενώ σε χαμηλές συγκεντρώσεις κομπόστ σημειώνεται αναστολή στη βλάστηση. Συνεπώς, τα φυτά αντιμετωπίζουν σημαντική τοξικότητα λόγω της έκθεσης σε μεγάλες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων.

5.2 Περιορισμοί της μελέτης

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματοποιείται με δοκιμές φύτευσης των φυτικών ειδών *Medicago sativa* και *Pinus brutia* σε tailings με προσθήκη κομπόστ για την αξιολόγηση της βλαστικότητας των ειδών. Το πείραμα έβαλε χώρα σε γλάστρες και σε θερμοκήπιο με ελεγχόμενες συνθήκες όπως η θερμοκρασία και η ποσότητα νερού που έλαβαν τα φυτά. Κατά την διεκπεραίωση των πειραμάτων, διαπιστώθηκαν πολλαπλοί περιορισμοί που προέκυψαν από την υιοθέτηση και την εφαρμογή της μεθοδολογίας.

Καταρχάς, επιμέρους σκοπός της εργασίας ήταν η εισήγηση εφαρμογής της πρακτικής ανάμειξης tailings με κομπόστ στο πεδίο για την αποδοτικότερη ανάπτυξη και αύξηση της χλωρίδας της περιοχής. Εντούτοις, η ατομική επιτυχία των φυτών και η δυνητική τους φύτευση στο πεδίο ήταν μια πτυχή που δεν αξιολογήθηκε εκτενώς. Το *Medicago sativa* που έδειξε πολλά υποσχόμενο στις δοκιμές του θερμοκηπίου πιθανόν να μην αναπτυχθεί με επιτυχία στο πεδίο. Η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων του θερμοκηπίου και του πεδίου θα μπορούσε να οφείλεται στον ανταγωνισμό μεταξύ των φυτικών ειδών που εμφανίζονται στην περιοχή. Ο ανταγωνισμός δεν δοκιμάστηκε στις μελέτες θερμοκηπίου αφού έγινε αραίωση, αλλά τα φυτά δοκιμάστηκαν μεμονωμένα σε ξεχωριστές γλάστρες. Μια τελική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι, οι βραχυπρόθεσμες δοκιμές θερμοκηπίου με ελεγχόμενο κλίμα δεν λαμβάνουν υπόψη την επίδραση των εποχιακών κλιματικών επιπτώσεων στη βλάστηση και την ανάπτυξη των φυτών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους (πχ. εποχιακές αλλαγές υγρασίας, καταιγίδες και θερμοκρασία).

Συμπληρωματικά, άλλος περιορισμός που προκύπτει από το πείραμα στο θερμοκήπιο είναι ότι σε πολύ ρυπασμένες τοποθεσίες (υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, χαμηλό pH) μπορεί να απαιτούνται υψηλά επίπεδα υλικού κομποστοποίησης για την επιτυχή εγκατάσταση φυτών γεγονός που αυξάνει το κόστος αποκατάστασης.

5.3 Συμπεράσματα

Είναι συχνά δύσκολο και χρονοβόρο να δημιουργηθεί βλάστηση στα απορρίμματα, με κύριους περιορισμούς στα φυτά να είναι η χαμηλή διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών και η τοξικότητα των βαρέων μετάλλων. Συνεπώς, η βελτίωση των ιδιοτήτων των tailings αποτελεί βασικός στόχος των προγραμμάτων αποκατάστασης των μεταλλείων. Η χρήση διαφορετικών διαδικασιών αποκατάστασης για τη βελτίωση της ποιότητας του εδάφους δεν συμβάλλει μόνο στην απορρύπανση των εδαφών, αλλά συγχρόνως συμβάλλει και στη δημιουργία φυτικής κάλυψης, προωθώντας έτσι την αναγέννηση αυτών των περιβαλλόντων (McIntyre, 2003). Εκτός από τα οργανικά λιπάσματα που χρησιμοποιούνται συνήθως στην αποκατάσταση σε υψηλές δόσεις, το κομπόστ αποτελεί μια καλή επιλογή ως εδαφοβελτιωτικό. Ειδικότερα, το κομπόστ μπορεί να βελτιώσει τις παραμέτρους ποιότητας του εδάφους, καθώς είναι πηγή οργανικής ύλης και πηγή θρεπτικών ουσιών N, P και K που σχετίζονται με την αύξηση και ανάπτυξη των φυτών (Ai et al., 2020).

Πράγματι, τα απορρίμματα μεταλλείων επιφέρουν επιβλαβείς επιπτώσεις στο περιβάλλον. Τα απορρίμματα έχουν συνήθως χαμηλό pH, υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, έλλειψη θρεπτικών ουσιών, χαμηλή ικανότητα συγκράτησης νερού, υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και χαρακτηρίζονται από απότομες κλίσεις (Conesa et al., 2006). Αυτοί οι παράγοντες εμποδίζουν την επιτυχή εγκατάσταση των φυτών και κατά συνέπεια, οι επιφάνειές των tailings εκτίθενται σε αιολική και υδάτινη διάβρωση με αποτέλεσμα τη ρύπανση των κοντινών νερών και εδαφών με τοξικά μέταλλα. Αν και η φυσική αναβλάστηση των απορριμμάτων μεταλλείων είναι συνήθως αργή, μερικά είδη φυτών ανθεκτικά σε μέταλλα μπορούν να επιβιώσουν σε αυτά τα ακραία περιβάλλοντα (Conesa et al., 2009).

