



**Σχολή  
Μηχανικών  
Ορυκτών  
Πόρων**

**Πολυτεχνείο Κρήτης**

**Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων**

**Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον**

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**‘Φυτοαποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών’**

Τρικουνάκη Μαργαρίτα

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής Κωνσταντίνος Κομνίτσας (Επιβλέπων)

Καθηγήτρια Δέσποινα Βάμβουκα

Επίκ. Καθηγητής Εμμανουήλ Βαρουχάκης

Χανιά, 2023



## **Αφιερώσεις- Ευχαριστίες**

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κομνίτσα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, καθώς και για τη συνεργασία μας.

Θα ήθελα βεβαίως να ευχαριστήσω την καθηγήτρια κ. Βάμβουκα Δέσποινα και τον κ. επίκουρο καθηγητή Βαρουχάκη Εμμανουήλ, ως μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την ηθική και ψυχολογική υποστήριξη που μου πρόσφεραν.

## Περίληψη

Η ρύπανση του εδάφους αποτελεί μοναδική απειλή τόσο για το περιβάλλον όσο και για την ανθρώπινη υγεία λόγω της παρατεταμένης παρουσίας τοξικών ουσιών που εναποτίθενται στο έδαφος. Σε αντίθεση με άλλους τύπους ρύπανσης, τα απόβλητα παραμένουν στο έδαφος για μεγάλες περιόδους, απαιτώντας εξειδικευμένες τεχνικές επεξεργασίας. Οι διαφορετικές ιδιότητες και οι συνθέσεις αυτών των τοξικών υλικών αποτελούν μια άλλη πρόκληση, με ορισμένα να είναι εξαιρετικά επικίνδυνα, ενώ άλλα μπορούν να ωφελήσουν τις διαδικασίες του εδάφους. Αυτή η απόκλιση απαιτεί συγκεκριμένα πρωτόκολλα χειρισμού και ορισμένες ουσίες μπορεί να αποδειχθούν πιο δύσκολες στην επεξεργασία από άλλες. Παρά αυτή την πολυπλοκότητα, δεν υπάρχει μια ενιαία λύση για την ασφαλή διαχείριση των αποβλήτων του εδάφους, γεγονός που το καθιστά ένα πιεστικό ζήτημα στον σημερινό κόσμο. Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία μελετά το πλαίσιο της απορρύπανσης εδαφών στα βαρέα μέταλλα με την χρήση φυτών. Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας αποτελεί η ανάδειξη της συμβολής της φυτοαποκατάστασης στην απορρύπανση εδαφών από βαρέα μέταλλα, όπως προϋδεάζει και ο τίτλος της διπλωματικής.

## **Abstract**

Soil contamination poses a unique threat to both the environment and human health due to the prolonged presence of toxic substances present in the soil. Unlike other types of contamination, hazardous elements remain in the soil for long periods, requiring specialized treatment techniques. The different properties and compositions of these toxic substances pose another challenge, with some being extremely hazardous, while others can benefit soil processes. This variance requires specific handling protocols and some substances may prove more difficult to process than others. Despite this complexity, there is no single solution for the safe management of soil waste, making it a pressing issue in today's world. This thesis studies the context of soil decontamination of heavy metals using plants. The aim of this particular work is to highlight the contribution of phytoremediation for the decontamination of soils from heavy metals, as the title of the thesis suggests.

## Περιεχόμενα

Αφιερώσεις- Ευχαριστίες.....	3
Περίληψη .....	4
Abstract.....	5
Εισαγωγή .....	7
Κεφάλαιο 1: Ρύπανση του περιβάλλοντος.....	9
1.1 Ορισμός και κατηγορίες της ρύπανσης.....	9
1.2 Ρύπανση του εδάφους .....	11
1.3 Φυσικοχημικές ιδιότητες ρύπων .....	12
1.4 Κινητικότητα ρύπων στο έδαφος.....	15
1.5 Κατηγορίες ρύπων στο έδαφος.....	16
1.6 Πηγές βαρέων μετάλλων στο έδαφος .....	23
1.7 Κινητικότητα και κατανομή βαρέων μετάλλων .....	25
1.8 Πολυμορφία και βιοδιαθεσιμότητα των βαρέων μετάλλων .....	27
1.9 Νομοθετικό πλαίσιο.....	27
Κεφάλαιο 2: Αποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών.....	34
2.1 Τεχνολογίες αποκατάστασης ακόρεστων εδαφών.....	34
2.1.1 Φυσικοχημικές μέθοδοι .....	35
2.1.2 Βιολογικές μέθοδοι.....	39
2.1.3 Θερμικές μέθοδοι.....	41
2.2 Μέθοδοι αποκατάστασης κορεσμένων εδαφών και υπογείων υδάτων .....	44
Κεφάλαιο 3: Φυτοαπορρύπανση.....	49
3.1 Ορισμός της έννοιας της φυτοαπορρύπανσης .....	49
3.2 Βασικές αρχές της φωτοαπορρύπανσης .....	50
3.3 Μηχανισμοί φυτοαπορρύπανσης .....	53
Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή φυτοαπορρύπανσης.....	57
4.1 Κριτήρια επιλογής της φυτοαπορρύπανσης.....	57
4.2 Χρόνος εφαρμογής της φυτοαπορρύπανσης.....	62
4.3 Συγκέντρωση των ρύπων .....	63
4.4 Κόστος εφαρμογής και λειτουργίας.....	63
4.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα φυτοαπορρύπανσης.....	64
4.6 Εφαρμογή φυτοαπορρύπανσης στην Ελλάδα.....	65
Συμπεράσματα .....	72
Βιβλιογραφία .....	74

## Εισαγωγή

Η υποβάθμιση της ποιότητας του εδάφους είναι ένα πιεστικό περιβαλλοντικό ζήτημα που έχει επιδεινωθεί από την ανθρώπινη δραστηριότητα όπως η εκβιομηχάνιση, η αστικοποίηση και η εντατικοποίηση της γεωργίας. Το πρόβλημα έχει επηρεάσει 1,5 δισεκατομμύρια ανθρώπους και πάνω από 12,2 δισεκατομμύρια εκτάρια γης παγκοσμίως. Απαιτείται άμεση αποκατάσταση των 10 εκατομμυρίων μολυσμένων τοποθεσιών παγκοσμίως, ιδιαίτερα των 3,5 εκατομμυρίων υποβαθμισμένων περιοχών στην Ευρωπαϊκή Ένωση, με 400.000 να απαιτούν επείγουσα αποκατάσταση. Η αποκατάσταση του μολυσμένου εδάφους θα κοστίσει περίπου 119 δισεκατομμύρια ευρώ σε 20 χρόνια, σύμφωνα με μελέτη του Κοινού Κέντρου Ερευνών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Η σοβαρότητα της κατάστασης υπογραμμίζεται περαιτέρω από περισσότερες από 600.000 μολυσμένες περιοχές που καταγράφονται στις ΗΠΑ και περίπου 100 εκατομμύρια εκτάρια χερσαίας γης στην Κίνα και την Αυστραλία. Είναι σημαντικό να μειωθεί και να περιοριστεί η εισαγωγή ρυπογόνων ουσιών στο έδαφος, καθώς πολλές διαφορετικές ουσίες, ανόργανες ή οργανικές, καταλήγουν στο έδαφος μέσω καθίζησης στερεών ουσιών, βρόχινου νερού ή άμεσης εναπόθεσης αποβλήτων. Η ρύπανση του εδάφους αποτελεί μοναδική απειλή τόσο για το περιβάλλον όσο και για την ανθρώπινη υγεία λόγω της παρατεταμένης παρουσίας τοξικών ουσιών που εναποτίθενται στο έδαφος. Σε αντίθεση με άλλους τύπους ρύπανσης, τα απόβλητα παραμένουν στο έδαφος για μεγάλες περιόδους, απαιτώντας εξειδικευμένες τεχνικές επεξεργασίας. Οι διαφορετικές ιδιότητες και οι συνθέσεις αυτών των τοξικών υλικών αποτελούν μια άλλη πρόκληση, με ορισμένα να είναι εξαιρετικά επικίνδυνα, ενώ άλλα μπορούν να ωφελήσουν τις διαδικασίες του εδάφους. Αυτή η απόκλιση απαιτεί συγκεκριμένα πρωτόκολλα χειρισμού και ορισμένες ουσίες μπορεί να αποδειχθούν πιο δύσκολες στην επεξεργασία από άλλες. Παρά αυτή την πολυπλοκότητα, δεν υπάρχει μια ενιαία λύση για την ασφαλή διαχείριση των αποβλήτων του εδάφους, γεγονός που το καθιστά ένα πιεστικό ζήτημα στον σημερινό κόσμο. (Ιγνατιάδου, 2022)

Φιλικές προς το περιβάλλον μέθοδοι και τεχνολογίες έχουν εμφανιστεί τα τελευταία χρόνια για την καταπολέμηση της ρύπανσης του εδάφους. Η φυτοαπορύπανση, γνωστή και ως φυτοεξυγίανση, έχει αποδειχθεί πολλά υποσχόμενη για την αποτελεσματική απορρύπανση του εδάφους με τη χρήση ειδικά επιλεγμένων φυτικών ειδών για την απορρόφηση συγκεκριμένων ρύπων. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε έδαφος με υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, μια

αυξανόμενη ανησυχία με την αυξανόμενη εκβιομηχάνιση. Η επιτυχία της φυτοαποκατάστασης έγκειται στον εντοπισμό φυτών που μπορούν να αναπτυχθούν σε μολυσμένα εδάφη και να συσσωρεύσουν ρύπους στους ιστούς τους, επιτυγχάνοντας φυτοσυσσώρευση και φυτοσταθεροποίηση. Με το χαμηλό κόστος και την αισθητική της «πράσινη τεχνολογία», η φυτοεξυγίανση έχει διακριτά πλεονεκτήματα έναντι άλλων μεθόδων και αποτελεί κίνητρο για την εφαρμογή της σε μολυσμένα εδάφη.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία μελετά το πλαίσιο της απορρύπανσης εδαφών στα βαρέα μέταλλα με την χρήση φυτών. Η εργασία διακρίνεται με βάση τη γενική και την ειδική πλαισίωση του συγκεκριμένου θέματος· έτσι, η εργασία ξεκινά με το πρώτο κεφάλαιο, με τη γενική πλαισίωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Το δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιεί εστίαση τη ρύπανση του περιβάλλοντος, μελετώντας την αποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών. Από την άλλη, το τρίτο και το τέταρτο κεφάλαιο ερευνούν το πεδίο της φυτοαπορρύπανσης· το τρίτο κεφάλαιο γενικεύει την εικόνα της φυτοαπορρύπανσης, ενώ το τέταρτο κεφάλαιο θέτει την εφαρμογή της φυτοαπορρύπανσης υπό μελέτη. Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας αποτελεί η ανάδειξη της συμβολής της φυτοαπορρύπανσης στην απορρύπανση εδαφών από βαρέα μέταλλα, όπως προϋδεάζει και ο τίτλος της διπλωματικής.



## **Κεφάλαιο 1: Ρύπανση του περιβάλλοντος**

### **1.1 Ορισμός και κατηγορίες της ρύπανσης**

Η περιβαλλοντική ρύπανση έχει γίνει ένα πιεστικό ζήτημα τόσο για τους επιστήμονες όσο και για την κοινωνία γενικότερα. Οι βλαβερές του επιπτώσεις είναι εμφανείς με την εισαγωγή τοξινών και άλλων ρύπων στο έδαφος, τον αέρα και το νερό, οι οποίοι στη συνέχεια εισέρχονται στην ανθρώπινη τροφική αλυσίδα. Ως αποτέλεσμα, συμβαίνει περιβαλλοντική υποβάθμιση, με αρνητικές επιπτώσεις τόσο στην υγεία των έμβιων όντων όσο και στη συνολική ποιότητα ζωής.

Στην Οδηγία 2010/75/ΕΕ, η ρύπανση καλύπτει την εισαγωγή ρύπων στο έδαφος, το νερό ή τον αέρα λόγω ανθρώπινης δραστηριότητας. Αυτοί οι ρύποι μπορεί να είναι ουσίες, κραδασμοί, θερμότητα ή θόρυβος που έχουν τη δυνατότητα να βλάψουν το περιβάλλον, να επηρεάσουν την ανθρώπινη ύπαρξη και την αξιοποίηση του περιβάλλοντος ως ένα μέσω ψυχαγωγίας. Οι ρύποι μπορεί να είναι διαλυτοί ή αδιάλυτοι στο νερό και όταν εισάγονται στο περιβάλλον από ανθρώπινη δραστηριότητα, μπορούν να προκαλέσουν δυσμενείς επιπτώσεις σύμφωνα με το Νέστορα (2019).

Η ρύπανση κατηγοριοποιείται με βάση τον τύπο των ρύπων και τον προοριζόμενο δέκτη και μπορεί να ταξινομηθεί στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Ρύπανση της ατμόσφαιρας

Αέρια χημικά και στερεά και υγρά σωματίδια εισέρχονται στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα ο αέρας να είναι ο κύριος αποδέκτης αυτού του φαινομένου.

- Ρύπανση νερού

Η απόρριψη βιομηχανικών αποβλήτων, αστικών λυμάτων, γεωργικών δραστηριοτήτων και άλλων ρύπων μολύνουν τα υδατικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των ποταμών, των λιμνών, των υπόγειων υδροφορέων και της θάλασσας.

- Ρύπανση εδάφους

Το έδαφος είναι ο ατυχής αποδέκτης της περιβαλλοντικής ρύπανσης, η οποία προέρχεται από την ακατάλληλη διάθεση βιομηχανικών απορριμμάτων, την ακατάλληλη χρήση γεωργικών χημικών ουσιών και τα αστικά λύματα. Μεταξύ των

χημικών που υπάρχουν, οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες, οι υδρογονάνθρακες πετρελαίου, τα φυτοφάρμακα και τα βαρέα μέταλλα είναι τα πιο διαδεδομένα.

- Ενόχληση που προκαλείται από υπερβολικό θόρυβο

Η εκφόρτιση ενέργειας στην ατμόσφαιρα ως ηχητικά κύματα έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνισή της. Αν και δεν συμβάλλει σημαντικά στη ρύπανση, επηρεάζει τον αέρα λόγω της περιορισμένης εμβέλειάς του.

- Ρύπανση που προκαλείται από ραδιενέργεια

Το περιβάλλον κινδυνεύει από την απελευθέρωση ραδιενεργών ουσιών που μολύνουν τον αέρα, το νερό και το έδαφος. Αυτή η επικίνδυνη μορφή ρύπανσης είναι από τις πιο σοβαρές και εκτεταμένες. Οι επιπτώσεις του στους ζωντανούς οργανισμούς και τους ανθρώπους είναι σημαντικές λόγω της μακροζωίας του, πράγμα που σημαίνει ότι οι συνέπειες της έκθεσης μπορεί να διαρκέσουν για μεγάλο χρονικό διάστημα.

- Περιβαλλοντική υποβάθμιση που προκαλείται από αύξηση της θερμοκρασίας του νερού, συνήθως ως αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

Η θερμική ενέργεια είναι η βασική αιτία αυτού του φαινομένου, η οποία απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Αν και δεν διασπείρεται ευρέως, η ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας είναι σχετικά χαμηλή. Ο αέρας και το νερό είναι οι κύριοι αποδέκτες αυτής της ενέργειας, με το έδαφος να επηρεάζεται μόνο σε σπάνιες περιπτώσεις. (Νέστορας, 2019)

Η ρύπανση χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: την ανθρωπογενή και τη φυσική. Αυτές οι πηγές καθορίζονται από την προέλευση των ρύπων.

- Ρύπανση που προκαλείται από τη φύση

Αυτό περιλαμβάνει όλες τις φυσικές πηγές, όπως τους ωκεανούς, το έδαφος, τα δάση, τα ηφαίστεια, τις ερήμους και άλλα, που δεν επηρεάζονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα.

- Ρύπανση που προκαλείται από ανθρώπινη δραστηριότητα

Ο Νέστορας (2019) αναγνώρισε ότι η ρύπανση που προκαλείται από ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως οι βιομηχανικές διεργασίες, οι αστικές λειτουργίες, οι μεταφορές, συμπεριλαμβανομένης της κεντρικής θέρμανσης και οι γεωργικές

εργασίες, είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος.

## **1.2 Ρύπανση του εδάφους**

Το ανώτερο στρώμα γης, γνωστό ως έδαφος, είναι ένα πολύπλοκο μείγμα οργανικών, ανόργανων συστατικών, νερού και αέρα, απλωμένο σε βάθος 35-50 σημείων. Αυτό το ετερογενές μείγμα είναι τριφασικό και αποτελείται από τρεις διακριτές φάσεις. Η στερεά φάση περιέχει οργανικά και ανόργανα στοιχεία, ενώ η υγρή φάση αποτελείται από νερό και η αέρια φάση περιέχει αέρα παγιδευμένο μέσα στο έδαφος. Εάν επρόκειτο να ποσοτικοποιήσουμε τη σύνθεση των φάσεων του εδάφους, είναι μια ομοιόμορφη διάσπαση 50% τόσο για τη στερεή φάση όσο και για τις υγρές και αέριες φάσεις συνδυαστικά, σύμφωνα με την έρευνα του Protonotarios το 2005.

Το πορώδες του εδάφους επιτρέπει σε αιωρήματα και ρύπους να κυκλοφορούν και να αποβάλλονται στο υπέδαφος. Εν τω μεταξύ, η ικανότητα προσρόφησής του, του επιτρέπει να απορροφά και να προσροφά μόρια και ουσίες που υπάρχουν στα εναιωρήματα. Αυτή η ιδιότητα επισημάνθηκε από την Zotta το 2018.

Η σημασία του εδάφους δεν μπορεί να υπερεκτιμηθεί, καθώς εξυπηρετεί έναν ζωτικό σκοπό στην παραγωγή βασικών αγαθών όπως τα τρόφιμα, τα καύσιμα και οι ίνες, παράλληλα με τον ρόλο του στη διαφύλαξη και τη ρύθμιση των οικοσυστημάτων. Με πολλές λειτουργίες, το έδαφος παρέχει άφθονη υποστήριξη για τη βιοποικιλότητα και ελέγχει τη μεταφορά χημικών ουσιών και οργανισμών. Καθαρίζει επίσης το νερό, διευκολύνει τους κύκλους των θρεπτικών συστατικών και βοηθά στην απορρόφηση του άνθρακα, μετριάζοντας έτσι τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Ως ζωντανός οργανισμός, το έδαφος παίζει καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση της ζωής στον πλανήτη, μεσολαβώντας στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ζωντανών όντων, του αέρα και του νερού, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί την ακεραιότητα του περιβάλλοντος.

Όπως προέκυψε από την προηγούμενη συζήτηση, η ρύπανση του εδάφους έχει εκτεταμένες επιπτώσεις που εμπλέκουν άμεσα τον άνθρωπο μέσω της κατανάλωσης μολυσμένων προϊόντων και έμμεσα μέσω της περιβαλλοντικής ζημίας που προκύπτει από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ εδάφους και περιβάλλοντος, διαταράσσοντας έτσι την οικολογική ισορροπία.

### 1.3 Φυσικοχημικές ιδιότητες ρύπων

Τα επίπεδα τοξικότητας και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ρύπων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες, οι οποίες υπαγορεύουν επίσης την κίνηση και την παραμονή τους στο έδαφος και στο περιβάλλον. Αυτό σημαίνει ότι η έκταση του κινδύνου που θέτουν οι ρύποι για τον άνθρωπο, τους ζωντανούς οργανισμούς και το περιβάλλον καθορίζεται από τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες. Οι Gong et al. (2018) έχουν εντοπίσει ορισμένες βασικές φυσικοχημικές ιδιότητες που συμβάλλουν στο επίπεδο κινδύνου των ρύπων.

- Επιμονή, διάρκεια ή ανθεκτικότητα παρουσίας.

Η διάρκεια της παρουσίας ρύπων στο οικοσύστημα καθορίζεται από τον χρόνο ημιζωής του, που κυμαίνεται από μήνες έως χρόνια. Πολλοί παράγοντες όπως η θερμοκρασία, το φως, το pH και η υγρασία επηρεάζουν τη μακροζωία της χημικής ουσίας στο περιβάλλον. Όσο περισσότερο επιμένει, τόσο υψηλότερο είναι το επίπεδο κινδύνου λόγω της ικανότητάς του να συνδυάζεται με άλλους ρύπους, να διασχίζει πολλαπλούς τομείς και να διεισδύει σε ζωντανούς οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένων των ανθρώπων.

- Τοξικότητα

Η πιθανή βλάβη που προκαλείται από την έκθεση των ζωντανών όντων σε μια ουσία για σύντομη ή παρατεταμένη περίοδο είναι γνωστή ως τοξικότητα. Ο βαθμός τοξικότητας εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η ποσότητα, η διάρκεια και η μέθοδος έκθεσης, η φύση της ουσίας και η ηλικία και το φύλο του οργανισμού. Επιπλέον, η αλληλεπίδραση μεταξύ της ουσίας και άλλων ρύπων έχει αντίκτυπο. Η οξεία και η χρόνια τοξικότητα είναι οι δύο τύποι τοξικότητας, με το επίπεδο να καθορίζεται από τη μέθοδο και τη διάρκεια της έκθεσης (Gong, et al., 2018).