Είναι σαφές ότι κάποιο είδος τροποποίησης, όπως η προσθήκη οργανικής ύλης (κομπόστ), απαιτείται για την άμεση αύξηση του pH των απορριμμάτων. Βραχυπρόθεσμα, αυτό το αυξημένο pH επιτρέπει στα φυτά να βλαστήσουν και να αναπτυχθούν και επίσης μειώνει την συγκέντρωση βαρέων μετάλλων και καταστέλλει την οξειδωτική δραστηριότητα των απορριμμάτων. Βέβαια, μακροπρόθεσμα τα απορρίμματα πιθανόν να συνεχίσουν να δημιουργούν αντίξοες συνθήκες περιβάλλοντος ειδικά όταν εκτίθενται σε υγρασία και οξυγόνο, παράμετροι που είναι επίσης απαραίτητοι για την ανάπτυξη των φυτών. Συνεπώς, οι χαμηλές τιμές pH θα επανέλθουν μετά από ένα χρονικό διάστημα και θα συμβάλει στην ανάπτυξη ενός περιβάλλοντος αφιλόξενου για τα φυτά (Solís-Dominguez et al., 2012).

Αναμφισβήτητα, οι εξορυκτικές δραστηριότητες έχουν ήδη προκαλέσει την απώλεια της βιοποικιλότητας σε πολλά μέρη του κόσμου. Επιπρόσθετα, λόγω της μεγάλης κλίμακας δραστηριοτήτων εξόρυξης ανοιχτού λάκκου, μια σειρά περιβαλλοντικών προβλημάτων όπως η διάβρωση της γης, η κακή ποιότητα του εδάφους και του νερού, η ρύπανση από βαρέα μέταλλα, η περιορισμένη βλάστηση, η υποβάθμιση των υπόγειων υδάτων, οι γεωλογικοί κίνδυνοι, η απόρριψη απορριμμάτων και οι ζημιές στις υποδομές παρατηρούνται σε πολλές περιοχές εξόρυξης. Επομένως, πριν από την υιοθέτηση ενός προγράμματος αποκατάστασης και οικολογικής αποκατάστασης μεταλλείων σε μια πληγείσα περιοχή εξόρυξης, απαιτείται περιβαλλοντική εκτίμηση του μεγέθους της ρύπανσης προκειμένου να κατανοηθούν οι εγγενείς αιτίες των επιδράσεων των εξορυκτικών δραστηριοτήτων στην εξέλιξη και την κάλυψη της βλάστησης. Ως εκ τούτου, για την καταπολέμηση των συνεπειών της υποβάθμισης της γης και της ρύπανσης από τις εξορυκτικές δραστηριότητες, απαιτούνται δραστικά διορθωτικά μέτρα, όπως η ανάπτυξη της βλάστησης, η οικολογική αποκατάσταση και η φυτοαποκατάσταση έτσι ώστε να επιτευχθεί η σταθεροποίηση των σωρών των εξορυκτικών αποβλήτων (Anawar et al., 2013).

Επίσης, η μεταφορά διαλυμένων μετάλλων από τοποθεσίες εξόρυξης ενισχύεται σημαντικά από την OAM. Η παραγωγή της OAM προκύπτει από την οξείδωση των σουλφιδίων σε σωρούς απορριμμάτων και παράγει όξινα στραγγίσματα που περιέχουν εξαιρετικά υψηλές συγκεντρώσεις σιδήρου και θεικού, μαζί με τοξικά μέταλλα και μεταλλοειδή. Για παράδειγμα, στις ισπανικές τοποθεσίες, η OAM είναι υπεύθυνη για τη μόνιμη οξύτητα των ποταμών Odiel και Tinto και για τη μεταφορά τεράστιων ποσοτήτων

διαλυμένων μετάλλων στις εκβολές, αυξάνοντας τη ροή των μετάλλων στη Μεσόγειο Θάλασσα. Η μαζική συσσώρευση μεταλλικών ρύπων αποτελεί σοβαρή απειλή για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί ιδιαίτερη ανησυχία σε σχέση με το μεσογειακό κλίμα, το οποίο επιταχύνει σημαντικά τη διάβρωση του εδάφους και ενεργοποιεί τη μεταφορά σωματιδιακών ρύπων μετάλλων από τον άνεμο ή το νερό (Doumas et al., 2018).

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα του πειράματος συμβαδίζουν με τα αποτελέσματα άλλων ερευνών. Για παράδειγμα, η προσθήκη κομπόστ στα απορρίμματα μεταλλείων έχει αποδειχθεί ότι ενισχύει την ανάπτυξη των φυτών σε δοκιμές θερμοκηπίου. Εκτός από τα επίπεδα του pH που αυξάνονται με την τροποποίηση του κομπόστ, συμβαίνει επίσης μείωση στον αριθμό των βαρέων μετάλλων που αποδίδονται λόγω των tailings και των οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων. Επιπλέον, το κομπόστ μπορεί να αυξήσει την ικανότητα συγκράτησης νερού στο έδαφος (Mendez & Maier, 2008). Μια εφάπαξ προσθήκη οργανικής ύλης με τη μορφή κομπόστ έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ανάπτυξης των φυτών και της βιομάζας, επιτυγχάνοντας έτσι μια επιτυχημένη και ταχεία φυτική κάλυψη (Schroeder et al., 2005).

5.4 Εισηγήσεις

Αναμφίβολα, η Κύπρος όπως και κάθε άλλη χώρα με παλαιότερη έντονη εξορυκτική βιομηχανία, έχει πλέον αποκτήσει ως κληρονομιά τεράστιες ποσότητες απορριμμάτων μεταλλείων που αποτελούν απειλή για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία. Συνεπώς, επιτακτική ανάγκη έχουν οι αρμόδιοι φορείς και τμήματα να αξιολογήσουν και να διαχειριστούν κατάλληλα τα απορρίμματα μεταλλείων μετά από αναλυτική εκτίμηση του βαθμού ρύπανσης.

Καταρχάς, η διπλωματική αυτή μελέτη αποτελεί μέρος μιας σειράς μελετών που επιχειρούν να αξιολογήσουν τις δυνατότητες αποκατάστασης tailings μεταλλείων με την εφαρμογή κομπόστ σε εδάφη που έχουν ρυπανθεί ως αποτέλεσμα της εξορυκτικής δραστηριότητας. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης, αναμένεται να βοηθήσουν τις τοπικές αρχές και άλλους ενδιαφερόμενους φορείς στην κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των οικολογικών κινδύνων που προέρχονται από τη εγκατάλειψη των μεταλλείων της Κύπρου και ως εκ τούτου να συμβάλει στη λήψη

απόφασης και ορθής στρατηγικής αναφορικά με την ολοκληρωμένη διαχείριση τέτοιων χώρων. Το γεγονός ότι τα σημαντικά αποτελέσματα του θερμοκηπίου έχουν την ικανότητα να κλιμακωθούν αποτελεσματικά στο πεδίο υποδηλώνει ότι οι δοκιμές θερμοκηπίου είναι ένα χρήσιμο προκαταρκτικό βήμα για αυτήν την πρακτική.

Τα χαρακτηριστικά των απορριμμάτων μεταλλείων ποικίλλουν αρκετά από τοποθεσία σε τοποθεσία όσον αφορά την ορυκτολογία, το pH και την περιεκτικότητα σε μέταλλα. Επομένως, οι προκαταρκτικές δοκιμές θερμοκηπίου που μπορούν να καθορίσουν με ακρίβεια την ελάχιστη ποσότητα κομπόστ ή άλλες απαραίτητες τροποποιήσεις, καθώς και φυτά που μπορούν να εγκατασταθούν επιτυχώς, πιθανότατα θα ενισχύσουν την επιτυχή εφαρμογή αυτής της πρακτικής. Η συγκεκριμένη δοκιμή σε θερμοκήπιο με ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες δείχνει ότι η απευθείας φύτευση υποβοηθούμενη από κομπόστ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εγκατάσταση φυτών σε απορρίμματα μεταλλείων με υψηλή περιεκτικότητα βαρέων μετάλλων και χαμηλό pH. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα του θερμοκηπίου μπορούν να καθοδηγήσουν την επιτυχημένη εκπλήρωση αυτής της τεχνολογίας στο πεδίο. Τέλος, ύψιστης σημασίας αποτελεί η κατανόηση των ορυκτολογικών ελέγχων σε μεταλλικά και μεταλλοειδή στοιχεία σε αυτά τα συστήματα, καθώς θα καθορίσουν τον βαθμό στον οποίο αυτά τα στοιχεία θα ανακατανεμηθούν εάν αλλάξουν οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Εν κατακλείδι, χωρίς την εκδήλωση συλλογικής προσπάθειας από το κράτος και τους αρμόδιους φορείς η αντιμετώπιση του προβλήματος καθίσταται δυσχερής.

Παράρτημα Α

Φωτογραφίες

Α.1 Παρατήρηση και Δειγματοληψία πεδίου



Εικόνα 1: Συλλογή tailings και μεταφορά στο ΙΓΕ.



Εικόνα 2. Απορρίμματα εγκαταλελειμμένου μεταλλείου Β. Μαθιάτη



Εικόνες 3 & 4. Όξινη απορροή μεταλλείων



Εικόνα 5. Ανάμειξη tailings με κομπόστ.

12^η ημέρα



35^η ημέρα

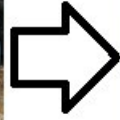


47^η ημέρα

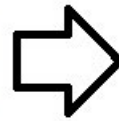


Εικόνες 6, 7 & 8: 0% συγκέντρωση κομπόστ σε tailings.

12^η ημέρα



35^η ημέρα



47^η ημέρα



Εικόνες 9,10 & 11: 10% συγκέντρωση κομπόστ με tailings.

12^η ημέρα



35^η ημέρα



47^η ημέρα



Εικόνες 12, 13 & 14: 25% συγκέντρωση κομπόστ με tailings.

12^η ημέρα



25^η ημέρα



39^η ημέρα



60^η ημέρα

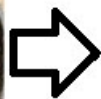


Εικόνες 15, 16, 17, 18: 50% συγκέντρωση κομπόστ με tailings.

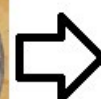
12^η ημέρα



25^η ημέρα



39^η ημέρα



60^η ημέρα



Εικόνες 19, 20, 21 & 22: χώμα control.

Βιβλιογραφία

- Abubakari, M., Moomin, A., Nyarko, G., & Dawuda, M. M. (2017). Heavy metals concentrations and risk assessment of roselle and jute mallow cultivated with three compost types. *Annals of Agricultural Sciences*, 62(2), 145–150. <https://doi.org/10.1016/J.AOAS.2017.11.001>.
- Adamides, N. G. (2014). South Mathiatis: An unusual volcanogenic sulphide deposit in the Troodos ophiolite of Cyprus. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section B: Applied Earth Science*, 122(4), 194–206. <https://doi.org/10.1179/1743275814Y.0000000037>.
- Adriano, D. C., Wenzel, W. W., Vangronsveld, J., & Bolan, N. S. (2004). Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma*, 122(2-4 SPEC. IIS.), 121–142. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2004.01.003>.
- Ai, Y. J., Li, F. P., Gu, H. H., Chi, X. J., Yuan, X. T., & Han, D. Y. (2020). Combined effects of green manure returning and addition of sewage sludge compost on plant growth and microorganism communities in gold tailings. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(25), 31686–31698. <https://doi.org/10.1007/S11356-020-09118-Z>.
- Alday, J. G., Marrs, R. H., & Martínez Ruiz, C. (2011). Vegetation succession on reclaimed coal wastes in Spain: the influence of soil and environmental factors. *Applied Vegetation Science*, 14(1), 84–94. <https://doi.org/10.1111/J.1654-109X.2010.01104.X>.
- Anawar, H. M., Canha, N., Santa-Regina, I., & Freitas, M. C. (2013). Adaptation, tolerance, and evolution of plant species in a pyrite mine in response to contamination level and properties of mine tailings: Sustainable rehabilitation. *Journal of Soils and Sediments*, 13(4), 730–741. <https://doi.org/10.1007/S11368-012-0641-7/FIGURES/3>.
- Anderson, J. P. E. (1982). Soil Respiration. In A. L. Page (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9.2.2, Second Edition (pp. 831–871). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2134/AGRONMONOGR9.2.2ED.C41>.
- Anderson, T. H. (2003). Microbial eco-physiological indicators to asses soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 98(1–3), 285–293. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00088-4).
- Anning, A. K., & Akoto, R. (2018). Assisted phytoremediation of heavy metal contaminated soil from a mined site with *Typha latifolia* and *Chrysopogon zizanioides*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148, 97–104. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2017.10.014>.
- Banerjee, M. R., Burton, D. L., & Depoe, S. (1997). Impact of sewage sludge application, on soil biological characteristics. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 66(3), 241–249. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(97\)00129-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(97)00129-1).
- Baycu, G., Tolunay, D., Ozden, H., Csatari, I., Karadag, S., Agba, T., & Rognes, S. E. (2015). An Abandoned Copper Mining Site in Cyprus and Assessment of Metal Concentrations in Plants and Soil. *International Journal of Phytoremediation*, 17(7), 622–631. <https://doi.org/10.1080/15226514.2014.922929>.