- Λιποφιλία

Όλες οι λιπόφιλες ουσίες μοιράζονται ένα κοινό χαρακτηριστικό: τη δυνατότητα συσσώρευσης στον λιπώδη ιστό. Κατά συνέπεια, αυτές οι ενώσεις έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν σοβαρές ασθένειες τόσο σε ανθρώπους όσο και σε ζώα συλλέγοντας σε αποθήκες λίπους και λιπώδη ιστό. Παραδείγματα τέτοιων λιπόφιλων χημικών ουσιών περιλαμβάνουν πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAH) και έμμονους οργανικούς ρύπους (PCB).

- Διαλυτότητα

Η μοίρα των ρύπων στο οικοσύστημα καθορίζεται από τη διαλυτότητά τους στο νερό, δεδομένου ότι το νερό είναι το κύριο μέσο με το οποίο ταξιδεύουν μέσα από το χερσαίο και το ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Οι ρύποι με υψηλή διαλυτότητα φέρουν χαμηλούς συντελεστές προσρόφησης, χαμηλούς συντελεστές βιοσυσσωρεύσης και είναι πιο επιρρεπείς στην αποδόμηση.

- Δυνατότητα απορρόφησης

Ο συντελεστής προσρόφησης μετρά την ικανότητα ενός αέριου ή υγρού ρύπου να προσκολλάται σε ένα στερεό υπόστρωμα. Μετρά το επίπεδο ολοκλήρωσης στερεάς φάσης που μπορεί να επιτευχθεί από μια χημική ένωση. Ο κίνδυνος που θέτει μια ουσία με υψηλό επίπεδο προσρόφησης είναι σημαντικός. απειλεί τα χερσαία, υγρά και αέρια περιβάλλοντα, καθώς και τη ζωή στον πλανήτη. Για παράδειγμα, τα φυτοφάρμακα παρουσιάζουν αξιοσημείωτη ικανότητα προσρόφησης, αγκυροβολώντας τα σωματίδια του εδάφους (Gong et al., 2018).

- Αστάθεια

Η δυνατότητα των υγρών χημικών ουσιών να εξατμίζονται γρήγορα είναι ένας κρίσιμος παράγοντας στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους. Οι πτητικές ουσίες έχουν την ικανότητα να μεταβαίνουν από υγρή σε αέρια μορφή μέσω της κινητικής ενέργειας, οδηγώντας στην παρατεταμένη παρουσία τους στο περιβάλλον. Αυτό το χαρακτηριστικό τα καθιστά επικίνδυνα και αποτελεί σημαντική απειλή για το περιβάλλον.

- Έκταση φθοράς

Η έκταση της αποσύνθεσης μιας χημικής ένωσης καθορίζεται από το πόσο χρόνο χρειάζεται για να διασπαστεί στις επιμέρους ενώσεις της. Τα μικρόβια, τα βακτήρια και οι μύκητες αποσυνθέτουν τις ενώσεις μέσω υδρόλυσης και φωτόλυσης. Συγκεκριμένα, ενώσεις που αποσυντίθενται αργά αποτελούν σημαντικό κίνδυνο.

- Συντελεστής κατανομής

Η κατανομή των ρύπων μεταξύ διαφορετικών μέσων - στερεών και υγρών, και αερίων και υγρών - μεταφέρεται μέσω του συντελεστή κατανομής. Αυτός ο συντελεστής περιλαμβάνει τον συντελεστή κατανομής του εδάφους, υπαγορεύοντας πώς οι ουσίες

διδεισδύουν στο έδαφος. Περιλαμβάνει επίσης τον συντελεστή κατανομής οκτανόλης-νερού, ο οποίος καθορίζει πώς διαλύονται οι οργανικές ενώσεις στο νερό. Επιπλέον, περιλαμβάνει τον συντελεστή κατανομής ατμού-υγρού που περιγράφει την κατανομή μιας χημικής ουσίας μεταξύ ατμών και υγρών καταστάσεων κατά τη διάρκεια της ισορροπίας (Gong et al., 2018).

- Συντελεστής Διάχυσης

Η συγκέντρωση αναφέρεται στην ποσότητα μιας χημικής ένωσης που έχει διαλυθεί σε ένα ρευστό, υγρό ή αέριο, και επομένως είναι ανάλογη με την ποσότητά της σε ένα δεδομένο διάλυμα.

- Πίεση που ασκείται από έναν ατμό

Οι ρύποι διαθέτουν ένα χαρακτηριστικό γνωστό ως τάση ατμών, το οποίο μετρά την ποσότητα πίεσης που μπορούν να ασκήσουν οι ατμοί ενός υγρού όταν το υγρό και οι ατμοί βρίσκονται σε ισορροπία.

- Η Αρχή του Henry

Η ισορροπία μεταξύ μιας πτητικής ουσίας και της συγκέντρωσής της στο διάλυμα αντανακλάται στη μερική της πίεση. Όταν η θερμοκρασία παραμένει σταθερή, υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της μερικής πίεσης ενός αερίου και του όγκου του που διεισδύει σε ένα υγρό. Στο νερό, οι πολύ πτητικές και ελάχιστα διαλυτές ενώσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα μεταφοράς στην αέρια φάση (Gong et al., 2018).

- Ο παράγοντας βιοσυγκέντρωσης (BCF Factor)

Η συσσώρευση χημικών ουσιών σε υδρόβιους οργανισμούς μετριέται με το χρόνο παραμονής τους και μπορεί να προκύψει από εισπνοή ή απορρόφηση από το δέρμα. Αυτή η μέτρηση είναι ζωτικής σημασίας για τον προσδιορισμό της ποσότητας των χημικών ουσιών που υπάρχουν σε αυτούς τους οργανισμούς.

- Παράγοντας βιοσυσσώρευσης (BAF)

Αυτή η φράση υποδηλώνει την ποσότητα οποιασδήποτε δεδομένης χημικής ένωσης που μπορεί να συσσωρευτεί στα υδρόβια πλάσματα μέσω της κατανάλωσης τροφής τους.

- Μεγέθυνση βιολογικών ουσιών

Η βιοσυσσώρευση συμβαίνει όταν μια χημική ουσία γίνεται πιο συμπυκνωμένη καθώς κινείται προς τα πάνω στην τροφική αλυσίδα, με αποτέλεσμα υψηλότερα επίπεδα στους θηρευτές σε σύγκριση με τη λεία τους.

- Εμμόνη

Η φυσική διάρκεια μιας χημικής ουσίας αντανakλάται στον χρόνο παραμονής της και αποτελεί βασικό παράγοντα που επηρεάζει τόσο τον δείκτη βιοσυσσώρευσης της όσο και την περιβαλλοντική κινητικότητα (Gong, et al., 2018).

- Κίνηση

Η ικανότητα μιας χημικής ένωσης να παραμείνει η θεμελιώδης δομή της καθώς κινείται στο περιβάλλον είναι γνωστή ως μεταβιβασιμότητά της.

- Απορρόφηση

Η ρόφηση υποδηλώνει τους μηχανισμούς τόσο της απορρόφησης όσο και της προσρόφησης. Συγκεκριμένα, η προσρόφηση περιλαμβάνει την προσκόλληση αερίων, υγρών ή διαλυμένων στερεών ατόμων σε μια επιφάνεια. Από την άλλη πλευρά, η απορρόφηση περιγράφει τη συγκεκριμένη διέλευση αερίου υλικού από ένα αέριο σε ένα υγρό κατά την επαφή με το υγρό (Cooper & Alley, 2009).

#### **1.4 Κινητικότητα ρύπων στο έδαφος**

Η μεταφορά ρύπων του εδάφους είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που χαρακτηρίζεται από την αλληλεπίδραση ρύπων και υλικών του εδάφους μέσω φυσικών, χημικών και βιολογικών αντιδράσεων. Το ίδιο το έδαφος, ιδιαίτερα οι κορεσμένες και ακόρεστες ζώνες του, παίζει καθοριστικό ρόλο σε αυτή την αλληλεπίδραση. Η ακόρεστη ζώνη έχει περιορισμένη ικανότητα απορρόφησης ρύπων, γεγονός που προσφέρει κάποιο βαθμό προστασίας στην κορεσμένη ζώνη. Ωστόσο, η πιθανότητα εξουδετέρωσης ρύπων στην κορεσμένη ζώνη είναι αρκετά περιορισμένη. Οι ρύποι βρίσκονται σε συνεχή κίνηση μετά την απόθεση, με κάποιους να παραμένουν στην επιφάνεια του εδάφους ενώ άλλοι βρίσκουν το δρόμο τους προς τους υδροφόρους ορίζοντες μέσω διαφόρων μηχανισμών.

Η μετακίνηση των ρύπων από τα υπόγεια ύδατα πραγματοποιείται μέσω υδραυλικής κλίσης, τόσο μέσω περιοχών υψηλής όσο και χαμηλής ενέργειας. Λόγω της συνεχούς κίνησης του μορίου του νερού, η συγκέντρωση των ρύπων σε ένα ορισμένο σημείο

διαφοροποιείται με το πέρασμα του χρόνου. Ωστόσο, η συγκέντρωση των ρύπων σε συγκεκριμένο όγκο νερού παραμένει σταθερή σύμφωνα με τις αρχές διατήρησης της μάζας. Χωρίς ροή νερού δεν υπάρχει μετατόπιση ρύπων από τη μια τοποθεσία στην άλλη.

Η διάχυση, η διαδικασία μιας ουσίας που εξαπλώνεται ομοιόμορφα σε ένα χώρο ή σε άλλη ουσία, είναι ένα φαινόμενο που εκδηλώνεται στις φυσικές επιστήμες. Η κίνηση των ρύπων ακολουθεί μια τροχιά από ζώνες υψηλής ενέργειας σε ζώνες χαμηλής ενέργειας όπου οι ρύποι διασκορπίζονται από τοποθεσίες υψηλής συγκέντρωσης στις αντίστοιχες χαμηλής συγκέντρωσης μέσω των υπόγειων υδάτων. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως διάχυση, ανεπηρέαστη από τη ροή του νερού, και λαμβάνει χώρα παρόλο που η ροή είναι ελάχιστη. Στην ουσία, οι ρύποι ταξιδεύουν από τη μια τοποθεσία στην άλλη λόγω των διαφορετικών επιπέδων συγκέντρωσης.

Η διάχυση μπορεί να αναφέρεται ως διασπορά. Η κίνηση των ρύπων στα υπόγεια ύδατα οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη μοριακή διάχυση και την ανάμειξη των ρύπων. Στην ουσία, το νερό μεταφέρει ρύπους και τους διασκορπίζει τυχαία τόσο κατά μήκος όσο και εγκάρσια σε όλο το υπόγειο υδατικό σύστημα (Καββαδάς, 2007). Τελικά, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ρύπων και του εδάφους υπαγορεύονται από τις φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητες του εδάφους, καθώς και από τα μοναδικά γνωρίσματα των εμπλεκόμενων ρύπων.

### **1.5 Κατηγορίες ρύπων στο έδαφος**

Οι ρύποι μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες με βάση τη δομή και τη σύστασή τους: οργανικούς και ανόργανους. Οι οργανικοί ρύποι (OPs) είναι ενώσεις που σχηματίζονται από την ένωση ατόμων άνθρακα με πρωτεΐνες, οξέα και υδατάνθρακες. Αυτοί οι ρύποι μπορεί να προέρχονται από φυσικές ή ανθρώπινες πηγές ρύπανσης. Αν και ένα σημαντικό ποσοστό των OP είναι βιοαποδομήσιμα, εξακολουθούν να είναι επικίνδυνα λόγω της ικανότητάς τους να επιμένουν και να αντιστέκονται στην υποβάθμιση στο περιβάλλον. Επιπλέον, μπορούν να συσσωρευτούν στους λιπώδεις ιστούς των ζωντανών οργανισμών και μέσω της τροφικής αλυσίδας να επηρεάσουν αρνητικά την υγεία του ανθρώπου. Η μακροχρόνια επαφή του ανθρώπου σε οργανικούς ρύπους έχει βρεθεί ότι αποτελεί σημαντική τοξικολογική απειλή και μπορεί να προκαλέσει μια σειρά από προβλήματα υγείας και ασθένειες.



Οι οργανοχλωρικές ενώσεις είναι αποτέλεσμα δεσμών άνθρακα, υδρογόνου και χλωρίου, σχηματίζοντας τοξικές παραλλαγές όπως PCB, PCDF και PCDD. Αυτές οι ενώσεις χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στις βιομηχανίες για δεκαετίες, δεδομένων των εξαιρετικών φυσικών και χημικών ιδιοτήτων τους όπως η θερμική σταθερότητα, η αντοχή στην οξείδωση, η υδρόλυση και η θερμότητα. Παρά την απαγόρευσή τους, οι επιζήμιες επιπτώσεις τους εξακολουθούν να παραμένουν, και εκδηλώνονται στην τρέχουσα εποχή. Η μακροχρόνια έκθεση σε αυτές τις ενώσεις έχει οδηγήσει σε προβλήματα υγείας και ασθένειες, καθώς παραμένουν παρούσες στο έδαφος και τα ιζήματα και μπορούν εύκολα να διασκορπιστούν στο περιβάλλον.

Οι πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH) δημιουργούνται όταν οργανικές ουσίες που περιέχουν ενώσεις άνθρακα, όπως το ξύλο, η βενζίνη και το λάδι, καίγονται ατελώς. Υπάρχουν περισσότερες από εκατό παραλλαγές PAH και παράγονται όταν ρύποι, που προέρχονται είτε από φυσικές είτε από ανθρώπινες δραστηριότητες, εισάγονται στο περιβάλλον. Μερικοί από τους παράγοντες που συμβάλλουν στον σχηματισμό τους είναι η καύση ορυκτών καυσίμων από σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, η διάθεση απορριμμάτων, οι ναυτιλιακές εργασίες, η ηφαιστειακή δραστηριότητα και οι δασικές πυρκαγιές. Παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιούνται ευρέως στην παραγωγή πλαστικών, λιπαντικών, χρωμάτων και φυτοφαρμάκων, αποτελούν σημαντική περιβαλλοντική πρόκληση λόγω της υψηλής τοξικότητάς τους στους ζωντανούς οργανισμούς και της τάσης τους να παραμένουν και να εξαπλώνονται σε όλο το περιβάλλον. Η αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος είναι κρίσιμη. (Kim et al., 2013).

Οι πολυβρωμιωμένοι διφαινυλαιθέρες ταξινομούνται ως οργανοβρωμικές ενώσεις, οι οποίες διαθέτουν ένα άτομο οξυγόνου μεταξύ αρωματικών δακτυλίων. Παρόμοια στη δομή με τους πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAH), μοιράζονται τις ίδιες επικίνδυνες επιπτώσεις στο περιβάλλον και την ανθρώπινη ζωή λόγω της παρατεταμένης παραμονής τους στο περιβάλλον, απαιτώντας άμεση προσοχή και παρέμβαση για τη διαφύλαξη και των δύο. (Law, et al., 2014).

Τα οργανοχλωρικά φυτοφάρμακα, γνωστά και ως επίμονοι οργανικοί ρύποι (POPs), χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου για τον έλεγχο ασθενειών που μεταδίδονται από έντομα, όπως η ελονοσία. Η σταθερότητα και η δυνατότητα μεταφοράς των χημικών ενώσεων σε μεγάλες αποστάσεις είχαν ως αποτέλεσμα την απαγόρευσή τους μέσω της Σύμβασης της Στοκχόλμης από το 2001.

Ωστόσο, οι περιβαλλοντικές συνέπειες της ευρείας χρήσης τους είναι ακόμη εμφανείς και η επίμονη φύση των POP έχει επιβλαβείς επιπτώσεις στους ζωντανούς οργανισμούς. Οι POPs είναι γνωστό ότι προκαλούν βλάβες στο ανοσοποιητικό σύστημα, βλάβη στο DNA και ανάπτυξη καρκίνου στους ανθρώπους. (Nadal, et al., 2015)

Οι ανόργανοι ρύποι (IPs) είναι χημικές ενώσεις, κυρίως διαλυμένα ανιόντα και κατιόντα, που προέρχονται από ανόργανα οξέα, μέταλλα, ιχνοστοιχεία, άλατα, σύμπλοκα μετάλλων, θειικά άλατα και ενώσεις μεταλλικών στοιχείων. Αυτές οι ενώσεις, που υπάρχουν τόσο σε τεχνητές όσο και σε φυσικές πηγές ρύπανσης, κατηγοριοποιούνται ως μη βιοαποδομήσιμες ουσίες. Τα φυσικά και χημικά τους χαρακτηριστικά τα αναγκάζουν να συσσωρεύονται στο έδαφος, τα υδάτινα σώματα και τους ζωντανούς οργανισμούς, καθιστώντας τα τόσο σημαντικό περιβαλλοντικό ζήτημα όσο και σοβαρό κίνδυνο για τη δημόσια υγεία. Όταν οι συγκεντρώσεις τους ξεπερνούν τα επιτρεπόμενα όρια, μπορούν να προκαλέσουν πολυάριθμες ασθένειες και θανάτους για όλους τους ζωντανούς οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένων των ανθρώπων. Τα βαρέα μέταλλα είναι ο πιο κοινός τύπος ανόργανων ρύπων που ανιχνεύονται στα εδάφη. (Νέστορας, 2019)

Ο όρος "βαρέα μέταλλα" αναφέρεται σε μεταλλοειδή και μέταλλα με πυκνότητα μεγαλύτερη από  $5 \text{ g/cm}^3$  - βαρύτερα από τον σίδηρο. Αυτά τα στοιχεία είναι φυσικά παρόντα στον φλοιό της γης, παίζοντας κρίσιμο ρόλο στη διατήρηση των φυσικοχημικών διεργασιών στο έδαφος που υποστηρίζουν τη ζωή. Ωστόσο, η τοξικότητα και η συγκέντρωσή τους αποτελούν πρόκληση. Οι συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων πάνω από τα συνιστώμεθα επίπεδα είναι επιβλαβείς για τους ζωντανούς οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένων των ανθρώπων. Ο χαλκός, ο μόλυβδος, το χρώμιο, το κάδμιο, ο ψευδάργυρος, το νικέλιο, ο υδράργυρος, το αρσενικό, ο σίδηρος και το μαγγάνιο είναι τα πιο σημαντικά βαρέα μέταλλα στην εκτίμηση της ρύπανσης του εδάφους. (Alloway, 2013)

Με πυκνότητα  $11.400 \text{ kg/m}^3$  στους 293 K και μπλε, γκρι ή ασημί απόχρωση, ο μόλυβδος είναι βραβευμένος για την αντοχή στη διάβρωση και την ελαστικότητά του. Από αγωγούς μέχρι φυτοφάρμακα και πρόσθετα βενζίνης, οι εφαρμογές του είναι πολλαπλές, επεκτείνονται σε μεταλλουργικές διεργασίες, αποτέφρωση στερεών αποβλήτων και καύση καυσίμων. Όσον αφορά τις ιδιότητες του εδάφους, ο μόλυβδος

είναι ακίνητος υπό κανονικές συνθήκες και σε χαμηλές συγκεντρώσεις, με την τύχη του να συνδέεται με τις τιμές του pH και τις συγκεντρώσεις οργανικής ύλης. Τα ουδέτερα ή ελαφρώς αλκαλικά εδάφη διαθέτουν υψηλότερη ικανότητα προσρόφησης μολύβδου, ενώ τα όξινα ή έντονα αλκαλικά εδάφη επιτρέπουν μεγαλύτερη κινητικότητα. Τεχνικές όπως στερεοποίηση, υαλοποίηση ή ηλεκτροκινητική μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αφαίρεση ή την ακινητοποίηση του μολύβδου από το έδαφος.

Ο μόλυβδος είναι ένα τοξικό στοιχείο που αποτελεί σοβαρή απειλή τόσο για τους ζωικούς όσο και για τους φυτικούς οργανισμούς. Η εισπνοή ή η απορρόφησή του μπορεί να προκαλέσει επιβλαβείς επιπτώσεις στην υγεία τους. Για τον άνθρωπο η έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις μολύβδου μπορεί να προκαλέσει σοβαρή δυσλειτουργία και βλάβη στα νεφρά, τον εγκέφαλο και το νευρικό σύστημα, όπως αναφέρθηκαν από τους Nas και Ali το 2018.