- Benke, A. C., & Huryn, A. D. (2007). Secondary Production of Macroinvertebrates. In *Methods in Stream Ecology* (Second Edition, pp. 691–710). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012332908-0.50041-3>.
- Bewley, J. D., Bradford, K. J., Hilhorst, H. W. M., & Nonogaki, H. (2013). Germination. *Seeds*, 133–181. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4693-4_4.
- Bolan, N. S., Park, J. H., Robinson, B., Naidu, R., & Huh, K. Y. (2011). Phytostabilization: A Green Approach to Contaminant Containment. *Advances in Agronomy*, 112, 145–204. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385538-1.00004-4>.
- Borken, W., Muhs, A., & Beese, F. (2002). Application of compost in spruce forests: effects on soil respiration, basal respiration and microbial biomass. *Forest Ecology and Management*, 159(1–2), 49–58. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00709-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00709-5).
- Burckhard, S. R., Schwab, A. P., & Banks, M. K. (1995). The effects of organic acids on the leaching of heavy metals from mine tailings. *Journal of Hazardous Materials*, 41(2–3), 135–145. [https://doi.org/10.1016/0304-3894\(94\)00104-0](https://doi.org/10.1016/0304-3894(94)00104-0).
- Businelli, D., Massaccesi, L., Said-Pullicino, D., & Gigliotti, G. (2009). Long-term distribution, mobility and plant availability of compost-derived heavy metals in a landfill covering soil. *Science of The Total Environment*, 407(4), 1426–1435. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2008.10.052>.
- Cetinkaya, G., & Sozen, N. (2011). Plant species potentially useful in the phytostabilization process for the abandoned CMC mining site in northern Cyprus. *International Journal of Phytoremediation*, 13(7), 681–691. <https://doi.org/10.1080/15226514.2010.500155>.
- Charalambides, A., Petrides, G., Pashalidis, I., Charalambides, A., Petrides, G., & Pashalidis, I. (2003). Rainwater characteristics over an old sulphide mine refuse in Sha, Cyprus. *Atmospheric Environment*, 37(14), 1921–1926. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00050-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00050-5).
- Chen, F., Wang, S., Mou, S., Azimuddin, I., Zhang, D., Pan, X., Al-Misned, F. A., & Mortuza, M. G. (2015). Physiological responses and accumulation of heavy metals and arsenic of *Medicago sativa* L. growing on acidic copper mine tailings in arid lands. *Journal of Geochemical Exploration*, 157, 27–35. <https://doi.org/10.1016/J.GEXPLO.2015.05.011>.
- Christou, A., Theologides, C. P., Costa, C., Kalavrouziotis, I. K., & Varnavas, S. P. (2017). Assessment of toxic heavy metals concentrations in soils and wild and cultivated plant species in Limni abandoned copper mining site, Cyprus. *Journal of Geochemical Exploration*, 178, 16–22. <https://doi.org/10.1016/J.GEXPLO.2017.03.012>.
- Cohen, D. R., Zissimos, A. M., Schifano, J. A., & Rutherford, N. F. (2021). Biogeochemical response of *Pinus brutia* and *Olea europaea* to lithological variations and Cu mineralisation in Cyprus. *Science of The Total Environment*, 759, 143434. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.143434>.
- Cohen, D. R., Rutherford, N. F., Morisseau, E., Christoforou, I., & Zissimos, A. M. (2012). Anthropogenic versus lithological influences on soil geochemical patterns in Cyprus. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 12(4), 349–360. <https://doi.org/10.1144/GEOCHEM2011-111>.
- Conesa, H. M., Moradi, A. B., Robinson, B. H., Kühne, G., Lehmann, E., & Schulin, R. (2009). Response of native grasses and *Cicer arietinum* to soil polluted with mining wastes: Implications for the

- management of land adjacent to mine sites. *Environmental and Experimental Botany*, 65(2–3), 198–204. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2008.09.004>.
- Conesa, H. M., Faz, Á., & Arnaldos, R. (2006). Heavy metal accumulation and tolerance in plants from mine tailings of the semiarid Cartagena-La Unión mining district (SE Spain). *The Science of the Total Environment*, 366(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2005.12.008>
- Diaconu, M., Pavel, L. V., Hlihor, R. M., Rosca, M., Fertu, D. I., Lenz, M., Corvini, P. X., & Gavrilescu, M. (2020). Characterization of heavy metal toxicity in some plants and microorganisms—A preliminary approach for environmental bioremediation. *New Biotechnology*, 56, 130–139. <https://doi.org/10.1016/J.NBT.2020.01.003>.
- Dindar, E., Şağban, F. O., & Başkaya, H. S. (2015). Evaluation-of soil enzyme activities as soil quality indicators in sludge-amended soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 36(4), 919–926.
- Doumas, P., Munoz, M., Banni, M., Becerra, S., Bruneel, O., Casiot, C., Cleyet-Marel, J. C., Gardon, J., Noack, Y., & Sappin-Didier, V. (2018). Polymetallic pollution from abandoned mines in Mediterranean regions: a multidisciplinary approach to environmental risks. *Regional Environmental Change*, 18(3), 677–692. <https://doi.org/10.1007/S10113-016-0939-X>.
- Farrag, K., Senesi, N., Nigro, F., Petrozza, A., Palma, A., Shaarawi, S., & Brunetti, G. (2012). Growth responses of crop and weed species to heavy metals in pot and field experiments. *Environmental Science and Pollution Research*, 19(8), 3636–3644. <https://doi.org/10.1007/S11356-012-0951-8/TABLES/4>.
- Fent, K. (2004). Ecotoxicological effects at contaminated sites. *Toxicology*, 205(3), 223–240. <https://doi.org/10.1016/J.TOX.2004.06.060>.
- Ferguson, C. C. (1999). Assessing Risks from Contaminated Sites: Policy and Practice in 16 European Countries. *Land Contamination & Reclamation*, 7(2).
- Freitas, H., Prasad, M. N. V., & Pratas, J. (2004). Plant community tolerant to trace elements growing on the degraded soils of São Domingos mine in the south east of Portugal: environmental implications. *Environment International*, 30(1), 65–72. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00149-1](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00149-1).
- Fuentes, D., Disante, K. B., Valdecantos, A., Cortina, J., & Vallejo, V. R. (2007). Sensitivity of Mediterranean woody seedlings to copper, nickel and zinc. *Chemosphere*, 66(3), 412–420. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2006.06.027>.
- Fuentes, A., Lloréns, M., Sáez, J., Aguilar, M. I., Ortuño, J. F., & Meseguer, V. F. (2004). Phytotoxicity and heavy metals speciation of stabilised sewage sludges. *Journal of Hazardous Materials*, 108(3), 161–169. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2004.02.014>.
- Galanopoulos, E., Skarpelis, N., & Argyraki, A. (2019). Supergene alteration, environmental impact and laboratory scale acid water treatment of Cyprus-type ore deposits: case study of Mathiatis and Sha abandoned mines. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 19(4), 299–315. <https://doi.org/10.1144/GEOCHEM2018-070>.
- Garbisu, C., & Alkorta, I. (2001). Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresource Technology*, 77(3), 229–236. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00108-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00108-5).

- Gavriel, I., Kostarelos, K., Stylianou, M., & Pourjabbar, A. (2014). Contaminant transport mechanisms at an abandoned sulfide mine. *Environmental Geotechnics*, 1(4), 222–239. <https://doi.org/10.1680/ENVGEO.13.00006>.
- Gil-Loaiza, J., White, S. A., Root, R. A., Solís-Dominguez, F. A., Hammond, C. M., Chorover, J., & Maier, R. M. (2016). Phytostabilization of Mine Tailings Using Compost-Assisted Direct Planting: Translating Greenhouse Results to the Field. *The Science of the Total Environment*, 565, 451. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.168>.
- Głąb, T., Żabiński, A., Sadowska, U., Gondek, K., Kopeć, M., Mierzwa-Hersztek, M., & Tabor, S. (2018). Effects of co-composted maize, sewage sludge, and biochar mixtures on hydrological and physical qualities of sandy soil. *Geoderma*, 315, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.034>.
- Global Environmental Governance (GEG) (2022). <https://www.environmentalgovernance.org/>. Accessed (March 2022).
- Gokcekus, H., Kabdasli, S., Kabdasli, I., Turker, U., Tunay, O., & Olmez, T. (2003). Pollution of coastal region impacted by acid mine drainage in Morphou bay, northern Cyprus. *Journal of Environmental Science and Health. Part A, Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 38(8), 1445–1457. <https://doi.org/10.1081/ESE-120021469>.
- Grandlic, C. J., Palmer, M. W., & Maier, R. M. (2009). Optimization of Plant Growth-Promoting Bacteria-Assisted Phytostabilization of Mine Tailings. *Soil Biology & Biochemistry*, 41(8), 1734. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.05.017>.
- Gündüz, Ş., Erbulut, C., Öznacar, B., & Baştaş, M. (2016). Determination of Consciousness and Awareness of the Public in Lefka about the Cyprus Mining Corporation (CMC). *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 12(4), 783–792. <https://doi.org/10.12973/EURASIA.2016.1256A>.
- Gucel, S., Ozturk, M., Yucel, E., Kadis, C., & Guevensen, A. (2009). Studies on trace metals in soils and plants growing in the vicinity of copper mining area - Lefke, Cyprus. *Fresenius Environmental Bulletin*, 18(3), 360–368.
- Hadjipanagiotou, C., Christou, A., Zissimos, A. M., Chatzitheodoridis, E., & Varnavas, S. P. (2020). Contamination of stream waters, sediments, and agricultural soil in the surroundings of an abandoned copper mine by potentially toxic elements and associated environmental and potential human health-derived risks: a case study from Agrokipia, Cyprus. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33), 41279–41298. <https://doi.org/10.1007/S11356-020-10098-3/TABLES/6>.
- Hagner, M., Uusitalo, M., Ruhanen, H., Heiskanen, J., Peltola, R., Tiilikkala, K., Hyvönen, J., Sarala, P., & Mäkitalo, K. (2021). Amending mine tailing cover with compost and biochar: effects on vegetation establishment and metal bioaccumulation in the Finnish subarctic. *Environmental Science and Pollution Research International*, 28(42), 59881. <https://doi.org/10.1007/S11356-021-14865-8>.
- Hand, R., Hadjikyriakou, G. N., & Christodoulou, C. S. (2019). Updated numbers of the vascular flora of Cyprus including the endemism rate. *Flora of Cyprus - a dynamic checklist* / <http://www.flora-of-cyprus.eu/>.