Με μια χαρακτηριστική κοκκινοκαφέ απόχρωση και μέση περιεκτικότητα 68 σελ/λεπτό, ο χαλκός είναι εδώ και πολύ καιρό ένα χρήσιμο μέταλλο για κατασκευή εργαλείων, όπλα, νομίσματα και άλλους κατασκευαστικούς σκοπούς. Σήμερα, ο χαλκός και τα κράματά του, όπως ο μπρούντζος και ο ορείχαλκος, εφαρμόζονται ευρέως σε βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένης της κατασκευής ηλεκτρικών εξαρτημάτων και της παραγωγής λιπασμάτων. Στο έδαφος, ο χαλκός εκδηλώνεται με διάφορες μορφές, όπως ιόντα, σύμπλοκα και οργανικές δεσμεύσεις, μεταξύ άλλων. Αν και η κινητικότητα μπορεί να ποικίλλει, ο χαλκός τείνει να παραμένει σταθερός και ακίνητος υπό κανονικές συνθήκες χαμηλής συγκέντρωσης. Το pH του εδάφους και η ορυκτολογική σύσταση, καθώς και η περιεκτικότητα σε οργανική ουσία, είναι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη βιοδιαθεσιμότητά του. (Linder, 2013) Η συγκέντρωση χαλκού στο έδαφος παρουσιάζει διπλό αντίκτυπο: εμπόδιο στην ανάπτυξη των καλλιεργειών και απειλή για την ανθρώπινη ευημερία. Ο χαλκός είναι ένα φυσικό στοιχείο και σε μέτριες ποσότητες ενισχύει την παραγωγή αιμοσφαιρίνης στο αίμα. Ωστόσο, οι αυξημένες συγκεντρώσεις χαλκού μπορεί να οδηγήσουν σε επικίνδυνα προβλήματα υγείας όπως αναιμία, ηπατικές επιπλοκές, γαστρεντερικά προβλήματα και νεφρική βλάβη (Linder, 2013).

Το κάδμιο, με την ασημί-λευκή μεταλλική του μορφή και την απαλή, εύπλαστη υφή του, περιέχει κατά μέσο όρο 0,16 ppm. Χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία για

την ενίσχυση προστατευτικών επιστρώσεων και πλαστικών έναντι της θερμότητας, την κατασκευή μπαταριών και τη δημιουργία μεταλλικών κραμάτων και επιμετάλλωσης. Παρά τη χρησιμότητά του, το κάδμιο έχει ανιχνευθεί ως πρόσμειξη σε πολλά προϊόντα, συμπεριλαμβανομένων των απορρυπαντικών, των λιπασμάτων και του πετρελαίου. Η επικράτηση του μετάλλου στο έδαφος συνδέεται με τη χρήση του στη βιομηχανία, συμπεριλαμβανομένων των χυτηρίων, της καύσης πλαστικών και της απόρριψης μπαταριών, καθώς και με φυσικές πηγές όπως οι ηφαιστειακές εκρήξεις. Όπως συμβαίνει με τα περισσότερα μέταλλα, η κινητικότητα και η βιοδιαθεσιμότητα του εξαρτώνται από το pH του εδάφους και τα ορυκτολογικά χαρακτηριστικά. Η σταθεροποίηση/στερεοποίηση με τέφρα ή τσιμέντο ή η επικάλυψή του με άργιλο είναι συνήθεις μέθοδοι αποκατάστασης του μολυσμένου με κάδμιο εδάφους. Ωστόσο, η ρύπανση μπορεί να διεισδύσει στην τροφική αλυσίδα και να βλάψει τους ζωντανούς οργανισμούς και τους ανθρώπους. Όταν το κάδμιο συσσωρεύεται στο ανθρώπινο σώμα, μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές παθήσεις των πνευμόνων, των νεφρών και των οστών και, σε σπάνιες περιπτώσεις, μπορεί να οδηγήσει σε θάνατο. Η έκθεση στη σκόνη καδμίου σε επίπεδα που υπερβαίνουν τα  $9 \text{ mg/m}^3$  είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη, ενώ συγκεντρώσεις που ξεπερνούν τα  $2.500 \text{ mg/m}^3$  μπορεί να είναι θανατηφόρα, σύμφωνα με τους Genchi, et al. (2020).

Το χρώμιο είναι ένα σχετικά σπάνιο μέταλλο που βρίσκεται μόνο σε ορυκτά, συνηθέστερα στον χρωμίτη  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ . Μπορεί να υπάρχει σε δύο καταστάσεις οξείδωσης: Cr(VI) και Cr(III), ανάλογα με το pH και τις συνθήκες οξειδοαναγωγής. Το πρώτο είναι πιο ευκίνητο και τοξικό και βρίσκεται συνήθως σε ρηχούς υδροφόρους ορίζοντες με αερόβιες συνθήκες. Παρουσία οργανικής ύλης, ιόντων  $\text{Fe}^{2+}$  και έλλειψης οξυγόνου, το Cr(VI) ανάγεται σε Cr(III) και κινείται βαθύτερα στο έδαφος. Ωστόσο, τα υλικά και τα οξείδια αργίλου μπορούν να περιορίσουν αυτή την κίνηση, ειδικά σε χαμηλά επίπεδα pH. Το χρώμιο συνήθως απελευθερώνεται στο περιβάλλον ως υποπροϊόν διεργασιών όπως οι ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις, η κατασκευή χάλυβα και η παραγωγή υφασμάτων και δέρματος. Το χρώμιο κινείται μέσω της τροφικής αλυσίδας και εισέρχεται στο ανθρώπινο σώμα, η επίδρασή του εξαρτάται από τη συγκέντρωσή του. Αν και είναι απαραίτητο για την καλή υγεία, η απουσία του μπορεί να οδηγήσει σε καρδιακές παθήσεις. Ωστόσο, τα υψηλότερα επίπεδα έκθεσης, ιδιαίτερα σε συμπυκνωμένες ποσότητες, ασκούν τοξικότητα και συμβάλλουν στον καρκίνο και άλλες ασθένειες, όπως παρατηρούν οι DesMarias και Costa (2019).

Το νικέλιο είναι ένα μέταλλο που υπάρχει σε σχετικά μικρές ποσότητες στο περιβάλλον. Σε όξινα εδάφη παίρνει τη μορφή  $\text{Ni(II)}$ , ενώ σε ουδέτερα ή ελαφρώς αλκαλικά εδάφη υπάρχει ως  $\text{Ni(OH)}_2$ . Αξιοποιείται κυρίως σε προϊόντα χάλυβα και άλλα μεταλλικά προϊόντα, καθώς και στη διαδικασία επίστρωσης σε βιομηχανίες. Το νικέλιο εισέρχεται στο έδαφος και στο περιβάλλον μέσω των βιομηχανικών αποβλήτων ή μέσω της εξόρυξης και της καύσης ορυκτών καυσίμων και αποβλήτων. Η πλειονότητα των ενώσεων νικελίου απορροφάται στο έδαφος, όπου ακινητοποιείται. Ωστόσο, η κινητικότητα των ενώσεων νικελίου αυξάνεται σε όξινα εδάφη, αυξάνοντας έτσι τον κίνδυνο ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα. Τα υψηλά επίπεδα νικελίου στο έδαφος μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την ανάπτυξη μικροοργανισμών, αλλά δεν συσσωρεύεται σε φυτά και ζώα.

Λόγω αυτού του γεγονότος, το συγκεκριμένο μέταλλο παραμένει απομονωμένο από την τροφική αλυσίδα, διασφαλίζοντας την ευημερία των ζωντανών οργανισμών. Αυτή η αρχή ισχύει και για άλλα βαρέα μέταλλα, όπου οι χαμηλές συγκεντρώσεις δεν ενέχουν σημαντικούς κινδύνους για την υγεία και μπορεί ακόμη και να είναι ευεργετικές για τον άνθρωπο. Ωστόσο, οι υψηλές συγκεντρώσεις αυτών των μετάλλων μπορεί να είναι επικίνδυνες και να οδηγήσουν σε διάφορες ασθένειες, συμπεριλαμβανομένου του καρκίνου.

Ο ψευδάργυρος, με μέση περιεκτικότητα σε γήινο φλοιό περίπου 76 ppm, διαθέτει μια χαρακτηριστική μπλε-λευκή απόχρωση. Παρά την ευθραυστότητά του σε κανονικές θερμοκρασίες, είναι εξαιρετικά εύπλαστο σε υψηλές θερμοκρασίες, καθιστώντας το μια δημοφιλή επιλογή για την παραγωγή κράματος και τον γαλβανισμό μετάλλων όπως ο σίδηρος. Το οξείδιο του ψευδαργύρου ( $\text{ZnO}$ ) χρησιμοποιείται στη δημιουργία διαφόρων προϊόντων όπως χρώματα, πλαστικά και βαφές - ενώ ο θεικός ψευδάργυρος ( $\text{ZnS}$ ) εμφανίζεται συνήθως στην παραγωγή λαμπτήρων φθορισμού (Roohani, et al., 2013). Τα χαρακτηριστικά του εδάφους, συμπεριλαμβανομένου της υγρασίας, του pH και της οργανικής ύλης, επηρεάζουν τη συγκέντρωση του μετάλλου. Τα υψηλότερα επίπεδα pH αυξάνουν τη βιοδιαθεσιμότητα του ψευδαργύρου και η αυξημένη περιεκτικότητα σε υγρασία αυξάνει τον ρυθμό συμπλοκοποίησης του με τα οργανικά στοιχεία του εδάφους. Για την απομάκρυνση και την αποκατάσταση του εδάφους από τον ψευδάργυρο, οι ειδικοί χρησιμοποιούν τεχνικές όπως το αλκαλικό ή όξινο πλύσιμο και σταθεροποίηση με φυσικούς ζεόλιθους. Τέλος, η επικινδυνότητα του μετάλλου εξαρτάται άμεσα από τη συγκέντρωσή του. Αν και ο ψευδάργυρος είναι ένα ευεργετικό

στοιχείο τόσο για τον άνθρωπο όσο και για τα ζώα σε μικρές ποσότητες, οι υπερβολικές συγκεντρώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε σοβαρή τοξικότητα και επιπλοκές στην υγεία. Επιπλέον, τα υψηλά επίπεδα ψευδαργύρου μπορούν να εμποδίσουν τη λειτουργία των μικροοργανισμών του εδάφους και να εμποδίσουν την αποικοδόμηση της οργανικής ύλης. Σύμφωνα με έρευνα των Roohani et al. το 2013, η μέση ημερήσια πρόσληψη ψευδαργύρου για τον άνθρωπο θα πρέπει να είναι περίπου 10-15 mg για να αποφευχθούν αρνητικές επιπτώσεις.

Ο υδράργυρος, ένα σπάνιο ασημί-λευκό υγρό μέταλλο, χρησιμοποιείται συνήθως σε θερμόμετρα και λαμπτήρες φθορισμού, αλλά σπάνια βρίσκεται στη φύση. Ενώ η εξόρυξη και η καύση ορυκτών καυσίμων και αποβλήτων μπορεί να το απελευθερώσει στο περιβάλλον, διαχέεται κυρίως μέσω σπασμένων συσκευών που το περιέχουν. Μόλις απελευθερωθεί, μετατρέπεται σε ενώσεις μεθυλίου ή αιθυλίου, με τις αλκαλιωμένες μορφές να είναι οι πιο επικίνδυνες λόγω της αυξημένης υδατοδιαλυτότητας και πτητικότητάς τους. Η τιμή του pH του εδάφους επηρεάζει άμεσα την απορρόφηση του υδραργύρου και η απομάκρυνσή του επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση με θειούχα ενώ παράλληλα αξιοποιείται ο δεσμός του με τα ιζήματα και τα χουμικά στοιχεία. Ωστόσο, επειδή είναι εξαιρετικά τοξικό για τον άνθρωπο, έχει συνδεθεί με πολλά ζητήματα υγείας, συμπεριλαμβανομένων των χρωμοσωμικών αλλαγών και της βλάβης του DNA. (Rice, et al., 2014).

Με μέση συγκέντρωση 2 ppm στον φλοιό της γης, το αρσενικό εμφανίζεται με γκρι χρώμα και μπορεί να υπερηφανεύεται για υψηλή κινητικότητα σε συνδυασμό με εξαιρετική τοξικότητα. Το μέταλλο βρίσκει ευρεία χρήση στη βιομηχανική κατασκευή, συμπεριλαμβανομένων των κραμάτων μολύβδου, των μπαταριών και των πυρομαχικών, καθώς και στην παραγωγή εντομοκτόνων και φυτοφαρμάκων. Για να ελαχιστοποιήσουν την τοξική του επίδραση, πολλοί χρησιμοποιούν τακτικές οξείδωσης για να μειώσουν την ισχύ του από τρισθενές σε πενταθενές. Διάφορες μέθοδοι αποκατάστασης χρησιμεύουν για την αφαίρεση και την ακινητοποίηση του αρσενικού, όπως οι τεχνικές υαλοποίησης, το πλύσιμο με διαλύτες και η επικάλυψη από πηλό. Παρά τις παλαιότερες επιτυχημένες εφαρμογές στη θεραπεία του πυρετού και της ψωρίασης, οι αυξημένες συγκεντρώσεις αρσενικού έχουν συνδεθεί με επιβλαβείς ασθένειες, συμπεριλαμβανομένου του καρκίνου του δέρματος, των πνευμόνων και των αγγειακών παθήσεων. Στην πραγματικότητα, υπερβολικές

ποσότητες πέρα από τα επιτρεπτά επίπεδα μπορεί να αποδειχθούν ακόμη και θανατηφόρες.

Ο σίδηρος χρησιμοποιείται ευρέως από την αρχαιότητα λόγω της υψηλής μέσης περιεκτικότητάς του σε περίπου 62.000 ppm και της ευκολίας επεξεργασίας του. Χρησιμοποιείται κυρίως σε διαδικασίες παραγωγής χάλυβα, όπου συνήθως είναι κράμα με άνθρακα, νικέλιο και χρώμιο. Αν και ο σίδηρος δεν είναι ιδιαίτερα τοξικός, η έλλειψή του μπορεί να προκαλέσει αναιμία, καθιστώντας τον απαραίτητο στοιχείο για τον άνθρωπο. Ωστόσο, οι υπερβολικές συγκεντρώσεις σιδήρου που προκύπτουν από την εκτεταμένη χρήση του στη βιομηχανία και τη γεωργία, ειδικά στα λιπάσματα, μπορούν να μολύνουν σε μεγάλο βαθμό τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες, καθιστώντας τους ακατάλληλους για πόση.

Το μαγγάνιο, ένα λευκό-γκρι μέταλλο, βρίσκεται σε αφθονία στο φλοιό της γης σε μέση συγκέντρωση 1060 ppm. Η χημική του ευελιξία του επιτρέπει να υπάρχει σε πολλαπλές καταστάσεις οξείδωσης, είτε με όξινες είτε με βασικές ιδιότητες. Οι βιομηχανίες το χρησιμοποιούν για να ενισχύσουν την ανθεκτικότητα των κραμάτων και στη χημική ποσοτική ανάλυση, στα φαρμακευτικά προϊόντα και στα λιπάσματα (όπως A ή Mn-EDTA). Αν και δεν είναι ιδιαίτερα τοξικό, η αλληλεπίδραση του μαγγανίου με στοιχεία και χαρακτηριστικά του εδάφους καθορίζει την κινητικότητα και την τοξικότητά του. Είναι απαραίτητο στοιχείο για τον άνθρωπο, προάγοντας τη δύναμη των οστών, την ενεργοποίηση των ενζύμων και την απορρόφηση της βιταμίνης D. Ωστόσο, η υπερβολική έκθεση σε ενώσεις μαγγανίου και σκόνη έχει συνδεθεί με τη νόσο του Πάρκινσον και την καρκινογένεση. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις μαγγανίου στο νερό, είτε από φυσικές διεργασίες είτε από γεωργική χρήση, υποβαθμίζουν την ποιότητα του νερού και το καθιστούν ακατάλληλο για ανθρώπινη κατανάλωση.

### **1.6 Πηγές βαρέων μετάλλων στο έδαφος**

Αν και υπάρχουν φυσικά στο έδαφος, τα βαρέα μέταλλα συνήθως δεν αποτελούν τοξική απειλή και μπορούν ακόμη και να υποστηρίξουν τις διεργασίες του εδάφους. Ωστόσο, οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν διαταράξει την ισορροπία του οικοσυστήματος, με αποτέλεσμα τη συσσώρευση και συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στο έδαφος. Αυτή η ανησυχητική πραγματικότητα έχει σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς τα αυξημένα επίπεδα τοξικότητας ενέχουν σημαντικούς κινδύνους

τόσο για τη ζωή των ζώων όσο και για τα φυτά που αλληλεπιδρούν με το έδαφος, καθώς και για το ευρύτερο οικοσύστημα γενικότερα (Abdu et al., 2017).

Η χρήση λιπασμάτων για την ενίσχυση της ανάπτυξης των φυτών στις καλλιέργειες μπορεί να διαταράξει την ευαίσθητη ισορροπία του εδάφους αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων. Σε περιπτώσεις που ανιχνεύεται έλλειψη των φυτών σε βαρέα μέταλλα (όπως Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni και Zn), γίνεται εισαγωγή των στοιχείων αυτών με τη μορφή λιπάσματος για την εντατικοποίηση της φυτικής παραγωγής. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να προστεθούν συστατικά που είτε απουσιάζουν είτε υπάρχουν σε μικρότερες ποσότητες από αυτές που απαιτούνται για την υγιή ανάπτυξη των φυτών. Για να επιτευχθεί αυτό, μεγάλες ποσότητες λιπασμάτων προστίθενται συχνά στα εδάφη, προκαλώντας αύξηση των συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων, τα οποία μπορεί να υπάρχουν ως ίχνη στα λιπάσματα. Αυτό, με τη σειρά του, μπορεί να αυξήσει σημαντικά την περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα στο έδαφος. Επιπλέον, κατά τη διαδικασία λίπανσης, άλλα επιβλαβή στοιχεία μπορούν να διεισδύσουν στο έδαφος και να αυξήσουν ανεξέλεγκτα το ρυπαντικό φορτίο.

Παράλληλα, η συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στο έδαφος αυξάνεται λόγω της υπερβολικής χρήσης φυτοφαρμάκων. Στο παρελθόν, πολλά ευρέως χρησιμοποιούμενα φυτοφάρμακα περιείχαν σημαντικά επίπεδα χαλκού, μολύβδου και αρσενικού, προκαλώντας αρνητική επιβάρυνση του εδάφους. Ο θειικός χαλκός και ο οξυχλωριούχος χαλκός ήταν οι συγκεκριμένοι ένοχοι σε ορισμένα μυκητοκτόνα. Παρά το γεγονός ότι είναι πιο ελεγχόμενη από τη λίπανση, η αλόγιστη χρήση φυτοφαρμάκων εξακολουθεί να έχει ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση βαρέων μετάλλων στο έδαφος, αυξάνοντας περαιτέρω τα επίπεδα συγκέντρωσής τους πέρα από αυτό που θεωρείται φυσιολογικό. Αυτό το θέμα επισημάνθηκε από τους Mahmood et al. (2016).

Όταν βιομάζα, όπως κοπριά ζώων ή δημοτικά λύματα, εφαρμόζεται στο έδαφος, τα βαρέα μέταλλα συσσωρεύονται και διαταράσσουν την ισορροπία του εδάφους. Ειδικότερα, οι αγρότες συχνά χρησιμοποιούν ως λίπασμα τα ζωικά απόβλητα από πουλερικά, χοίρους και βοοειδή. Ωστόσο, αυτή η πρακτική μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα λόγω της προσθήκης χαλκού και ψευδαργύρου στη διατροφή των ζώων, αυξάνοντας τελικά τη συγκέντρωση βαρέων μετάλλων και τη ρύπανση του εδάφους. Ενώ αυτά τα υλικά είναι συνήθως πολύτιμα για τις καλλιέργειες, η υπερβολική χρήση



τους μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα, όπως σημειώθηκε από τους Cui και Holden το 2015.

Τα αστικά απόβλητα μπορούν να αυξήσουν τα επίπεδα των βαρέων μετάλλων στο έδαφος, προκαλώντας έτσι υποβάθμιση της ποιότητας του εδάφους. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα όταν η γη αρδεύεται για μεγάλες περιόδους, γεγονός που μπορεί να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στη συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στο έδαφος.

Καθώς η βιομηχανία προχωρά γρήγορα, τα βαρέα μέταλλα συγκεντρώνονται ανησυχητικά στο έδαφος και στο περιβάλλον. Η διάθεση των βιομηχανικών αποβλήτων στη γη, αν και είναι ωφέλιμη για τη γεωργία και τη δασοκομία, θέτει σοβαρά περιβαλλοντικά ζητήματα. Υπάρχουν βαρέα μέταλλα όπως το Cr, το Pb και ο Zn, μαζί με τοξικές οργανικές ενώσεις, καθιστώντας αυτά τα συγκεκριμένα απόβλητα ιδιαίτερα επικίνδυνα. Τα βιομηχανικά απόβλητα είναι επίσης ελλιπή σε βασικά θρεπτικά συστατικά των φυτών και στερούνται ρυθμιστικής ικανότητας, καθιστώντας τα ακατάλληλα για εφαρμογή στο έδαφος. (Bilal, et al., 2013).