- Hashim, M. A., Mukhopadhyay, S., Sahu, J. N., & Sengupta, B. (2011). Remediation technologies for heavy metal contaminated groundwater. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2355–2388. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.009>.
- Heiskanen, J., Ruhanen, H., & Hagner, M. (2022). Effects of compost, biochar and ash mixed in till soil cover of mine tailings on plant growth and bioaccumulation of elements: A growing test in a greenhouse. *Heliyon*, 8(2), e08838. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08838>.
- Hottenstein, J. D., Neilson, J. W., Gil-Loaiza, J., Root, R. A., White, S. A., Chorover, J., & Maier, R. M. (2019). Soil microbiome dynamics during pyritic mine tailing phytostabilization: Understanding microbial bioindicators of soil acidification. *Frontiers in Microbiology*, 10(JUN), 1211. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01211/BIBTEX>.
- Houben, D., Evrard, L., & Sonnet, P. (2013). Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar. *Chemosphere*, 92(11), 1450–1457. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.03.055>. Sheoran
- Hudson-Edwards, K. A., & Edwards, S. J. (2005). Mineralogical controls on storage of As, Cu, Pb and Zn at the abandoned Mathiatis massive sulphide mine, Cyprus. *Mineralogical Magazine*, 69(5), 695–706. <https://doi.org/10.1180/0026461056950281>.
- Jadia, C. D., & Fulekar, M. H. (2008). Phytotoxicity and remediation of heavy metals by Alfalfa (*Medicago sativa*) in soil-vermicompost media. *Advances in Natural and Applied Sciences*, 2(3).
- Johnson, D. B. (2003). Chemical and Microbiological Characteristics of Mineral Spoils and Drainage Waters at Abandoned Coal and Metal Mines. *Water, Air and Soil Pollution: Focus 2003 3:1*, 3(1), 47–66. <https://doi.org/10.1023/A:1022107520836>.
- Johnson, D. B., & Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of The Total Environment*, 338(1–2), 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.002>.
- Jonasson, S. (1988). Evaluation of the Point Intercept Method for the Estimation of Plant Biomass. *Oikos*, 52(1), 101. <https://doi.org/10.2307/3565988>.
- Karhu, K., Auffret, M. D., Dungait, J. A. J., Hopkins, D. W., Prosser, J. I., Singh, B. K., Subke, J. A., Wookey, P. A., Agren, G. I., Sebastià, M. T., Gouriveau, F., Bergkvist, G., Meir, P., Nottingham, A. T., Salinas, N., & Hartley, I. P. (2014). Temperature sensitivity of soil respiration rates enhanced by microbial community response. *Nature* 2014 513:7516, 513(7516), 81–84. <https://doi.org/10.1038/nature13604>.
- Kopittke, P. M., Blamey, F. P. C., Asher, C. J., & Menzies, N. W. (2010). Trace metal phytotoxicity in solution culture: a review. *Journal of Experimental Botany*, 61(4), 945–954. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp385>.
- Kostarelos, K., Gavriel, I., Stylianou, M., Zissimos, A. M., Morisseau, E., & Dermatas, D. (2015). Legacy Soil Contamination at Abandoned Mine Sites: Making a Case for Guidance on Soil Protection. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 2015 94:3, 94(3), 269–274. <https://doi.org/10.1007/S00128-015-1461-4>.
- Li, X., You, F., Bond, P. L., & Huang, L. (2015). Establishing microbial diversity and functions in weathered and neutral Cu–Pb–Zn tailings with native soil addition. *Geoderma*, 247–248, 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.02.010>.

- Limmer, M., & Burken, J. (2016). Phytovolatilization of Organic Contaminants. *Environmental Science & Technology*, 50(13), 6632–6643. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.5B04113>.
- Liu, G. M., Yang, J. S., & Yao, R. J. (2006). Electrical Conductivity in Soil Extracts: Chemical Factors and Their Intensity. *Pedosphere*, 16(1), 100–107. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(06\)60031-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(06)60031-3).
- Lortzie, K., Stylianou, M., Dermatas, D., & Kostarelos, K. (2015). Long-term environmental impact at an abandoned gold–silver enrichment plant: A case study in Mitsero, Cyprus. *Engineering Geology*, 184, 119–125. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2014.11.011>.
- Marchand, C., Hogland, W., Kaczala, F., Jani, Y., Marchand, L., Augustsson, A., & Hijri, M. (2016). Effect of *Medicago sativa* L. and compost on organic and inorganic pollutant removal from a mixed contaminated soil and risk assessment using ecotoxicological tests. *International Journal of Phytoremediation*, 18(11), 1136–1147. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1186594>.
- McIntyre, T. (2003). Phytoremediation of Heavy Metals from Soils. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 78, 97–123. https://doi.org/10.1007/3-540-45991-X_4.
- Mendez, M. O., & Maier, R. M. (2008). Phytostabilization of Mine Tailings in Arid and Semiarid Environments—An Emerging Remediation Technology. *Environmental Health Perspectives*, 116(3), 278–283. <https://doi.org/10.1289/EHP.10608>.
- Mendez, M. O., Glenn, E. P., & Maier, R. M. (2007). Phytostabilization Potential of Quailbush for Mine Tailings. *Journal of Environmental Quality*, 36(1), 245–253. <https://doi.org/10.2134/JEQ2006.0197>.
- Mingorance, M. D., Franco, I., & Rossini-Oliva, S. (2017). Application of different soil conditioners to restore mine tailings with native (*Cistus ladanifer* L.) and non-native species (*Medicago sativa* L.). *Journal of Geochemical Exploration*, 174, 35–45. <https://doi.org/10.1016/J.GEXPLO.2016.02.010>.
- Monaci, F., Leidi, E. O., Mingorance, M. D., Valdés, B., Oliva, S. R., & Bargagli, R. (2011). Selective uptake of major and trace elements in *Erica andevalensis*, an endemic species to extreme habitats in the Iberian Pyrite Belt. *Journal of Environmental Sciences*, 23(3), 444–452. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60429-9](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60429-9).
- Naden, N., Herrington, R. J., Jowitt, S. M., McEvoy, F. M., Williamson, J. P., & Monhemius, A. J. (2006). New methodologies for volcanic-hosted copper sulphide mineralization on Cyprus: A GIS-prospectivity analysis-based approach Economic Minerals Programme. *British Geological Survey Internal Report*, CR/06/129. 242pp.
- Neina, D. (2019). The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>.
- Newman, L. A., & Reynolds, C. M. (2004). Phytodegradation of organic compounds. *Current Opinion in Biotechnology*, 15(3), 225–230. <https://doi.org/10.1016/J.COPBIO.2004.04.006>.
- Nonogaki, H., Bassel, G. W., & Bewley, J. D. (2010). Germination—Still a mystery. *Plant Science*, 179(6), 574–581. <https://doi.org/10.1016/J.PLANTSCI.2010.02.010>.
- Novo, L. A. B., & González, L. (2014). Germination and early growth of *Brassica juncea* in copper mine tailings amended with technosol and compost. *The Scientific World Journal*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/506392>.

- Olorunfemi, I., Fasinmirin, J., & Ojo, A. (2016). Modeling cation exchange capacity and soil water holding capacity from basic soil properties. *Eurasian Journal Of Soil Science (EJSS)*, 5(4), 266. <https://doi.org/10.18393/EJSS.2016.4.266-274>.
- Panagos, P., van Liedekerke, M., Yigini, Y., & Montanarella, L. (2013). Contaminated sites in Europe: Review of the current situation based on data collected through a European network. *Journal of Environmental and Public Health*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/158764>.
- Pantazis, T. M., & Govett, G. J. S. (1973). Interpretation of a detailed rock geochemical survey around mathiati mine, Cyprus. *Journal of Geochemical Exploration*, 2(1), 25–36. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(73\)90029-0](https://doi.org/10.1016/0375-6742(73)90029-0).
- Papadopoulos, A. E., Stylianou, M. A., Michalopoulos, C. P., Moustakas, K. G., Hapeshis, K. M., Vogiatzidaki, E. E. I., & Loizidou, M. D. (2009). Performance of a new household composter during in-home testing. *Waste Management*, 29(1), 204–213. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2008.03.016>.
- Pavel, V. L., Sobariu, D. L., Diaconu, M., Stătescu, F., & Gavrilescu, M. (2013). Effects of heavy metals on *Lepidium sativum* germination and growth. *Environmental Engineering and Management Journal*, 12(4), 727–733. <https://doi.org/10.30638/EEMJ.2013.089>.
- Peralta-Videa, J. R., Gardea-Torresdey, J. L., Gomez, E., Tiemann, K. J., Parsons, J. G., & Carrillo, G. (2002). Effect of mixed cadmium, copper, nickel and zinc at different pHs upon alfalfa growth and heavy metal uptake. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 119(3), 291–301. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00105-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00105-7).
- Phillips, C. L., & Nickerson, N. (2015). Soil Respiration. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09442-2>.
- Piedallu, C., Gégout, J. C., Bruand, A., & Seynave, I. (2011). Mapping soil water holding capacity over large areas to predict potential production of forest stands. *Geoderma*, 160(3–4), 355–366. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2010.10.004>.
- Pinamonti, F., Stringari, G., Gasperi, F., & Zorzi, G. (1997). The use of compost: its effects on heavy metal levels in soil and plants. *Resources, Conservation and Recycling*, 21(2), 129–143. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(97\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(97)00032-3).
- Poonam, Bhardwaj, R., Sharma, R., Handa, N., Kaur, H., Kaur, R., Sirhindi, G., & Thukral, A. K. (2014). Prospects of Field Crops for Phytoremediation of Contaminants. *Emerging Technologies and Management of Crop Stress Tolerance*, 2, 449–470. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800875-1.00019-3>.
- Pyatt, F. B. (2001). Copper and Lead Bioaccumulation by *Acacia retinoides* and *Eucalyptus torquata* in Sites Contaminated as a Consequence of Extensive Ancient Mining Activities in Cyprus. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 50(1), 60–64. <https://doi.org/10.1006/EESA.2001.2087>.
- Reynolds, C. A., Jackson, T. J., & Rawls, W. J. (2000). Estimating soil water-holding capacities by linking the Food and Agriculture Organization soil map of the world with global pedon databases and continuous pedotransfer functions. *Water Resources Research*, 36(12), 3653–3662. <https://doi.org/10.1029/2000WR900130>.