Η εξόρυξη και η επεξεργασία μετάλλων χρησιμεύουν ως πρωταρχικές πηγές για τη διάχυση βαρέων μετάλλων στο έδαφος. Αυτές οι δραστηριότητες διασκορπίζουν μεταλλικούς ρύπους στο έδαφος και σε παρακείμενους υγροτόπους μέσω της απόρριψης αποβλήτων εξόρυξης. Συγκεκριμένα, οι πρακτικές τήξης μολύβδου και ψευδαργύρου προκαλούν ρύπανση του εδάφους, θέτοντας ταυτόχρονα περιβαλλοντικούς κινδύνους και κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία (Sánchez & Hartlieb, 2020).

Η ρύπανση του εδάφους από βαρέα μέταλλα μπορεί επίσης να προέρχεται από την ατμοσφαιρική ρύπανση. Τα αέρια, ο καπνός, η σκόνη, τα αιωρούμενα σωματίδια και άλλες εκπομπές αέρα είναι οι κύριες πηγές αυτών των μετάλλων. Αυτά τα πτητικά μέταλλα απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα ως σωματίδια, τα οποία συχνά κατακάθονται στο έδαφος μέσω άμεσης εναπόθεσης ή μιας σειράς κύκλων (Zotta, 2018).

### **1.7 Κινητικότητα και κατανομή βαρέων μετάλλων**

Η εξάπλωση των ρύπων και ο αντίκτυπός τους στο περιβάλλον απασχολεί ιδιαίτερα τους ερευνητές, οι οποίοι μελετούν την κινητικότητα αυτών των ουσιών στο έδαφος. Όσο πιο ευκίνητος είναι ο ρύπος, τόσο μεγαλύτερη είναι η διασπορά του και τόσο μεγαλύτερη είναι η ρύπανση. Ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας στη διαχείριση της

ρύπανσης είναι η κατανομή των ρύπων στο έδαφος. Για παράδειγμα, η κατανομή των βαρέων μετάλλων και των μορφών τους στο έδαφος είναι ζωτικής σημασίας για τον καθορισμό της κατάλληλης διαδικασίας επεξεργασίας της ρύπανσης. Οι τεχνικές εκχύλισης χρησιμοποιούνται συνήθως για τον προσδιορισμό της κατανομής βαρέων μετάλλων, η οποία περιλαμβάνει τη φυγοκέντρωση ενός δείγματος εδάφους και τη χρήση ενός αποικοδομητικού παράγοντα για τη διάλυση μεταλλικών φάσεων. Ye et al. (2017) τονίζουν ότι η κατανομή των βαρέων μετάλλων είναι βασική παράμετρος για την επιλογή της κατάλληλης διαδικασίας επεξεργασίας της ρύπανσης. Στη συνέχεια, το προκύπτον υγρό εκχυλίζεται και τα μεταλλικά συστατικά ασφαλίζονται μέσω δέσμευσης οξέος, με τα επίπεδα συγκέντρωσης να αξιολογούνται με εξειδικευμένες αναλυτικές μεθόδους. Αυτές οι τεχνικές προσαρμόζονται σε κάθε μέταλλο που εξάγεται, με προφυλάξεις που λαμβάνονται για να αποφευχθεί η διάλυση άλλων μετάλλων. Οι τεχνικές προσαρμόζονται με βάση τις τιμές pH, τη θερμοκρασία, την ισχύ του αντιδραστήριου και τις ιδιότητες του στερεού δείγματος. (Ye et al., 2017)

Το χλωριούχο βάριο, το οξικό αμμώνιο και το χλωριούχο μαγνήσιο είναι ισχυροί εκχυλιστικοί παράγοντες με την ικανότητα να δεσμεύουν σουλφίδια, αλουμίνιο, πυρίτιο και οργανική ύλη. Το οξικό νάτριο, από την άλλη πλευρά, είναι ένας αποτελεσματικός παράγοντας εκχύλισης για ανθρακικές φάσεις όπως ο ασβεστόλιθος και ο δολομίτης σε περιβάλλον pH=3. Η υδροξυλαμίνη με υδροχλώριο, σε περιβάλλον pH=2, είναι χρήσιμη στην εκχύλιση οξειδίων σιδήρου ή μαγνησίου. Η διασπορά των ρύπων στο έδαφος εξαρτάται από παράγοντες όπως τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως η τιμή του pH, η περιεκτικότητα σε άργιλο, το δυναμικό οξειδοαναγωγής, τα οργανικά και οξειδωτικά στοιχεία και η κινητικότητά τους. Τα απλά ή σύνθετα κατιόντα παρουσιάζουν μεγαλύτερη κινητικότητα στο έδαφος, ενώ τα χηλικά κατιόντα παρουσιάζουν ελάχιστη κινητικότητα. Ο ψευδάργυρος και ο χαλκός είναι και ανταλλάξιμοι και οργανικά συνδεδεμένοι, αλλά ο ψευδάργυρος είναι πιο ευκίνητος από τον χαλκό. Ο μόλυβδος παρουσιάζει ήπια κινητικότητα και συνδέεται με ορυκτά όπως ο γαλήνας, ο κερουσίτης ο αγγλεσίτης, και ο κροκοΐτης. Το κάδμιο είναι το πιο κινητό μέταλλο λόγω της μεγάλης κινητικότητάς του. Το εύρος κατανομής και κινητικότητας των βαρέων μετάλλων στο έδαφος καθορίζεται από τη μορφή με την οποία βρίσκεται το μέταλλο στο έδαφος και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του εδάφους.

### **1.8 Πολυμορφία και βιοδιαθεσιμότητα των βαρέων μετάλλων**

Ο πολυμορφισμός ή η ειδογένεση αναφέρεται στις ποικίλες χημικές μορφές που υιοθετούν τα μέταλλα στο εδαφικό διάλυμα, είτε υπάρχουν με τη μορφή ελεύθερων ιόντων είτε ως σύμπλοκα. Αυτός ο όρος περιλαμβάνει επίσης την ταυτότητα του μεταλλικού στοιχείου, το επίπεδο οξείδωσης και τη γεωμετρία του μορίου. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι τα μεταλλικά στοιχεία μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους, οδηγώντας στη δημιουργία συμπλεγμάτων που είναι δύσκολο να διαφοροποιηθούν. Η αλληλεπίδραση μεταξύ βαρέων μετάλλων και άλλων χημικών στοιχείων στο έδαφος, σε συνδυασμό με τις ποικίλες συγκεντρώσεις τους, είναι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη χημεία του εδάφους. Αυτοί οι παράγοντες παίζουν επίσης καθοριστικό ρόλο στα μοντέλα που προβλέπουν και καθορίζουν την τύχη των θρεπτικών ουσιών και των ρύπων στα εδάφη (Ζώττα, 2018).

Η κατανόηση της επίδρασης των βαρέων μετάλλων στο έδαφος είναι ζωτικής σημασίας για τις προσπάθειες αποκατάστασης. Η βιοδιαθεσιμότητα είναι ένας βασικός παράγοντας που καθορίζει την τύχη αυτών των μετάλλων στο έδαφος. Αν και ο ορισμός της βιοδιαθεσιμότητας δεν είναι ακριβής, αναφέρεται στην ευκολία με την οποία ένα χημικό στοιχείο μπορεί να απορροφηθεί από ανθρώπους, φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς. Αυτό μπορεί να είναι είτε ωφέλιμο είτε επιβλαβές, ανάλογα με τη θρεπτική αξία του μετάλλου που προσλαμβάνεται. Η μορφή του μετάλλου παίζει κρίσιμο ρόλο στον προσδιορισμό της βιοδιαθεσιμότητας του. Παρόλο που τα μέταλλα μπορούν να διαπεράσουν τις κυτταρικές μεμβράνες, δεν εγγυάται την πρόσληψη ή την απέκκριση από όλους τους οργανισμούς. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα βακτήρια και οι μύκητες του εδάφους μπορούν να απορροφήσουν υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων μέσω της δέσμευσης των πρωτεϊνών και του σχηματισμού θειούχων μετάλλων. Αυτοί οι μηχανισμοί τους επιτρέπουν να συσσωρεύουν μέταλλα αποτελεσματικά, σύμφωνα με την Ζώττα (2018).

### **1.9 Νομοθετικό πλαίσιο**

Η Ευρωπαϊκή Ένωση δεν έχει ακόμη καθορίσει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την αντιμετώπιση των πολιτικών αντιμετώπισης της ρύπανσης. Αντίθετα, η προσέγγισή τους ήταν να αντιμετωπίσουν μεμονωμένα ζητήματα ρύπανσης με περιστασιακά, και συχνά αναποτελεσματικά, άμεσα ή έμμεσα μέτρα. Σε μια προσπάθεια να καλύψει τα κενά στους υφιστάμενους νόμους, η ΕΕ έχει λάβει μέτρα για να εξετάσει διάφορες απειλές για την εδαφική υποβάθμιση, συμπεριλαμβανομένης της πρότασης οδηγίας-

πλαισίου για την αντιμετώπιση διαφορετικών μορφών υποβάθμισης του εδάφους, όπως η ρύπανση, η διάβρωση, η αλάτωση, η μείωση της βιοποικιλότητας, οι κατολισθήσεις και οι πλημμύρες . Η οδηγία απαιτεί από τα κράτη μέλη να λάβουν συγκεκριμένα μέτρα για τον μετριασμό και την εξάλειψη αυτών των περιβαλλοντικών ανησυχιών. Παρά την οδηγία, εξακολουθεί να υπάρχει έλλειψη διαύγειας σχετικά με τα βήματα που πρέπει να ληφθούν, δίνοντας στα κράτη μέλη την ελευθερία να αξιολογούν τον πιθανό κίνδυνο και να επιλέγουν διορθωτικά μέτρα. Δυστυχώς, αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ανεπαρκή νομοθεσία και καθοδήγηση για πολλές χώρες της ΕΕ σχετικά με το μολυσμένο έδαφος. (Intergeo, 2012).

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η Ελλάδα συγκαταλέγεται στις χώρες που στερούνται θεσμοθετημένης νομοθεσίας με σαφή κριτήρια και οριακές τιμές για τη ρύπανση του εδάφους. Επιπλέον, η ήδη υπάρχουσα νομοθεσία μαστίζεται από ασυνέπειες, ασάφειες και ελλείψεις. Παρά την επιτακτική ανάγκη καθορισμού ενός νομοθετικού πλαισίου με ακριβή όρια και τιμές και μείωση της ρύπανσης του εδάφους, τέτοιοι νόμοι δεν έχουν ακόμη θεσπιστεί για να επιβληθεί η απαιτούμενη προσοχή.

Το Intergeo (2012) περιγράφει τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες που αφορούν την αποκατάσταση των μολυσμένων εδαφών.

Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο της 23ης Οκτωβρίου 2000 καθιέρωσαν την οδηγία 2000/60/ΕΚ, η οποία δημιούργησε ένα πλαίσιο κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων. Αυτή η οδηγία περιλάμβανε την παρακολούθηση της ρύπανσης του εδάφους και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ως πηγές επιβλαβών ουσιών, εκτός από την προστασία της ποιότητας των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων.

Το Συμβούλιο της 24ης Σεπτεμβρίου 1996 θέσπισε την οδηγία 96/61/ΕΚ για να αντιμετωπίσει το ζήτημα της ολοκληρωμένης πρόληψης και ελέγχου της ρύπανσης. Η Οδηγία αποσκοπεί στη ρύθμιση του σχεδιασμού και της λειτουργίας των εγκαταστάσεων για την προστασία του περιβάλλοντος.

Επί του παρόντος, η Ελλάδα δεν έχει συγκεκριμένους νόμους που να διέπουν την αποκατάσταση των μολυσμένων εδαφών ή τη διαχείριση του εδάφους γενικότερα. Αντίθετα, οι κανονισμοί που αφορούν τη ρύπανση του εδάφους ενσωματώνονται στην ευρύτερη νομοθεσία για την προστασία του περιβάλλοντος.

Οι κανονισμοί που ισχύουν επί του παρόντος στην Ελλάδα, όπως δήλωσε η Intergeo το 2012, είναι οι εξής:

Ο Νόμος για την Προστασία του Περιβάλλοντος του 1986, γνωστός και ως Νόμος 1650, αποσκοπεί στην προστασία του περιβάλλοντος. Το κυβερνητικό μέτρο ΚΥΑ 26857/553/88, γνωστό και ως Κυβέρνηση 196B, περιγράφει συγκεκριμένα μέτρα και περιορισμούς που ισχύουν για την προστασία των υπόγειων υδάτων από απορρίψεις επιβλαβών ουσιών. Οι κατευθυντήριες γραμμές και οι προϋποθέσεις για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων περιγράφονται στο ΚΥΑ 69728/824/96. Ο εθνικός σχεδιασμός για τη διαχείριση στερεών αποβλήτων περιγράφεται στο ΚΥΑ 113944/97. Το έγγραφο με αριθμό αναφοράς ΚΥΑ 19396/1546/97 αφορά τις οδηγίες, τους όρους και τα απαραίτητα βήματα για τη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων.

Κάθε ευρωπαϊκή χώρα έχει το δικό της σύνολο κατευθυντήριων γραμμών και οριακών τιμών για διάφορους ρύπους στο έδαφος και τα υπόγεια ύδατα. Παρόλα αυτά, η ελληνική εθνική νομοθεσία στερείται των απαραίτητων διατάξεων για την αξιολόγηση του κινδύνου μολυσμένων εδαφών κατά τον σχεδιασμό και την εφαρμογή της αποκατάστασης. Επιπλέον, δεν υπάρχουν καθορισμένα όρια για τις επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις χημικών ουσιών στο έδαφος. Μέχρι να αντιμετωπιστούν αυτά τα κενά στην ελληνική νομοθεσία, θα χρησιμοποιούνται διεθνή και ευρωπαϊκά πρότυπα για τον καθορισμό στοχευόμενων συγκεντρώσεων ρύπανσης του εδάφους και των υπόγειων υδάτων (Πίνακας 1 και Πίνακας 2). Κάθε περίπτωση θα υποβληθεί σε Ανάλυση Εκτίμησης Περιβαλλοντικού Κινδύνου για τον καθορισμό των κατάλληλων μέτρων (Ιγνατιάδου, 2022).

Υπάρχουν πολυάριθμες διεθνείς κατευθυντήριες γραμμές για τα όρια απορρύπανσης του εδάφους, συμπεριλαμβανομένων των καταλόγων του Καναδά και της Νέας Ολλανδίας, καθώς και των δεικτών Elli (παλαιότερα γνωστών ως κατευθυντήριων γραμμών του Ηνωμένου Βασιλείου Elliindices Former GCL για μολυσμένα εδάφη) και των κριτηρίων καθαρισμού εδάφους της Πολιτείας του Νιου Τζέρσεϋ στο οι Ηνωμένες Πολιτείες.

Σε πολλές περιπτώσεις, οι προαναφερθείσες λίστες χρησιμεύουν ως συμπλήρωμα στις πρωτοβουλίες αποκατάστασης του εδάφους. Ο καθορισμός των απαραίτητων ορίων ρύπανσης (δηλ. συγκεντρώσεις στόχου) θα πρέπει να πραγματοποιείται κατά περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψη τα μοναδικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Αυστηρά

όρια μπορεί να κριθούν κατάλληλα σε ιδιαίτερα οικολογικά ευαίσθητες περιοχές, ενώ λιγότερο αυστηρά όρια μπορεί να αρκούν σε λιγότερο ευαίσθητες τοποθεσίες.

Όπως σημειώθηκε προηγουμένως, η Ελλάδα δεν έχει επί του παρόντος καθορισμένα όρια για την απορρύπανση του εδάφους. Αντίθετα, τα κράτη της Κεντρικής Ευρώπης έχουν μελετήσει το μολυσμένο έδαφος τις τελευταίες δύο δεκαετίες και έχουν εφαρμόσει συγκεκριμένα όρια για τη χρήση απορρύπανσης με βάση τον τύπο της προβλεπόμενης χρήσης για ένα συγκεκριμένο χωράφι ή οικόπεδο.

Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται τα παρακάτω όρια με βάση την ανάγκη της κάθε περίπτωσης έργου. Τα δεδομένα προκύπτουν από τη διεθνή νομοθεσία και βιβλιογραφία.

Πίνακας 1: Συγκεντρώσεις στόχοι της ex-situ απορρύπανσης εδάφους (Ιγνατιάδου, 2022).

Ρύπος	Συγκέντρωση στόχος
TPH	500 mg/Kg
BTEX	6 mg/Kg
TOC	30.000 mg/Kg
PCB	1 mg/Kg
PAH	100 mg/Kg

Πίνακας 2: Ενδεικτικές συγκεντρώσεις στόχοι βαρέων μετάλλων(New Dutch List) για το έδαφος για in-situ τεχνικές (Ιγνατιάδου, 2022).

Ρύπος	Ενδεικτική συγκέντρωση στόχος
Αρσενικό	55 mg/Kg
Κάδμιο	12 mg/Kg
Χρώμιο	380 mg/Kg
Κοβάλτιο	240 mg/Kg
Χαλκός	190 mg/Kg
Υδράργυρος ανόργανος	10 mg/Kg
Μόλυβδος	530 mg/Kg

Νικέλιο	210 mg/Kg
Ψευδάργυρος	720 mg/Kg

Είναι σαφές ότι το έδαφος είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την ανθρώπινη υγεία. Ωστόσο, η ποιότητα του εδάφους και τα όρια ασφαλούς συγκέντρωσης χημικών στοιχείων στην Ευρώπη, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, δεν έχουν ερευνηθεί εκτενώς. Αυτό οδηγεί σε έλλειψη αξιόπιστων δεδομένων. Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει επιστημονικά καθορισμένες οριακές τιμές για βαρέα μέταλλα σε περισσότερες από 22.000 τοποθεσίες σε ολόκληρη την Ευρωπαϊκή Ένωση. Αυτά τα μέταλλα περιλαμβάνουν As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn, Sb, Co και Ni. Ενώ οι περισσότερες γεωργικές εκτάσεις στην Ευρώπη είναι ασφαλείς για παραγωγή τροφίμων, περίπου το 6,24% ή 137.000 km<sup>2</sup> απαιτεί αξιολόγηση και αποκατάσταση, σύμφωνα με τους Tóth et al. (2016).

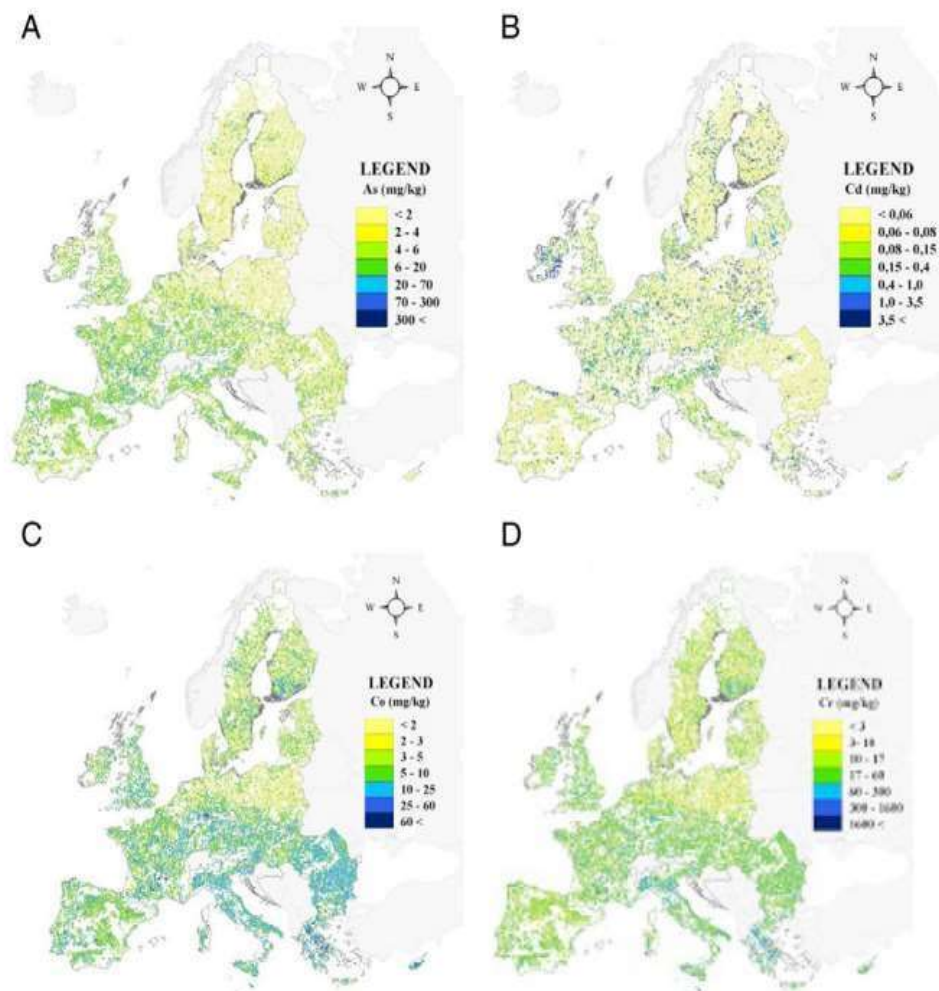
Πίνακας 3: Οριακές τιμές και ενδεικτικές τιμές για μέταλλα σε εδάφη (Tóth, et al, 2016).

Ρύπος	Οριακή Τιμή mg/Kg	Κατώτερη οριακή τιμή mg/Kg	Υψηλή οριακή τιμή mg/Kg
Αντιμόνιο (Sb)	2	10 (t)	50 (e)
Αρσενικό (As)	5	50 (e)	100 (e)
Υδράργυρος (Hg)	0.5	2 (e)	5 (e)
Κάδμιο (Cd)	1	10 (e)	20 (e)
Κοβάλτιο (Co)	20	100 (e)	250 (e)
Χρώμιο (Cr)	100	200 (e)	300 (e)
Χαλκός (Cu)	100	150 (e)	200 (e)
Μόλυβδος (Mo)	60	200 (t)	750 (e)
Νικέλιο (Ni)	50	100 (e)	150 (e)
Ψευδάργυρος (Zn)	200	250 (e)	400 (e)
Βανάδιο (V)	100	150 (e)	250 (e)

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 1) παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των βαρέων μετάλλων στα εδάφη της Ευρώπης. Συγκεκριμένα το Α αντιστοιχεί στην κατανομή του

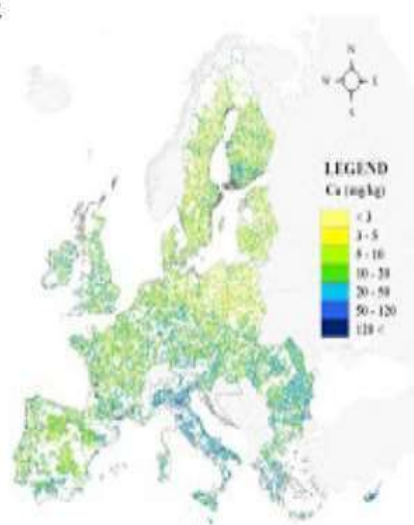
Αρσενικού (Ar), το Β στο κάδμιο (Cd), το C στο κοβάλτιο (Co), το D στο χρώμιο (Cr), το E στο κάδμιο (Cd), το F στον υδράργυρο (Hg), το G στο νικέλιο (Ni), το H στον μόλυβδο (Pb), το I στο αντιμόνιο (Sb) και το J στον ψευδάργυρο (Zn). Δίπλα από κάθε περίπτωση απεικονίζονται οι τιμές του κάθε μετάλλου ανά χρώμα, όπου το κίτρινο αντιστοιχεί στις πιο χαμηλές τιμές, και το μπλε στις πιο υψηλές. Τα χρώματα αυτά, που αντιστοιχούν στις τιμές των βαρέων μετάλλων σε mg/kg, απεικονίζονται και πάνω στον χάρτη. Από τις εικόνες φαίνεται ότι η Ελλάδα βρίσκεται αρκετά υψηλά σε συγκεντρώσεις κάποιων βαρέων μετάλλων, όπως είναι το κοβάλτιο, το χρώμιο, το κάδμιο και το νικέλιο.

Εικόνα 1. Χωρική αναπαράσταση επιπέδων βαρέων μετάλλων σε επιφανειακό έδαφος της Ευρωπαϊκής Ένωσης

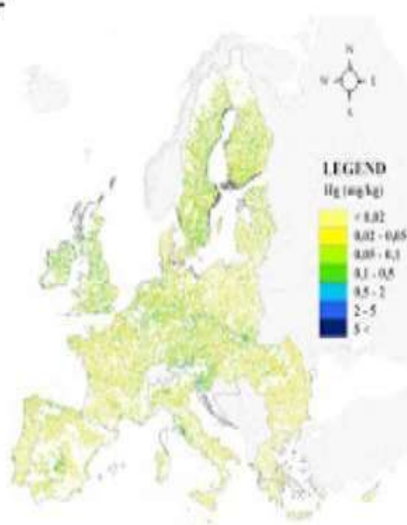




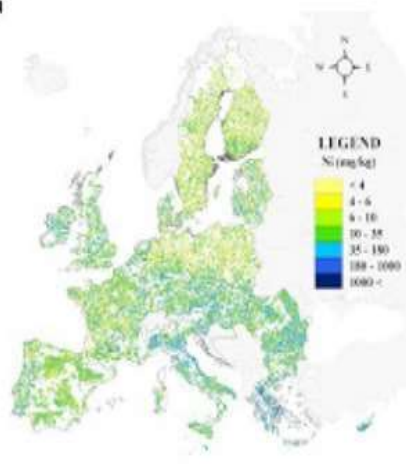
E



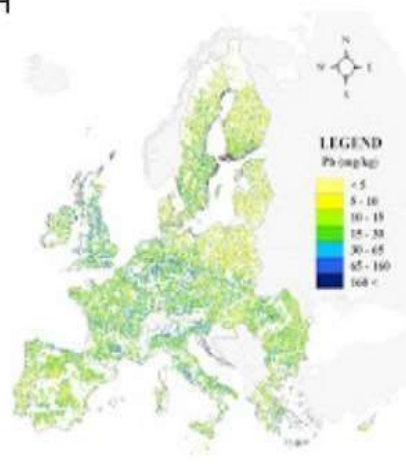
F



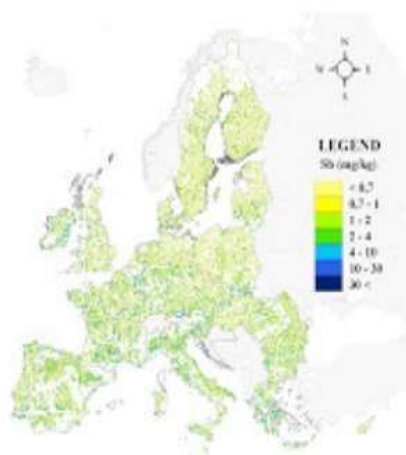
G



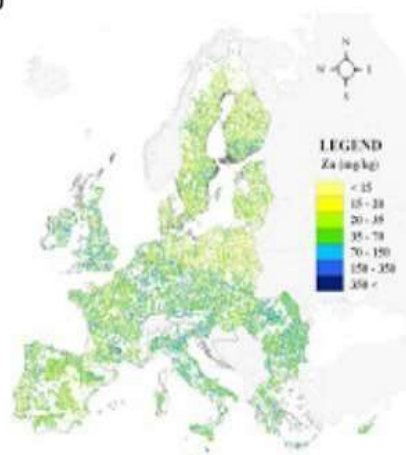
H



I



J



## **Κεφάλαιο 2: Αποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών**

Η αποκατάσταση είναι μια ανθρώπινη προσπάθεια που στοχεύει στη σταθεροποίηση των υποβαθμισμένων περιοχών, στην αποκατάσταση των λειτουργιών τους και στην καθοριζόμενη χρήση τους. Αυτό περιλαμβάνει την εφαρμογή μέτρων για την ενίσχυση, την επισκευή και την αντικατάσταση των φυσικών πόρων που έχουν καταστραφεί, υποβαθμιστεί ή αντικατασταθεί με εναλλακτικές λύσεις. Δυστυχώς, υπάρχουν καταστάσεις όπου οι οικολογικές διαταραχές είναι τόσο σοβαρές που η αποκατάσταση στις αρχικές συνθήκες δεν είναι εφικτή. Σε τέτοιες περιπτώσεις, καταβάλλονται προσπάθειες για τη δημιουργία ευνοϊκών συνθηκών που ευνοούν τη δημιουργία μιας νέας οικολογικής ισορροπίας. (Ιγνατιάδου, 2022)

Η Ευρωπαϊκή Ένωση υποστηρίζει ότι η αντιστροφή της περιβαλλοντικής υποβάθμισης μπορεί να επιτευχθεί με την επαναφορά του περιβάλλοντος στην αρχική του κατάσταση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός συνδυασμού αποκλειστικών, συμπληρωματικών ή αντισταθμιστικών δράσεων που στοχεύουν στη βελτίωση της ποιότητας των φυσικών οικοτόπων, των εδαφών και των υδάτινων πηγών (Βουλγαρίδου, 2015). Η πρωτογενής αποκατάσταση, γνωστή και ως αποκλειστική αποκατάσταση, αναφέρεται σε οποιαδήποτε διαδικασία που αποσκοπεί στην επαναφορά της λειτουργικότητας των φυσικών πόρων στην αρχική τους κατάσταση. Η ανακατασκευή των οικοτόπων (αποκατάσταση) βρίσκεται στον πυρήνα αυτής της προσέγγισης, η οποία θεωρείται η πιο απαιτητική.

Όταν οι φυσικοί πόροι έχουν υποστεί ζημιά, οι προσπάθειες αποκατάστασης μπορεί να ακολουθήσουν μία από τις δύο προσεγγίσεις: συμπληρωματική ή αντισταθμιστική. Η συμπληρωματική αποκατάσταση στοχεύει στην αποκατάσταση των λειτουργιών των υποβαθμισμένων πόρων όταν η πρωτογενής αποκατάσταση δεν είναι εφικτή. Από την άλλη πλευρά, γίνονται αντισταθμιστικές ενέργειες αποκατάστασης για την αντιστάθμιση των απωλειών φυσικών πόρων από τη στιγμή της ζημιάς μέχρι να συμβεί πρωτογενής αποκατάσταση (Βουλγαρίδου, 2015).

### **2.1 Τεχνολογίες αποκατάστασης ακόρεστων εδαφών**

Για να βελτιωθεί η κατανόηση, οι τεχνικές για την αποκατάσταση ακόρεστων εδαφών εμπίπτουν σε διακριτές κατηγορίες. Αυτές οι κατηγορίες μπορούν να χωριστούν σε δύο: in-situ τεχνολογίες, που μπορούν να εφαρμοστούν απευθείας στο πεδίο, και ex-

situ τεχνολογίες που απαιτούν την αφαίρεση του μολυσμένου εδάφους για επεξεργασία σε εξειδικευμένες εγκαταστάσεις.

Όσον αφορά την απομάκρυνση συγκεκριμένων ρύπων, μπορεί να γίνει μια διαφοροποίηση με βάση τους μηχανισμούς που χρησιμοποιεί κάθε τεχνολογία. Στην περίπτωση των φυσικών μηχανισμών, τους αναφερόμαστε ως φυσικές μεθόδους αποκατάστασης του εδάφους, ενώ οι χημικοί μηχανισμοί ταξινομούνται ως μέθοδοι αποκατάστασης χημικού οπτάνθρακα.

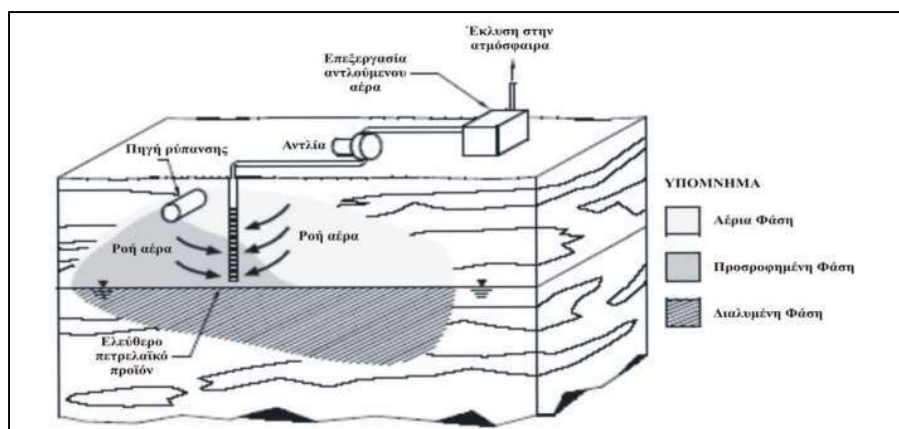
Οι τεχνικές αποκατάστασης του εδάφους μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την επιρροή που έχουν στους ρύπους. Αυτές οι μέθοδοι μπορεί να εμπεριέχουν την καταστροφή των ρύπων, όπως φαίνεται στη βιοαποικοδόμηση, ή την εξαγωγή τους χωρίς την καταστροφή τους, όπως παρατηρείται στην τεχνολογία άντλησης αέρα του εδάφους. Εναλλακτικά, μπορεί να στοχεύουν στη δέσμευση ρύπων, όπως με τη φυτοαποκατάσταση, ή να περιορίσουν τη διάδοσή τους, όπως στην περίπτωση της σταθεροποίησης-στερεοποίησης.

Η συγκεκριμένη ενότητα περιγράφει τεχνολογίες για την αποκατάσταση και την ενοποίηση του εδάφους, κατηγοριοποιημένες σύμφωνα με τους μηχανισμούς απομάκρυνσης των ρύπων, φυσικών, χημικών ή άλλων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή μεθόδων αποκατάστασης σε μολυσμένο έδαφος συμβάλλει σημαντικά στην αποκατάσταση των υποκείμενων υδροφορέων. Συγκεκριμένα, η απομάκρυνση των ρύπων από την ακόρεστη ζώνη εμποδίζει τη μεταφορά τους στην κορεσμένη ζώνη και προωθεί την αντίστροφη μεταφορά, κυρίως μέσω της εξάτμισης, ειδικά σε περιπτώσεις όπου οι ρύποι είναι πτητικές.

### **2.1.1 Φυσικοχημικές μέθοδοι**

Η άντληση εδαφικού αέρα ονομάζεται επίσης Εδαφικός Αερισμός (Soil Venting) και Απομάκρυνση Υπό Κενό (Vacuum Extraction). Πρόκειται για μια μέθοδο, η οποία εκμεταλλεύεται την πτητικότητα που εμφανίζουν οι εδαφικοί ρύποι, όπου προωθείται η μεταφορά της μάζας τους από την προσροφημένη και ελεύθερη φάση προς την αέρια (Γιδαράκος, et al., 2009).

Εικόνα 2. Τυπικό σύστημα άντλησης εδαφικού αέρα

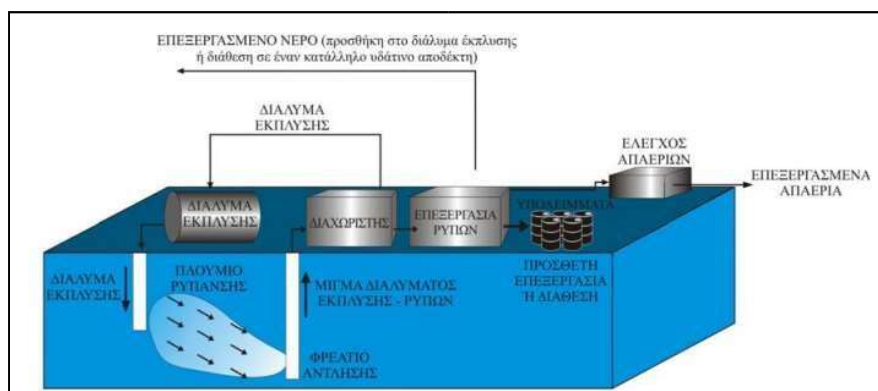


Η τεχνολογία άντλησης αέρα εδάφους λειτουργεί με τη χρήση αρνητικής πίεσης για την εξαγωγή αέριων ρύπων από το έδαφος. Καθώς οι ρύποι εισχωρούν στο έδαφος, ο αέρας του εδάφους κορεστεί με ατμούς, ακινητοποιώντας τον. Ωστόσο, με την άντληση του εδάφους, αυτοί οι ατμοί απομακρύνονται και δημιουργείται ροή αέρα. Τα φρεάτια άντλησης συλλέγουν τον αέρα, μαζί με μια σημαντική ποσότητα ρύπων, οι οποίοι στη συνέχεια κατευθύνονται στη μονάδα επεξεργασίας αέρα εδάφους για επεξεργασία (Lucia, et al., 2017).

Για να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά μέσω αυτής της τεχνολογίας, οι ρύποι πρέπει να έχουν ορισμένα χαρακτηριστικά. Θα πρέπει να είναι κυρίως πτητικά ή ημιπτητικά, με τάση ατμών μεγαλύτερη από 0,5 mm Hg στους 20°C ή σταθερά του νόμου του Henry μεγαλύτερη από  $10^{-3} \text{ atm} \cdot \text{m}^3/\text{mole}$ . Επιπλέον, η διαλυτότητα των ρύπων θα πρέπει να είναι ελάχιστη και η τάση προσρόφησής τους θα πρέπει να είναι χαμηλή για να διευκολύνεται η εύκολη μεταφορά στην αέρια φάση. Αυτές οι παράμετροι είναι απαραίτητες για την αποτελεσματική λειτουργία της μεθόδου. Οι ελαφροί υδρογονάνθρακες διαθέτουν αυτά τα χαρακτηριστικά και η τεχνολογία άντλησης αέρα του εδάφους είναι κατάλληλη για την αντιμετώπιση της ρύπανσης του εδάφους, κυρίως από οργανικούς και πετρελαϊκούς ρύπους.

Η επιτόπια έκπλυση εδάφους είναι μια τεχνική που συνεπάγεται την εισαγωγή ενός υδατικού διαλύματος σε μια μολυσμένη ζώνη εδάφους για τη μεταφορά ρύπων στο διάλυμα. Αυτό διευκολύνει την απομάκρυνσή τους μέσω άντλησης, όπως περιγράφεται από τους Gidarakos et al. το 2009.

Εικόνα 3. Απεικόνιση εφαρμογής τεχνολογίας εδαφικής έκπλυσης



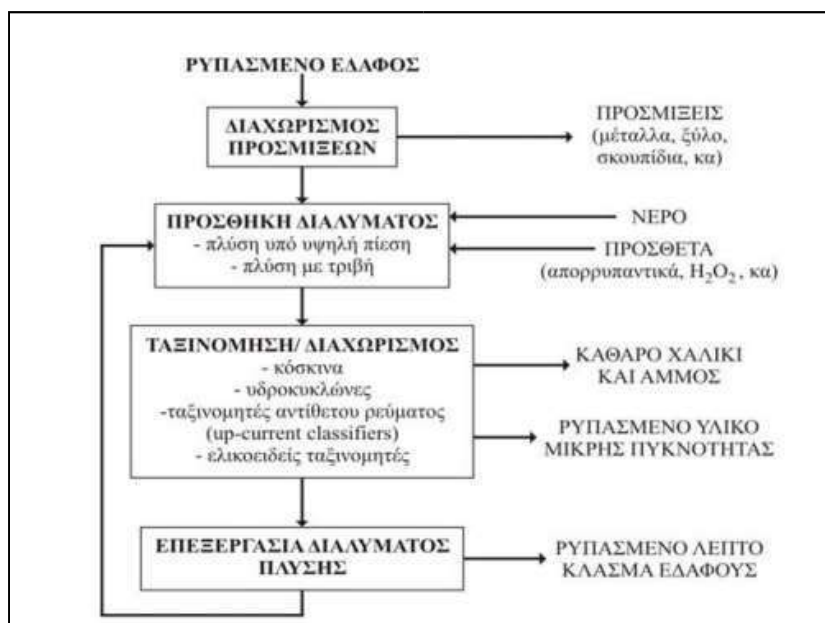
Η έκπλυση του εδάφους στοχεύει στην εξαγωγή ρύπων από το έδαφος και τη μεταφορά τους σε διάλυμα. Αυτό το διάλυμα στη συνέχεια συλλέγεται και επεξεργάζεται στην επιφάνεια του εδάφους. Για να ενισχυθεί η διαλυτότητα και η κινητικότητα των ρύπων του εδάφους, το υδατικό διάλυμα που χρησιμοποιείται σε αυτή τη διεργασία μπορεί να αποτελείται από διάφορες ουσίες όπως διαλυτές οργανικές ενώσεις, διαλύτες, απορρυπαντικά, οξέα, βάσεις ή ακόμη και απλό νερό. (Wang, et al., 2019)

Η ποικιλία των διαθέσιμων διαλυμάτων έκπλυσης διευρύνει σημαντικά το φάσμα των ρύπων που μπορούν να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά με αυτήν την τεχνολογία. Οι ακόλουθες κατηγορίες ρύπων είναι από τις πιο σημαντικές που μπορούν να αντιμετωπιστούν:

- Μη υδατικής φάσης υγρά (NAPL)
- Βαρέα μέταλλα
- Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες
- Πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCB)
- Διοξίνες και Φουράνια.
- Αλογονωμένα Φυτοφάρμακα
- Διαβρωτικές ενώσεις

Το πλύσιμο του εδάφους είναι μια τεχνική αποκατάστασης που χρησιμοποιεί ένα υγρό διάλυμα, συνήθως νερό με πρόσθετα χημικά, και μηχανικές μεθόδους για τη διάλυση ή την εναιώρηση των ρύπων του εδάφους. Αν και είναι πιο αποτελεσματικό στο διαχωρισμό των ρύπων από την εξουδετέρωσή τους, η διαδικασία πλύσης συγκεντρώνει και τους διαχωρίζει κατά μέγεθος, όπως εξηγούν οι Stegmann, et al. το 2001.