- Ros, M., Hernandez, M. T., & García, C. (2003). Soil microbial activity after restoration of a semiarid soil by organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(3), 463–469. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00298-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00298-5).
- Seal, J. S., Carroll, L. S., Meddings, H., Caramondani, A., Kalopedis, A., & Michael, M. (2008). The Preparation of a Strategy for the Restoration of Abandoned Mines (FINAL REPORT). *Ministry of Agriculture, Natural Resources and Environment, Geological Survey Department*.
- Schlöter, M., Nannipieri, P., Sørensen, S. J., & van Elsas, J. D. (2018). Microbial indicators for soil quality. *Biology and Fertility of Soils*, 54(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/S00374-017-1248-3/FIGURES/1>.
- Schmitz, E., Nordberg Karlsson, E., & Adlercreutz, P. (2021). Altering the water holding capacity of potato pulp via structural modifications of the pectic polysaccharides. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100153. <https://doi.org/10.1016/J.CARPTA.2021.100153>.
- Schroeder, K., Rufaut, C. G., Smith, C., Mains, D., & Craw, D. (2005). Rapid plant-cover establishment on gold mine tailings in southern New Zealand: Glasshouse screening trials. *International Journal of Phytoremediation*, 7(4), 307–322. <https://doi.org/10.1080/16226510500327178>.
- Sheoran, V., Sheoran, A., & Poonia, P. (2010). Soil Reclamation of Abandoned Mine Land by Revegetation: A Review. *International Journal of Soil, Sediment and Water*, 3(2). <https://scholarworks.umass.edu/intljssw/vol3/iss2/13>.
- Smith, J. L., & Doran, J. W. (1996). Measurement and Use of pH and Electrical Conductivity for Soil Quality Analysis. *Methods for Assessing Soil Quality*, 169–185. <https://doi.org/10.2136/SSASPECPUB49.C10>.
- Solís-Dominguez, F. A., White, S. A., Hutter, T. B., Amistadi, M. K., Root, R. A., Chorover, J., & Maier, R. M. (2012). Response of key soil parameters during compost-assisted phytostabilization in extremely acidic tailings: Effect of plant species. *Environmental Science and Technology*, 46(2), 1019–1027. <https://doi.org/10.1021/es202846n>.
- Srivastava, S., Anand, V., Singh, P., Roy, A., Pallavi, S., Bist, V., Kaur, J., Srivastava, S., Katiyar, R., & Srivastava, S. (2021). Microbial systems as a source of novel genes for enhanced phytoremediation of contaminated soils. *Microbe Mediated Remediation of Environmental Contaminants*, 177–198. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821199-1.00016-X>.
- Stylianou, M., Gavriel, I., Vogiatzakis, I. N., Zorpas, A., & Agapiou, A. (2020). Native plants for the remediation of abandoned sulphide mines in Cyprus: A preliminary assessment. *Journal of Environmental Management*, 274. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.110531>.
- Stylianou, M., Tsiftes, K., Gavriel, I., Kostarelos, K., Demetriou, C., & Papaioannou, A. (2014). Environmental impacts of abandoned sulphide mines - the example of Mathiatis Mine in Cyprus. *Proc. SYMBIOSIS Int. Con. Athens* 19, 21.
- Suzuki, S., Noble, A. D., Ruaysoongnern, S., & Chinabut, N. (2007). Improvement in water-holding capacity and structural stability of a sandy soil in northeast Thailand. *Arid Land Research and Management*, 21(1), 37–49. <https://doi.org/10.1080/15324980601087430>.
- Tangahu, B. V., Sheikh Abdullah, S. R., 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*. <https://doi.org/10.1155/2011/939161>.

- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy Metals Toxicity and the Environment. *EXS*, 101, 133. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6.
- Thisani, S. K., Kallon, D. V. von, & Byrne, P. (2020). Geochemical Classification of Global Mine Water Drainage. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 10244, 12(24), 10244. <https://doi.org/10.3390/SU122410244>.
- Tsadilas, C. D., & Shaheen, S. M. (2013). Utilization of Biosolids in Production of Bioenergy Crops I: Impact of Application Rate on Canola Biomass, Soil Properties, and Nutrient Availability. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44(1-4), 243-258. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.741771>.
- Tsiftes, K., Kostarelos, K., Stylianos, M., Dimitriou, C., Papaiannou, A., Gavriel, I., & Souropetsis, A. (2010). Αξιολόγηση της κατάστασης του Υφιστάμενου Περιβάλλοντος στην Περιοχή του Ανενεργού Μεταλλείου Μαθιάτη και Εκτίμηση Επιπτώσεων (in Greek: "Site conditions of the existing environment in the area of the inactive mine in Mathiati and estimation of the fate") May 2010.
- Tsintides, T., Christodoulou, C. S., Delipetrou, P., & Georghiou, K. (2007). *The Red Data Book of the Flora of Cyprus*. Cyprus Forestry Association. ISBN: 978-9963-9288-0-4.
- Valentín-Vargas, A., Root, R. A., Neilson, J. W., Chorover, J., & Maier, R. M. (2014). Environmental factors influencing the structural dynamics of soil microbial communities during assisted phytostabilization of acid-generating mine tailings: a mesocosm experiment. *The Science of the Total Environment*, 500-501, 314-324. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.107>.
- Wang, G., Yang, Y., Kong, Y., Ma, R., Yuan, J., & Li, G. (2022). Key factors affecting seed germination in phytotoxicity tests during sheep manure composting with carbon additives. *Journal of Hazardous Materials*, 421. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126809>.
- Xu, M., & Shang, H. (2016). Contribution of soil respiration to the global carbon equation. *Journal of Plant Physiology*, 203, 16-28. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.08.007>.
- Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Mohd Yusof, M. L., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Frontiers in Plant Science*, 11, 359. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359/BIBTEX>.
- Zhang, X., Yang, H., & Cui, Z. (2018). Evaluation and analysis of soil migration and distribution characteristics of heavy metals in iron tailings. *Journal of Cleaner Production*, 172, 475-480. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.277>.
- Zhang, Y., Liu, J., Zhou, Y., Gong, T., Wang, J., & Ge, Y. (2013). Enhanced phytoremediation of mixed heavy metal (mercury)-organic pollutants (trichloroethylene) with transgenic alfalfa co-expressing glutathione S-transferase and human P450 2E1. *Journal of Hazardous Materials*, 260, 1100-1107. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.06.065>.
- Zheng, P., Wang, D., Yu, X., Jia, G., Liu, Z., Wang, Y., & Zhang, Y. (2021). Effects of drought and rainfall events on soil autotrophic respiration and heterotrophic respiration. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 308, 107267. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107267>.
- Zubillaga, M. S., & Lavado, R. S. (2002). Heavy metal content in lettuce plants grown in biosolids compost. *Compost Science and Utilization*, 10(4), 363-367. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2002.10702099>.

Τμήμα Περιβάλλοντος (2022).
http://www.moa.gov.cy/moa/environment/environmentnew.nsf/index_gr/index_gr?opendocument. Accessed (April 2022).

Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης (2022).
http://www.moa.gov.cy/moa/gsd/gsd.nsf/dmlindex_gr/dmlindex_gr?OpenDocument. Accessed (April 2022).

Υπηρεσία Μεταλλείων (2022).
http://www.moa.gov.cy/moa/mines/minesSrv.nsf/dmlindex_gr/dmlindex_gr?OpenDocument. Accessed (March 2022).