Εικόνα 4. Διάγραμμα ροής της διαδικασίας της εδαφικής πλύσης

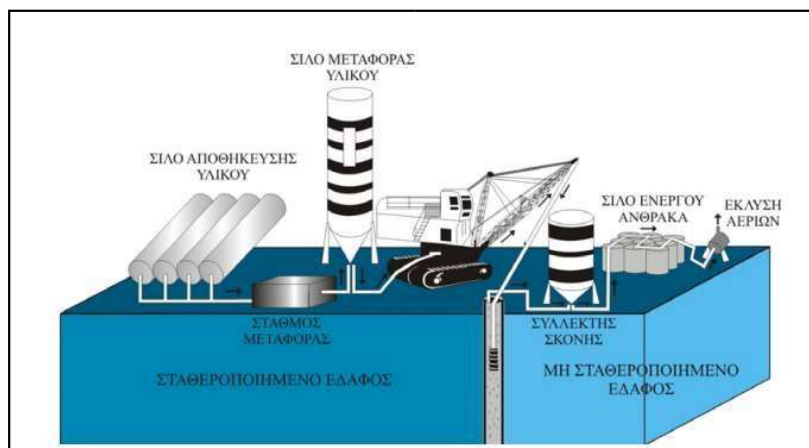


Η τεχνολογία σταθεροποίησης/στερεοποίησης χρησιμοποιείται για να εγκλωβίσει τους ρύπους μέσα σε μια σταθερή δομή, η οποία δημιουργείται από τη συγχώνευση των αποβλήτων με διαφορετικά υλικά. Ο σκοπός αυτής της τεχνολογίας είναι να αλλάξει τις φυσικοχημικές ιδιότητες του μολυσμένου εδάφους, αντί να εξαλείψει πλήρως τους ρύπους του. Η δημοτικότητα αυτής της θεραπείας έχει αυξηθεί στις ΗΠΑ, με περισσότερες από 200 εφαρμογές σε διάφορους τομείς. Οι Gidarakos and Aivalioti (2005) το επιβεβαιώνουν ως μία από τις πιο δημοφιλείς και πρακτικές μεθόδους για την αποκατάσταση του μολυσμένου εδάφους.

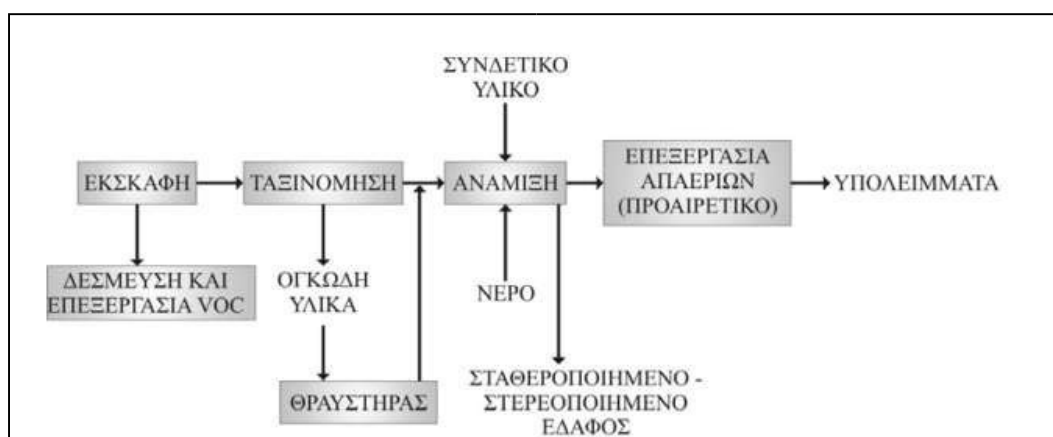
Η σταθεροποίηση είναι μια κρίσιμη διαδικασία που μετριάξει τη διαλυτότητα, την κινητικότητα και την τοξικότητα των ρύπων στα απόβλητα και το έδαφος. Με την χημική ακινητοποίηση των επικίνδυνων ενώσεων και τη μείωση της διαλυτότητας και της ικανότητας εκχύλισής τους, η σταθεροποίηση μειώνει σημαντικά την επικινδυνότητα των αποβλήτων και του εδάφους. Αντίθετα, η στερεοποίηση εγκλωβίζει τα απόβλητα ή το έδαφος σε μια στιβαρή, μονολιθική στερεή δομή, ελαχιστοποιώντας τη συμπίεστότητά τους και αυξάνοντας την αντοχή τους. Η διαδικασία στερεοποίησης δεν συνεπάγεται πάντα χημική αλληλεπίδραση μεταξύ του εδάφους και των στερεοποιητικών παραγόντων, αλλά μάλλον τη μηχανική δέσμευση των ρύπων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα περιορισμένη μεταφορά και εξάπλωση, καθώς και μειωμένη διαπερατότητα του εδάφους. Η τεχνολογία της σταθεροποίησης των

ρύπων και της σταθεροποίησης του εδάφους εφαρμόζεται επιτόπου (in-situ) ή εκτός του χώρου (ex-situ) μετά την εκσκαφή.

Εικόνα 5. In situ σταθεροποίηση ρυπασμένων εδαφών



Εικόνα 6. Ex-situ σταθεροποίηση



### 2.1.2 Βιολογικές μέθοδοι

Η διαδικασία της φυσικής μετατροπής περιλαμβάνει τις αυθόρμητες βιολογικές, φυσικές και χημικές διεργασίες που συμβαίνουν στο υπέδαφος, με αποτέλεσμα τον καθαρισμό του μολυσμένου εδάφους. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εξουδετέρωση ή/και αφομοίωση των ρύπων χωρίς την ανάγκη τεχνολογικής παρέμβασης. Ένα σύστημα παρακολούθησης και συχνή δειγματοληψία και ανάλυση είναι οι μόνες απαιτήσεις για αυτήν την προσέγγιση. Σύμφωνα με μελέτη, η φυσική εξασθένηση είναι η δεύτερη πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική αποκατάστασης του εδάφους, με παγκόσμιο ποσοστό 28%, και η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος αποκατάστασης μολυσμένων υδροφορέων, με ποσοστό 47%. Η επιτυχία της μεθόδου εξαρτάται από δύο κρίσιμους παράγοντες: πρώτον, την εξουδετέρωση της πηγής



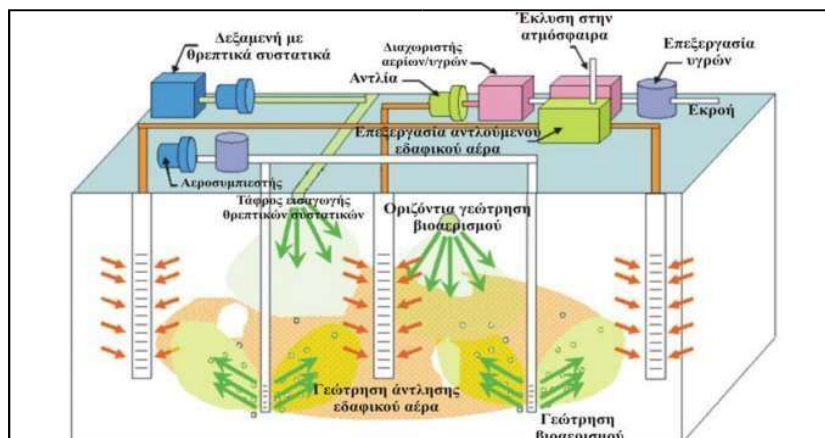
ρύπανσης και, δεύτερον, τον επαρκή χρόνο, καθώς η μέθοδος είναι σχετικά χρονοβόρα (Gall, et al., 2017).

Οι ρύποι που μπορούν να αποκατασταθούν αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνική περιλαμβάνουν:

- Οργανικές ενώσεις που είναι ημιπτητικές ή πτητικές
- Αλογονωμένοι υδρογονάνθρακες και πετρέλαιο
- Εντομοκτόνα
- Διαλύτες επεξεργασμένοι με χλώριο
- Μέταλλα όπως το χρώμιο

Ο βιοαερισμός είναι μια διαδικασία επεξεργασίας του εδάφους που περιλαμβάνει την εισαγωγή αέρα στην ακόρεστη ζώνη. Αυτό διεγείρει τη μικροβιακή δραστηριότητα και προάγει τη βιοαποικοδόμηση των ρύπων. Είναι σημαντικό να διακρίνουμε τον βιοαερισμό από την άντληση αέρα του εδάφους, καθώς ο βιοαερισμός βασίζεται στη βιοαποδομησιμότητα των ρύπων, ενώ η άντληση αέρα του εδάφους βασίζεται στην πτητικότητα τους (Gidarakos et al., 2009).

Εικόνα 7. Σύστημα βιοαερισμού και τεχνολογία άντλησης εδαφικού αέρα

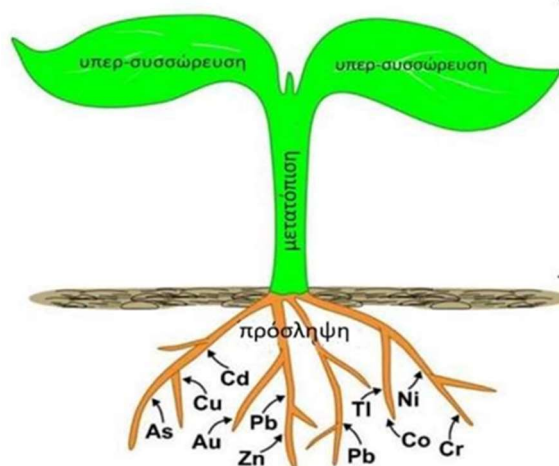


Η φυτοαπορύπανση, γνωστή και ως φυτοεξυγίανση, είναι μια φιλική προς το περιβάλλον, *in situ* μέθοδος που χρησιμοποιεί ορισμένα είδη φυτών για την εξάλειψη, τη σταθεροποίηση, τη μεταφορά και την αποικοδόμηση οργανικών και ανόργανων ρύπων. Συγκεκριμένα, αυτά τα φυτά διαθέτουν τη μοναδική ικανότητα να συσσωρεύουν ρύπους, κυρίως βαρέα μέταλλα, στις ρίζες, τους ιστούς και τα φύλλα



τους (Rascio & Navari-Izzo, 2011). Η τεχνολογία βασίζεται στη χρήση υπερσυσσωρευόμενων φυτών που μπορούν να εξάγουν ρύπους από μολυσμένα εδάφη.

Εικόνα 8. Φυτοαποκατάσταση των βαρέων μετάλλων από το έδαφος με την χρήση φυτών



### 2.1.3 Θερμικές μέθοδοι

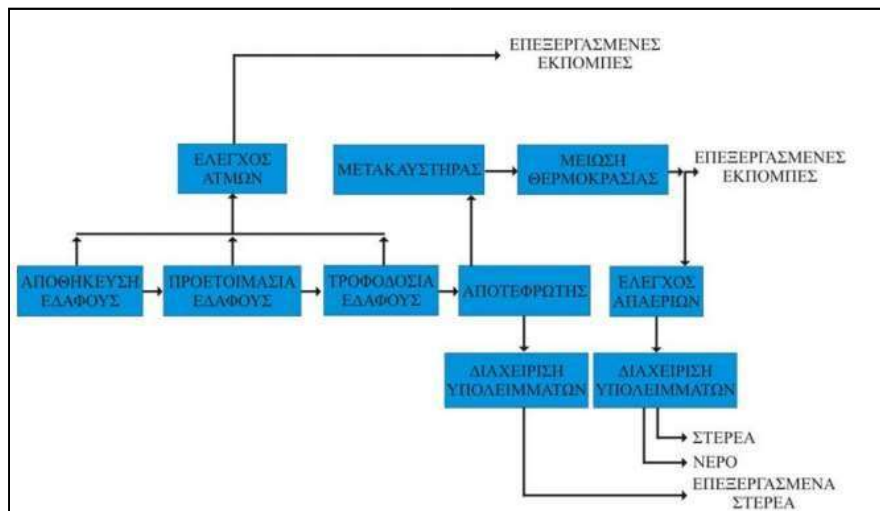
Οι θερμικές μέθοδοι, σχεδιασμένες για την εξάλειψη των ρύπων και τη μετατροπή τους σε υδρατμούς και διοξείδιο του άνθρακα, είναι γνωστές για την αποτελεσματικότητά τους στον διαχωρισμό των εν λόγω ρύπων από το έδαφος. Ωστόσο, λόγω του υψηλού κόστους και της δυνατότητας για εκτεταμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αυτές οι μέθοδοι δεν ευνοούνται ιδιαίτερα. Αξίζει, ωστόσο, να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία παίζει καθοριστικό ρόλο στον προσδιορισμό της αποτελεσματικότητας των θερμικών μεθόδων και των απαερίων που προκύπτουν. Οι θερμικές μέθοδοι ex-situ, οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως, περιγράφονται λεπτομερώς παρακάτω. Αν και είναι γενικά επιτυχής, η χρήση αυτών των μεθόδων θα πρέπει να εξετάζεται προσεκτικά κατά περίπτωση.

Επιτυγχάνοντας θερμοκρασίες έως 1200°C, η διαδικασία αποτέφρωσης παράγει υψηλή θερμότητα παρουσία οξυγόνου. Αυτό επιτρέπει στους οργανικούς ρύπους να εξατμιστούν, να αποσυντεθούν και ενδεχομένως να εξαλειφθούν. Ορισμένα συστήματα αποτέφρωσης διαθέτουν εντυπωσιακή απόδοση έως και 99,99%.

Για την αποσύνθεση και την εξάλειψη των οργανικών ρύπων, η αποτέφρωση περιλαμβάνει προετοιμασία του εδάφους, υψηλές θερμοκρασίες και επαρκή επίπεδα οξυγόνου. Αυτή η διαδικασία μετατρέπει αυτούς τους ρύπους σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό, αν και τα οξείδια του αζώτου και του θείου, το υδροχλώριο, η

αμμωνία και τα αλογονωμένα οξέα παράγονται επίσης ως υποπροϊόντα, όπως σημειώνουν οι Gidarakos et al. το 2009.

Εικόνα 9. Διάγραμμα ροής διαδικασίας αποτέφρωσης

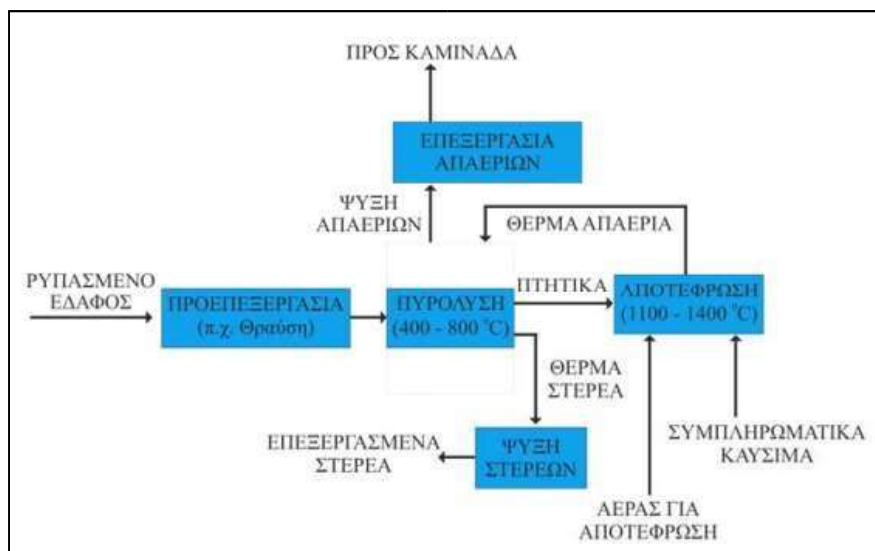


Οι ρύποι που αντιμετωπίζονται με επιτυχία μέσω της αποτέφρωσης, είναι κυρίως οργανικοί. Μεταξύ των βασικότερων εξ αυτών είναι οι παρακάτω:

- Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs)
- Φυτοφάρμακα
- Πτητικά και ημι-πτητικά οργανικά συστατικά (VOC - SVOC)
- Διοξίνες
- Πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs)
- Φαινόλες
- Χλωριωμένοι διαλύτες (TCE, PCE)

Η διαδικασία της πυρόλυσης περιλαμβάνει την θερμική αποδόμηση των οργανικών ρύπων, απουσία οξυγόνου και άλλων αντιδρώντων. Η διαδικασία της πυρόλυσης επιτυγχάνεται σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες (μεγαλύτερες των 430°C), ενώ τα τελικά προϊόντα της εν λόγω μεθόδου, περιλαμβάνουν καύσιμα αέρια συστατικά (CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> κ.α.), μικρές ποσότητες υγρών καθώς και στερεό υπόλειμμα, το οποίο περιέχει άνθρακα και τέφρα (Γιδαράκος, et al., 2009).

Εικόνα 1. Διάγραμμα ροής διαδικασίας πυρόλυσης

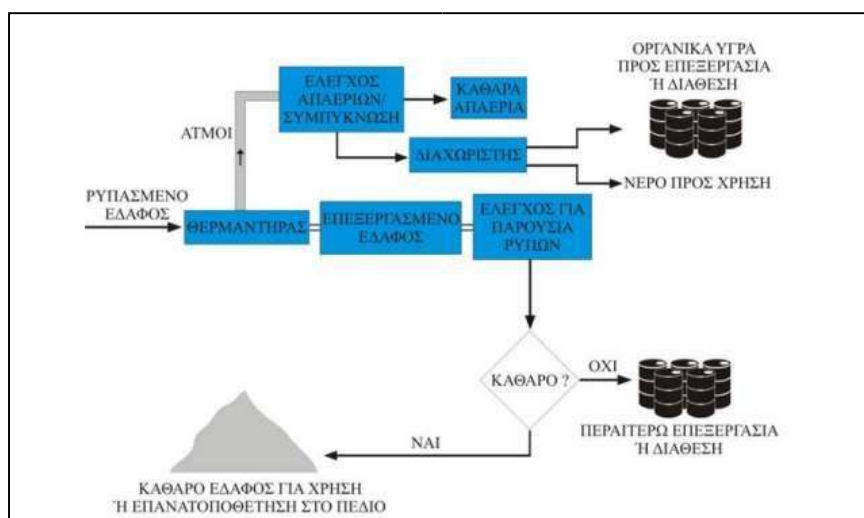


Οι ρύποι που αντιμετωπίζονται με την διαδικασία της πυρόλυσης, είναι οι εξής:

- Πτητικά και ημι-πτητικά οργανικά συστατικά (VOC – SVOC)
- Πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες
- Ζιζανιοκτόνα
- Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs)
- Πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs)

Η διαφορά της Θερμικής Εκρόφησης από τις άλλες δυο θερμικές μεθόδους είναι ότι η συγκεκριμένη μέθοδος στοχεύει στον φυσικό διαχωρισμό των ρύπων και όχι στην καταστροφή τους. Σε αυτή τη διαδικασία εντοπίζουμε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 250°C έως 650°C με στόχο την εξάτμιση των οργανικών ρύπων και του νερού και την μετέπειτα απομάκρυνση τους από το έδαφος. Σημαντικοί παράγοντες στη μέθοδο αυτή αποτελούν ο χρόνος παραμονής των ρύπων και η θερμοκρασία, τόσο για την επίτευξη της εξάτμισης όσο και για την αποφυγή της οξειδωσης των ρύπων (Γιδαράκος, et al., 2009).

Εικόνα 2. Διάγραμμα ροής διαδικασίας θερμικής εκρόφησης



Οι ρύποι, που δύναται να απομακρυνθούν με την μέθοδο της θερμικής εκρόφησης:

- Αλογονομένα και μη πτητικά και ημι-πτητικά οργανικά συστατικά
- Πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs)
- Ζιζανιοκτόνα
- Διοξίνες και Ουράνια
- Οργανικά κυανίδια
- Οργανικές διαβρωτικές ουσίες
- Πτητικά μέταλλα

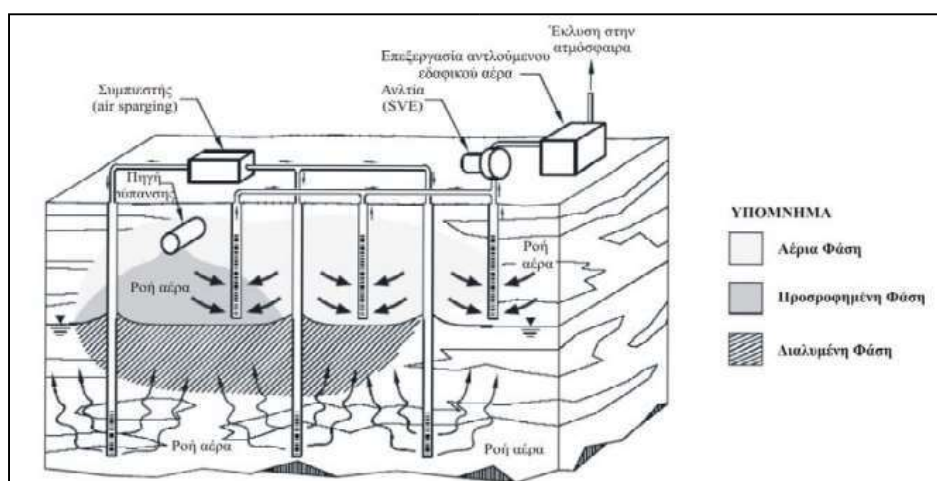
## 2.2 Μέθοδοι αποκατάστασης κορεσμένων εδαφών και υπογείων υδάτων

Παρόμοια με την αποκατάσταση ακόρεστων εδαφών, τα κριτήρια ταξινόμησης και κατηγοριοποίησης για τις μεθόδους αποκατάστασης κορεσμένων εδαφών παραμένουν τα ίδια. Οι τεχνολογίες αποκατάστασης για κορεσμένα εδάφη μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε in-situ είτε ex-situ. Οι μέθοδοι αποκατάστασης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον μηχανισμό που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση των ρύπων, όπως οι φυσικές μέθοδοι, οι χημικές και οι βιολογικές μέθοδοι. Οι μέθοδοι μπορούν επίσης να ταξινομηθούν ανάλογα με την επίδρασή τους στους ρύπους, που περιλαμβάνει την καταστροφή των ρύπων μέσω οξείδωσης, την απομάκρυνση μέσω της εμφύσησης αέρα και τη δέσμευση ή/και τον περιορισμό μέσω της προσρόφησης. Ακολουθούν οι πιο σημαντικές τεχνολογίες για την αποκατάσταση κορεσμένων εδαφών, ταξινομημένες με βάση την εφαρμογή τους. Πρώτον, παρατίθενται οι επιτόπιες μέθοδοι, όπως η εκτόξευση αέρα, τα διαπερατά εμπόδια και η

βιοπροσρόφηση, ακολουθούμενες από μεθόδους ex-situ, όπως η άντληση και η επεξεργασία, η εμφύσηση αέρα και η προηγμένη οξείδωση.

Η αποκατάσταση των υπόγειων υδάτων μέσω της μεθόδου αερισμού έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική. Αυτή η μέθοδος εισάγει αέρα στην κορεσμένη ζώνη του εδάφους, η οποία προκαλεί την εξάτμιση των ρύπων. Ωστόσο, σε ορισμένες καταστάσεις, η εξάτμιση των ρύπων επιταχύνεται τόσο που η τεχνολογία άντλησης αέρα του εδάφους είναι απαραίτητη για την απομάκρυνσή τους από την ακόρεστη ζώνη του εδάφους (Gidarakos, et al., 2009). Αυτή η τεχνική λειτουργεί διοχετεύοντας αέρα στην κορεσμένη ζώνη του εδάφους, όπου τα πτητικά εξατμίζονται και μεταφέρονται στην ακόρεστη ζώνη μαζί με φυσαλίδες αέρα. Ταυτόχρονα, η εισαγωγή αέρα αυξάνει την ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου στο υπέδαφος και ενισχύει τον ρυθμό οξείδωσης για τα βιοαποδομήσιμα στοιχεία.

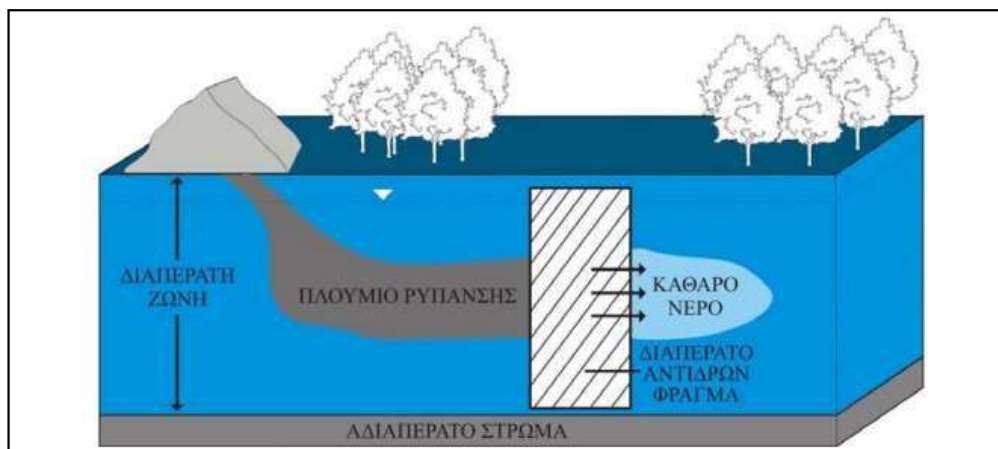
Εικόνα 3. Εφαρμογή τεχνολογίας air sparging και τεχνολογία άντλησης εδαφικού αέρα



Αυτή η τεχνολογία είναι πιο αποτελεσματική για την επεξεργασία ρύπων που είναι πτητικοί ή ημιπτητικές, με ελάχιστη τάση ατμών 0,5 mm Hg στους 20°C ή σταθερά του νόμου Henry που υπερβαίνει τις  $10^{-3}$  atm.  $\text{m}^3 / \text{mole}$ . Ωστόσο, με παραλλαγές κατά την εφαρμογή της μεθόδου, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση άλλων ρύπων.

Τα διαπερατά αντιδραστικά φράγματα σχεδιάζονται ως κατακόρυφες κατασκευές που περιέχουν αντιδραστικά υλικά. Αυτά τα φράγματα εγκαθίστανται κατάντη της πηγής ρύπανσης και επιτρέπουν στο νερό να περάσει μέσα από αυτό ενώ ταυτόχρονα παγιδεύουν, αλλοιώνουν και εξουδετερώνουν τους ρύπους, όπως σημειώνεται από τους Simon et al. το 2002.

Εικόνα 4. Αποκατάσταση υπογείων υδάτων με τη μέθοδο της χρήσης διαπερατών αντιδρώντων φραγμάτων



Η θεμελιώδης ιδέα αυτής της τεχνολογίας περιλαμβάνει τον καθαρισμό του υπόγειου νερού με παράλληλη διατήρηση της φυσικής ροής και του όγκου του, με ελάχιστες αλλοιώσεις. Η κατασκευή φραγμάτων δημιουργεί μια ζώνη επεξεργασίας στο έδαφος όπου αναπτύσσονται ευνοϊκές συνθήκες, προωθώντας την απομάκρυνση των ρύπων. Αυτή η ευέλικτη τεχνολογία προσφέρει μια πληθώρα διαδικασιών για την εξάλειψη διαφόρων οργανικών και ανόργανων ρύπων από τα υπόγεια ύδατα όπως περιγράφεται από τους Gidarakos, et al. (2009).

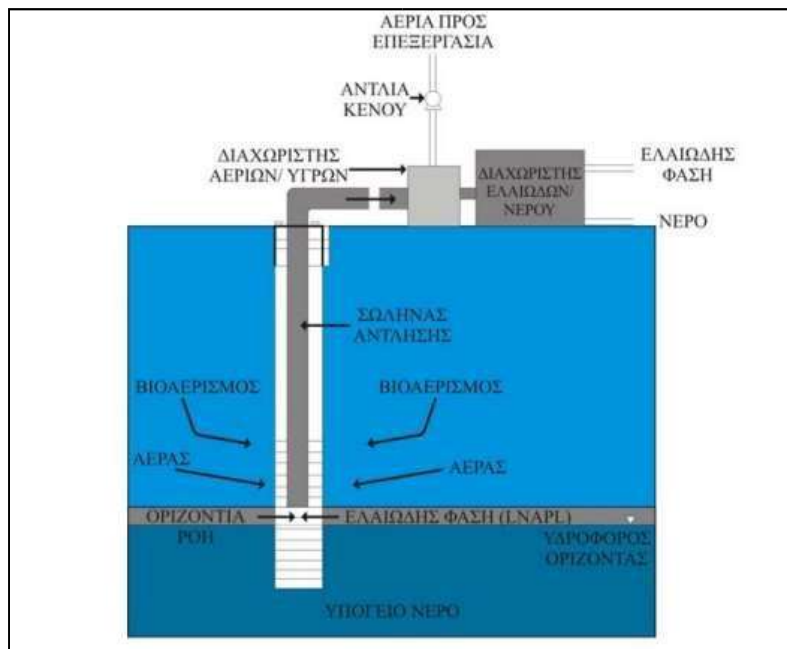
Οι τεχνολογίες Dual Phase Extraction, Multi Phase Extraction και Vacuum Enhanced Extraction χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία βιοαναρρόφησης για την αποκατάσταση του εδάφους και του υπεδάφους ταυτόχρονα. Αυτό γίνεται εφικτό με το συνδυασμό τριών διακριτών διεργασιών - άντλησης ελεύθερης φάσης υπό κενό, άντλησης αέρα εδάφους και βιοαερισμού - όπως τεκμηριώθηκε από τους Fomina & Gadd το 2014.

Η κεντρική ιδέα για αυτή τη μέθοδο είναι η εξαγωγή υδρογονανθράκων πετρελαίου που εναποτίθενται στον υδροφόρο ορίζοντα χωρίς να αντλούνται υπερβολικά υπόγεια ύδατα. Ειδικά σχεδιασμένες γεωτρήσεις με διάτρητα περιβλήματα χρησιμοποιούνται στο επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα όπου συγκεντρώνεται η ελαιώδης φάση, όπως περιγράφεται στην έρευνα του 2009 των Gidarakos et al.

Η συγκεκριμένη τεχνολογία στοχεύει σε ρύπους που έρχονται με τη μορφή ελαφρών υγρών μη υδατικής φάσης, όπως το ντίζελ. Αυτοί οι ρύποι τείνουν να δημιουργούν ένα ελαιώδες, ελεύθερο στρώμα μεταξύ των κορεσμένων και ακόρεστων περιοχών του

εδάφους. Επιπλέον, η μέθοδος είναι κάπως επιτυχημένη στην αντιμετώπιση οργανικών συστατικών που είναι πτητικά, ημι-πτητικά ή βιοαποδομήσιμα.

Εικόνα 5. Σύστημα βιοαναρρόφησης

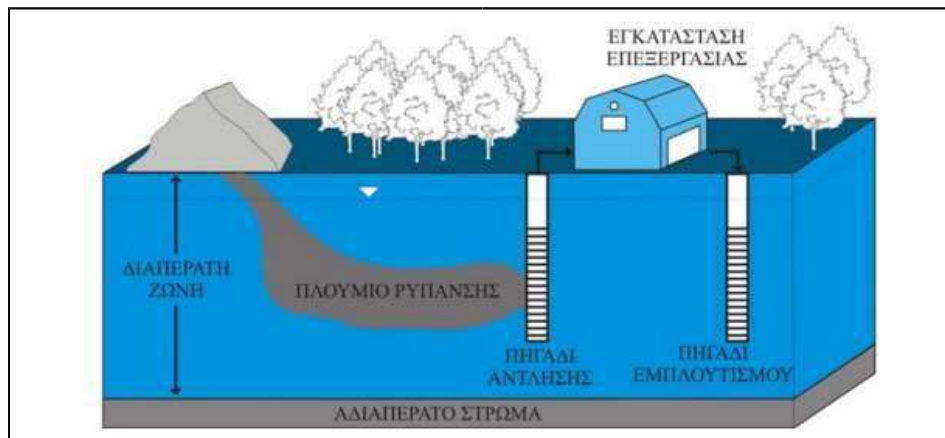


Η τεχνική της άντλησης και επεξεργασίας των υπόγειων υδάτων έχει χρησιμοποιηθεί εδώ και δεκαετίες για την αντιμετώπιση του ζητήματος του μολυσμένου εδάφους. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την άντληση των μολυσμένων υπόγειων υδάτων στην επιφάνεια μέσω φρεατίων, όπου υποβάλλονται σε επεξεργασία πριν επανεισαχθούν στο υπέδαφος ή στους δέκτες νερού. Οι Fomina και Gadd (2014) έχουν μελετήσει εκτενώς αυτή τη διαδικασία.

Η βασική αρχή της τεχνολογίας επικεντρώνεται στο σχεδιασμό και την εφαρμογή ενός συστήματος που περιορίζει αποτελεσματικά την εξάπλωση της ρύπανσης, ενώ ταυτόχρονα αποκαθιστά τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες αφαιρώντας τους ρύπους και μειώνοντας τις συγκεντρώσεις τους (Fomina & Gadd, 2014). Η ευελιξία της τεχνολογίας της επιτρέπει να αντιμετωπίζει μια σειρά από ρύπους, αλλά δίνεται προσεκτική προσοχή στη διαλυτότητά τους. Αυτό συμβαίνει γιατί το σύστημα άντλησης μεταφέρει ρύπους στην επιφάνεια και εάν είναι αδιάλυτοι στο νερό, καθιστά τη μέθοδο αδύναμη και αναποτελεσματική.



Εικόνα 6. Σύστημα άντλησης και επεξεργασίας υπογείων υδάτων





### **Κεφάλαιο 3: Φυτοαπορρύπανση**

Η πρακτική της χρήσης φυτών για τη θεραπεία των μολυσμένων εδαφών βασίζεται στην παρατήρηση ότι ορισμένα φυτά μπορούν να απορροφήσουν σημαντική ποσότητα ρύπων στους ιστούς τους. Αυτό παρατηρήθηκε αρχικά το 1855, όταν το φυτό *Viola Calaminaria*, που βρέθηκε σε περιοχές με ψευδάργυρο στην περιοχή του Άαχεν της Γερμανίας, παρατηρήθηκε ότι περιέχει υψηλά επίπεδα ψευδαργύρου στους ιστούς του (Reeves, 2006). Ομοίως, το *Thlaspi alpestre* αναφέρθηκε το 1865 ότι είχε συγκρίσιμη ικανότητα (Βουλγαρίδου, 2015), με 1,2% συγκέντρωση ψευδαργύρου στα φύλλα και 0,13% στις ρίζες. Μόνο το 1983 ο Chaney πρότεινε τη χρήση φυτών για την αποκατάσταση των μολυσμένων εδαφών.

Η επιλογή των κατάλληλων φυτικών ειδών που μπορούν να απομακρύνουν αποτελεσματικά συγκεκριμένους ρύπους είναι μια κρίσιμη πτυχή στη φυτοαποκατάσταση. Αυτή η φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία όχι μόνο αποδίδει αισθητικά ευχάριστα αποτελέσματα αλλά έχει επίσης αποδειχθεί επιτυχημένη σε πολλές περιπτώσεις. Η αποκατάσταση της βλάστησης σε μολυσμένα εδάφη μπορεί να επιτευχθεί είτε με επανασπορά είτε με μεταφύτευση φυτών. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου τα επίπεδα ρύπανσης είναι εξαιρετικά υψηλά, ειδικά σε εδάφη μολυσμένα με βαρέα μέταλλα, ο συνδυασμός φυτοαποκατάστασης με άλλες τεχνικές αποκατάστασης είναι απαραίτητος για καλύτερα και ταχύτερα αποτελέσματα. Επιπλέον, η ενσωμάτωση εδαφοβελτιωτικών είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της συνολικής αποτελεσματικότητας της μεθόδου ρύπανσης των φυτών (Βουλγαρίδου, 2015).

#### **3.1 Ορισμός της έννοιας της φυτοαπορρύπανσης**

Αρχικά, η φυτοαποκατάσταση συνδέθηκε αποκλειστικά με τη χρήση βλάστησης για την αντιμετώπιση της ρύπανσης στα εδάφη, τα ιζήματα και τα υδάτινα σώματα. Ωστόσο, σύντομα ανακαλύφθηκε ότι αυτή η μέθοδος ήταν ιδανική για ήπια μολυσμένες περιοχές με χαμηλά επίπεδα βαρέων μετάλλων. Η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και η δυνατότητά της να αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τα μολυσμένα εδάφη την κατέστησαν μια όλο και πιο ελπιδοφόρα και ελκυστική μέθοδο, όπως σημειώθηκε από τον Schoor το 1997.

Η αποκατάσταση των μολυσμένων εδαφών και υδάτων μέσω της χρήσης φυτών είναι γνωστή ως φυτοαποκατάσταση. Με την αλληλεπίδραση με ανόργανους και οργανικούς ρύπους, τα φυτά εργάζονται προς τον απώτερο στόχο της αποκατάστασης

των πληγεισών περιοχών (Landmeyer, 2012). Αυτή η τεχνική βασίζεται σε φυτά που είναι ικανά να απορροφούν υψηλά επίπεδα ρύπων, εξαλείφοντας έτσι αποτελεσματικά τη ρύπανση και καθιστώντας το περιβάλλον ασφαλές για τους οργανισμούς (Baker et al., 2000).

Η φυτοαποκατάσταση, όπως ορίζεται από την ΕΡΑ των ΗΠΑ, περιλαμβάνει τη χρήση φυτών για τον καθαρισμό του περιβάλλοντος με την εξάλειψη διαφόρων ρύπων όπως τα βαρέα μέταλλα, τα φυτοφάρμακα, τα εκρηκτικά και το πετρέλαιο. Το 2011, η αμερικανική υπηρεσία διεύρυνε αυτόν τον ορισμό για να συμπεριλάβει μικροοργανισμούς όπως βακτήρια και μύκητες που λειτουργούν παράλληλα με τα φυτά κατά τη διαδικασία αποκατάστασης. Σήμερα, η φυτοαποκατάσταση είναι μια από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές για τον καθαρισμό των μολυσμένων εδαφών από οργανικούς ρύπους. Επιπλέον, τα φυτά που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διαδικασία είναι γνωστά ως φυσικές, ηλιακές αντλίες, καθώς εξάγουν και εξαλείφουν τις βλαβερές ουσίες από το έδαφος. (Βουλγαρίδου, 2015)

### **3.2 Βασικές αρχές της φωτοαπορρύπανσης**

Η φυτοεξυγίανση είναι μια φιλική προς το περιβάλλον μέθοδος αποκατάστασης του εδάφους που περιλαμβάνει την αξιοποίηση φυτών για την απομάκρυνση, μεταφορά, σταθεροποίηση και καταστροφή οργανικών και ανόργανων ρύπων μέσα στο μολυσμένο έδαφος. Συγκεκριμένα, τα φυτικά είδη που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διαδικασία μπορούν να αναπτυχθούν σε μολυσμένο έδαφος και διαθέτουν τη μοναδική ικανότητα να συσσωρεύουν υψηλά επίπεδα βαρέων μετάλλων στους ιστούς τους, απολυμαίνοντας έτσι αποτελεσματικά το έδαφος. Αυτά τα αξιόλογα φυτά, γνωστά ως υπερσυσσωρευτές, απορροφούν ρύπους μέσω του ριζικού τους συστήματος και παίζουν καθοριστικό ρόλο στην απορρύπανση του εδάφους.

Ορισμένα είδη φυτών έχουν την αξιοσημείωτη ικανότητα να συγκεντρώνουν υψηλά επίπεδα ρύπων στους ιστούς τους, υπερβαίνοντας κατά πολύ τις απαιτήσεις ανάπτυξής τους. Αυτά τα φυτά, γνωστά ως υπερσυσσωρευτές, ανακαλύφθηκαν για πρώτη φορά σε περιοχές με σημαντική μεταλλευτική δραστηριότητα, όπως το Κονγκό και η Νέα Καληδονία. Ο όρος «υπερσυσσωρευτής» επινοήθηκε από τον Jaffre και την ομάδα του το 1976, αφού παρατήρησαν πώς το φυτό *Sebertia accuminata* συγκέντρωνε μεγάλες ποσότητες νικελίου (Ni) στους ιστούς του. Οι ερευνητές ανακάλυψαν έκτοτε ότι

ορισμένοι υπερσυσσωρευτές μπορούν να συγκεντρώσουν ρύπους σε πάνω από το 2% της ξηρής βιομάζας τους, όπως τονίστηκε από τους Baker et al. το 2000.

Εικόνα 7. Πρόσληψη νικελίου από φυτό μέσω του ριζικού συστήματος



Οι ερευνητές προτείνουν ότι τα φυτά μπορούν να ταξινομηθούν ως υπερσυσσωρευτές εάν η συγκέντρωση των μετάλλων στους ιστούς τους είναι μεγαλύτερη από 1.000 ppm, εκτός από τον ψευδάργυρο (10.000 ppm), τον χρυσό (1 ppm) και το κάδμιο (100 ppm) (Ιγνατιάδου, 2022). Γενικά, τα φυτά υπερσυσσωρευτών τείνουν να έχουν υψηλότερες συγκεντρώσεις ρύπων και μετάλλων στους ιστούς τους σε σύγκριση με το αντίστοιχο έδαφος και άλλα φυτά που αναπτύσσονται υπό κανονικές συνθήκες (Memon, et al., 2001). Ο παρακάτω πίνακας εμφανίζει πολλά είδη φυτών που παρουσιάζουν υπερσυσσώρευση μετάλλων. Αυτά τα είδη φυτών είναι ικανά να απορροφούν διάφορα βαρέα μέταλλα και το δυναμικό βιοσυσσώρευσής τους παρουσιάζεται επίσης στον παρακάτω πίνακα. (Lasat, 2000)

Εικόνα 8. Υπερσσωρευτές βαρέων μετάλλων

Είδος Φυτού	Μέταλλο	Περιεχόμενο στα Φύλλα (ppm)
<i>Thlaspi caerulescens</i>	Zn- Cd	36.900-1.800
<i>Ipomea alpina</i>	Cu	12.300
<i>Haumaniastrum robertii</i>	Co	10.200
<i>Astragalus racemosus</i>	Se	14.900

Sebertia acuminata	Ni	25% ξηρού βάρους
--------------------	----	------------------

Εκτός από την ικανότητα των φυτών να συγκεντρώνουν ρύπους στους ιστούς τους, υπάρχουν πρόσθετα κριτήρια για την ταξινόμηση ενός φυτού ως υπερσυσσωρευτή. Δύο από αυτούς τους παράγοντες είναι ο παράγοντας βιοσυσσώρευσης και ο παράγοντας μετατόπισης. Ο παράγοντας βιοσυσσώρευσης προσδιορίζεται συγκρίνοντας τη συγκέντρωση ενός ρύπου στους φυτικούς ιστούς με αυτή στο έδαφος, ενώ ο παράγοντας μετατόπισης είναι η αναλογία της συγκέντρωσης του ρύπου στους βλαστούς προς αυτή στις ρίζες. Ο συντελεστής βιοσυσσώρευσης στα κοινά φυτά είναι συνήθως χαμηλότερος από έναν για ρύπους όπως τα βαρέα μέταλλα και τα μεταλλοειδή. Αντίθετα, τα φυτά υπερσυσσωρευτών έχουν πάντα συντελεστή βιοσυσσώρευσης μεγαλύτερο από ένα και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει και το 50-100.

Ορισμένα είδη φυτών γνωστά ως μεταλλόφυτα μπορούν να αναπτυχθούν σε εδάφη με υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων. Αυτά τα φυτά μπορούν να αναγνωριστούν από τη συγκέντρωση μετάλλων στους βλαστούς τους, η οποία θα πρέπει να είναι 10 έως 500 φορές μεγαλύτερη από αυτή που θα είχαν σε μη μολυσμένα εδάφη. Τα μεταλλόφυτα συνήθως αναπτύσσονται σε περιοχές πλούσιες σε μέταλλα και απορροφούν μεγάλες ποσότητες μετάλλων μέσω του εκτεταμένου ριζικού τους συστήματος. Το *Thlaspi caerulescens* είναι ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα μεταλλόφυτου και υπερσυσσωρευτικού φυτού (Βουλγαρίδου, 2015).

Αρκετά είδη φυτών χρησιμεύουν ως υπερσυσσωρευτές στη φυτοαπορύπανση, συμπεριλαμβανομένων λεύκες, ηλίανθοι, τσουκνίδες, καλάμια και τριφύλλια. Οι λεύκες, ειδικότερα, έχει βρεθεί ότι είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές στην απορρύπανση του εδάφους από αρσενικό (As). Οι ηλίανθοι έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στο παρελθόν για τον καθαρισμό των επιφανειακών υδάτων από τη ραδιενέργεια στις περιοχές γύρω από το Τσερνόμπιλ, καθώς είναι εξαιρετικά αποτελεσματικοί από αυτή την άποψη (Sarma, 2011).

Εικόνα 9. *Helianthus annuus*



### 3.3 Μηχανισμοί φυτοαπορρύπανσης

Στην επιδίωξη του καθαρισμού των ρύπων από μολυσμένο έδαφος, η φυτοαπορύπανση βασίζεται σε μια σειρά μηχανισμών που έχουν τεθεί σε εφαρμογή από τα φυτά υπερσυσσωρευτών. Ακολουθούν ορισμένοι από αυτούς τους μηχανισμούς.

Η φυτοαποδόμηση περιλαμβάνει την απορρόφηση των ρύπων του εδάφους από τα φυτά, οι οποίοι στη συνέχεια υποβάλλονται σε επεξεργασία στη ρίζα, τον κορμό και τα φύλλα του φυτού. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τη μετατροπή των ρύπων σε αβλαβείς ουσίες μέσω μεταβολικών διεργασιών ή εξωτερικών ενζυματικών επιδράσεων, οι οποίες είτε απορροφώνται από το φυτό είτε αποδομούνται από μικροοργανισμούς του εδάφους. Διάφοροι παράγοντες όπως η συγκέντρωση ρύπων του εδάφους, η σύνθεση, τα είδη φυτών που υπάρχουν και τα χαρακτηριστικά του εδάφους υποστηρίζουν αυτή τη διαδικασία. Η πρόσληψη των ρύπων μέσω του ριζικού συστήματος του φυτού ακολουθείται από μια σειρά βιολογικών διεργασιών που βοηθούν στη διάσπαση των ρύπων και την απομάκρυνσή τους μέσω της φυτοεκχύλισης. Ενώ η φυτοαποικοδόμηση είναι πιο κατάλληλη για οργανικούς ρύπους, η διαδικασία είναι λιγότερο αποτελεσματική για τους ανόργανους. Τα φυτά λεύκας χρησιμοποιούνται συνήθως για τη βιοαποδόμηση των ρύπων, με το τριγλωροαιθυλένιο να μετατρέπεται σε απλούστερα μόρια μέσα στο έδαφος και το νερό του εδάφους.

Η ριζοαποικοδόμηση είναι μια διαδικασία που αξιοποιεί τα ριζικά συστήματα των φυτών και τους μικροοργανισμούς στο υπέδαφος για τη βελτίωση της βιοαποδόμησης. Οι μικροοργανισμοί, συμπεριλαμβανομένων των μυκήτων και των βακτηρίων, που υπάρχουν στο έδαφος γύρω από τις ρίζες διασπούν τους ρύπους στο έδαφος. Χρησιμοποιούν ρύπους ως θρεπτικό υπόστρωμα, καθώς και οξυγόνο και νερό που μεταφέρονται μέσω των ριζών. Το ριζικό σύστημα απελευθερώνει ουσίες όπως σάκχαρα, αλκοόλες και οξέα, που περιέχουν οργανικό άνθρακα και χρησιμεύουν ως τροφή για αυτούς τους μικροοργανισμούς. Αυτό οδηγεί στη δημιουργία μιας πυκνής ριζικής μάζας που απορροφά σημαντικές ποσότητες νερού. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται συνήθως για την αποκατάσταση εδαφών που έχουν μολυνθεί με οργανικούς ρύπους που δεν βρίσκονται βαθιά μέσα στο έδαφος.

Οι μηχανισμοί που περιορίζουν ή εξαλείφουν τους οργανικούς και ανόργανους ρύπους είναι γνωστοί ως μηχανισμοί συσσώρευσης. Αυτοί οι μηχανισμοί βοηθούν στη διατήρηση των ρύπων του εδάφους μέσα στο φυτό για βέλτιστη αποτελεσματικότητα. Σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν βαρέα μέταλλα, οι ρύποι μπορούν να συλλεχθούν, να ξηρανθούν και να εξευγενιστούν για την ανάκτησή τους - μια διαδικασία που συνήθως αναφέρεται ως φυτοεξόρυξη.

Η φυτοσυσσώρευση είναι μια διαδικασία κατά την οποία τα φυτά απορροφούν ρύπους από το έδαφος και τους αποθηκεύουν στις ρίζες, τον κορμό και τα φύλλα τους. Για να πετύχει αυτός ο μηχανισμός, τα φυτά πρέπει να διαθέτουν ορισμένα χαρακτηριστικά που τους επιτρέπουν να προσροφούν ρύπους μέσω των ριζών τους, να τους μεταφέρουν σε όλα τα συστήματά τους, να τους αποθηκεύουν και να αντιστέκονται στην τοξικότητά τους. Η αποτελεσματικότητα αυτής της διαδικασίας εξαρτάται από τη βιοδιαθεσιμότητα του ρύπου στη ριζόσφαιρα και την ικανότητα του φυτού να απορροφά και να αποθηκεύει ρύπους. Για να βοηθήσουν στη φυτοσυσσώρευση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν χημικές ενώσεις για να κινητοποιήσουν και να κάνουν τους ρύπους περισσότερο διαθέσιμους στο έδαφος, αποτρέποντας ταυτόχρονα την παγίδευση τους στα κυτταρικά τοιχώματα του φυτού. (Zotta, 2018)

Η ριζική διήθηση είναι μια διαδικασία που ενισχύει την απορρόφηση των ρύπων από το ριζικό σύστημα των φυτών. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την αντιμετώπιση της ρύπανσης των επιφανειακών υδάτων, καθώς και σε θερμοκήπια και περιοχές με χαμηλά επίπεδα ρύπανσης. Οι ρίζες των φυτών βυθίζονται σε ένα υδατικό

διάλυμα του ρύπου, επιτρέποντάς τους να τον προσροφήσουν. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί επιτόπου (in-situ) ή εξ αποστάσεως (ex-situ), με το τελευταίο να περιλαμβάνει άντληση και μεταφορά του μολυσμένου νερού σε τάφρους όπου φυτεύονται κατάλληλα φυτικά είδη όπως ηλίανθοι, μουστάρδα, υάκινθοι, καλαμπόκι, καλάμια, βούρλα, και ρύζι. Οι ρίζες αυτών των φυτών που αγαπούν το νερό συγκομίζονται και τα μέταλλα ανακτώνται. Τα μοσχεύματα των φυτών μπορούν να ξαναφυτευτούν μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας.

Η φυτοεξάτμιση είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει την απορρόφηση ρύπων από το έδαφος, τη μετατροπή τους σε πτητικές ενώσεις και στη συνέχεια την απελευθέρωσή τους στην ατμόσφαιρα μέσω των φύλλων των φυτών. Αυτή η τεχνική είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην επεξεργασία των υπόγειων υδάτων, των εδαφών και των ιζημάτων που έχουν μολυνθεί με πτητικά μέταλλα όπως ο υδράργυρος και το σελήνιο. Η μέθοδος έχει πολλά οφέλη, συμπεριλαμβανομένης της μετατροπής των τοξινών σε λιγότερο επιβλαβείς μορφές και την απουσία οποιασδήποτε ανάγκης συγκομιδής των φυτών. Ωστόσο, ένα μειονέκτημα είναι ότι οι ρύποι που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα μπορούν να επιστρέψουν στο έδαφος ή στο νερό σε πιο τοξικές μορφές, δημιουργώντας περαιτέρω ρύπανση. Για παράδειγμα, ο υδράργυρος μπορεί να μετατραπεί σε μεθυλϋδράργυρο όταν εναποτίθεται σε επιφανειακά ύδατα, ο οποίος είναι ακόμη πιο τοξικός. (Zotta, 2018).

Η φυτοσταθεροποίηση είναι μια τεχνική που σταθεροποιεί και ακινητοποιεί τους ρύπους του εδάφους. Η μέθοδος περιλαμβάνει την επιλογή φυτών υπερσυσσωρευτών που είναι αρχικά ανθεκτικά στους ρύπους και έχουν την ικανότητα να ακινητοποιούν τους ρύπους μέσω απορρόφησης/προσρόφησης, συσσώρευσης στο ριζικό τους σύστημα ή καθίζησης στη ριζόσφαιρα. Ένα από τα πλεονεκτήματα της φυτοσταθεροποίησης είναι ότι αποτρέπει τη μεταφορά ρύπων στους βλαστούς και στον υδροφόρο ορίζοντα, ενώ παράλληλα μειώνει τη διάβρωση του εδάφους και τη μεταφορά ρύπων σε άλλες περιοχές. Ωστόσο, η τεχνική έχει και τα μειονεκτήματά της, μεταξύ των οποίων το γεγονός ότι οι ρύποι παραμένουν στο έδαφος, καθιστώντας αναγκαία την προσθήκη εδαφοβελτιωτικών και λιπαντικών και συνεχή παρακολούθηση του εδάφους. Ωστόσο, η φυτοσταθεροποίηση είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική σε καταστάσεις όπου η απομάκρυνση των ρύπων είναι περιττή και έχει δείξει εξαιρετικά αποτελέσματα σε εδάφη μολυσμένα με βαρέα

μέταλλα όπως αρσενικό (As), μόλυβδος (Pb), χρώμιο (Cr), κάδμιο (Cd), χαλκό (Cu) και ψευδάργυρο (Zn).

Ο υδραυλικός έλεγχος είναι η τέχνη της ρύθμισης της ροής των υπόγειων υδάτων, που συνήθως επιτυγχάνεται με την πρόσληψη νερού από ένα φυτό. Ανάλογα με το είδος, την ηλικία και το μέγεθος του φυτού, αυτή η διαδικασία μπορεί να αποφέρει έως και 1350 λίτρα/ημέρα. Αυτή η τεχνική είναι πιο αποτελεσματική όταν οι υδροφόροι ορίζοντες είναι ρηχοί (Zotta, 2018). Τα δέντρα χρησιμοποιούνται συχνά για την εφαρμογή αυτής της τακτικής, καθώς διαθέτουν ένα πυκνό δίκτυο ριζών που καταναλώνουν τεράστιες ποσότητες υπόγειου νερού. Μέσω της διαδικασίας της διαπνοής, το μεγαλύτερο μέρος αυτού του νερού διαχέεται, το οποίο είναι ιδιαίτερα αυξημένο (Ατσαλάκης, 2014).



## **Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή φυτοαπορρύπανσης**

### **4.1 Κριτήρια επιλογής της φυτοαπορρύπανσης**

Για να επιτευχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα για μια δεδομένη περίπτωση, εφαρμόζεται κάθε φορά μια σχολαστική διαδικασία για τον προσδιορισμό της τεχνολογίας που ταιριάζει καλύτερα στον σκοπό. Η διαδικασία επιλογής λαμβάνει υπόψη διάφορους παράγοντες όπως το αναμενόμενο αποτέλεσμα, ο διαθέσιμος χρόνος, οι ρύποι, οι επιπτώσεις στο κόστος και άλλες σχετικές μεταβλητές που επηρεάζουν την απόδοση και τον αντίκτυπο της επιλεγμένης μεθόδου.

Με βάση τα λεγόμενα των Gidarakos et al. (2009), η διαδικασία για την επιλογή της βέλτιστης τεχνολογίας απορρύπανσης για τη διασφάλιση του μέγιστου καθαρισμού του εδάφους περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια αξιολόγησης:

Το πρώτο βήμα για την αντιμετώπιση της ρύπανσης είναι ο εντοπισμός του προβλήματος.

- Προσδιορισμός και χαρακτηρισμός του χωραφιού που έχει μολυνθεί
- Ανίχνευση και ταξινόμηση επιβλαβών ουσιών
- Θέσπιση νομοθετικών ορίων
- Προσδιορισμός των στόχων που πρέπει να επιτευχθούν. Αξιολόγηση εργασιακής απόδοσης

Το δεύτερο βήμα είναι η αξιολόγηση της μολυσμένης περιοχής.

- Αξιολόγηση των συνθηκών εφαρμογής της τεχνολογίας στο πεδίο
- Επιλογή της βέλτιστης μεθόδου φυτοαπορρύπανσης με βάση τα επιθυμητά αποτελέσματα
- Συγκέντρωση και συγχώνευση προσβάσιμων πληροφοριών τόσο για τη χρήση όσο και για την αποτελεσματικότητα της επιλεγμένης τεχνολογίας.
- Προσδιορισμός κατάλληλης υπερσυσσωρευτικής χλωρίδας

Το τρίτο βήμα αφορά τη συγκέντρωση προκαταρκτικής έρευνας και εξαγωγή συμπερασμάτων.

- Πραγματοποίηση εργαστηριακών δοκιμών και/ή έρευνας για την εξακρίβωση της αποτελεσματικότητας

- Πραγματοποίηση πιλοτικών δοκιμών στη στοχευμένη περιοχή για σκοπούς απολύμανσης.
- Εάν τα αποτελέσματα των προαναφερθέντων μελετών, πειραμάτων και δοκιμών υποδείξουν την ανάγκη, η τεχνική για την απολύμανση των φυτών θα αναθεωρηθεί.
- Εάν τα αποτελέσματα των προαναφερόμενων μελετών, πειραμάτων και δοκιμών το κρίνουν απαραίτητο, η επιλεγμένη μονάδα θα υποβληθεί σε αναθεώρηση.

Το τέταρτο βήμα περιλαμβάνει την ανάπτυξη της επιλεγμένης τεχνολογίας σε ολοκληρωμένο επίπεδο.

- Ανάπτυξη της τεχνολογικής διαδικασίας και συστήματος
- Ανάπτυξη της τεχνολογικής υποδομής
- Διαχείριση και λειτουργία της τεχνολογικής υποδομής
- Αξιολόγηση του τεχνολογικού συστήματος και εντοπισμός πιθανών διορθωτικών μέτρων
- Αξιολόγηση της τεχνολογικής αποτελεσματικότητας

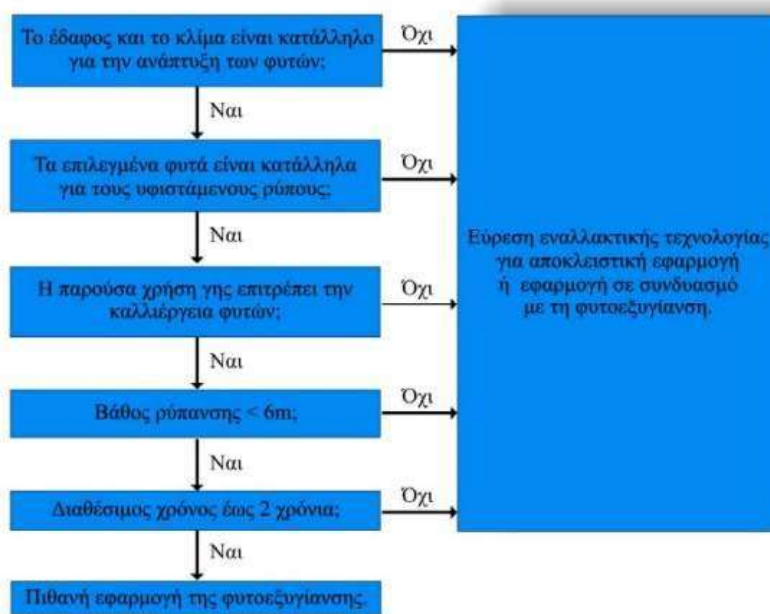
Τέλος, το πέμπτο βήμα αφορά την αξιολόγηση της επίτευξης των αρχικά καθορισμένων στόχων.

- Διενέργεια αριθμητικών αξιολογήσεων
- Έλεγχος των σημείων αναφοράς που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της συγκεκριμένης τεχνολογίας

Για να προσδιοριστεί εάν η φυτοαπορύπανση εφαρμόζεται σε μια μολυσμένη περιοχή, λαμβάνονται υπόψη συγκεκριμένα βήματα. Πρώτον, αξιολογείται η συμβατότητα του εδάφους με τα επιλεγμένα φυτά που λειτουργούν ως υπερσυσσωρευτές ρύπων παράλληλα με τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες. Στη συνέχεια, καθορίζεται εάν αυτά τα φυτά μπορούν να απορροφήσουν τους υπάρχοντες ρύπους. Εξετάζεται επίσης η καταλληλότητα της καλλιέργειας αυτών των φυτών στην περιοχή, παράλληλα με το βάθος ρύπανσης που δεν υπερβαίνει τα 6 μέτρα. Τέλος, καθοριστικός παράγοντας είναι και ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση αυτής της χρονοβόρας διαδικασίας, καθώς θα πρέπει να υπερβαίνει τα δύο χρόνια. Εάν πληρούνται όλα τα παραπάνω

κριτήρια, τότε η φυτοαπορύπανση μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά στη μολυσμένη τοποθεσία.

Εικόνα 10. Βήματα εξέτασης για την επιλογή της εφαρμογής της τεχνολογίας της φυτοαπορρύπανσης σε δεδομένο ρυπασμένο πεδίο



Για την περαιτέρω επεξεργασία των κριτηρίων που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου φυτοαπορύπανσης σε κάθε περίπτωση, οι ακόλουθες πτυχές απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή:

- Επιλογή του καταλληλότερου φυτού για ένα δεδομένο σενάριο

Το αποτέλεσμα της τεχνολογίας βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε ένα συγκεκριμένο κριτήριο που πρέπει να καθοριστεί λαμβάνοντας υπόψη τις ακόλουθες παραμέτρους (Wei, et al., 2021):

Κατά την επιλογή εγκαταστάσεων για την απολύμανση ενός μολυσμένου αγρού, η συμβατότητα με την περιοχή είναι ζωτικής σημασίας. Είναι επιτακτική η επιλογή φυτών που δεν διαταράσσουν το οικοσύστημα και μπορούν να ευδοκιμήσουν στο τοπικό έδαφος και κλίμα. Η διασφάλιση ότι τα επιλεγμένα φυτά είναι κατάλληλα για την περιοχή είναι απαραίτητη για την επίτευξη επιτυχούς απολύμανσης.

Πρέπει να ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά του επιλεγμένου φυτού, όπως το μέγεθος, ο βαθμός ανάπτυξης και η ικανότητα συσσώρευσης ρύπων. Είναι σημαντικό να προσδιορίσετε εάν το φυτό είναι υπερσυσσωρευτής ή όχι.

Κατά την επιλογή φυτών για σκοπούς αποκατάστασης, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά του εδάφους και η έκταση της ρύπανσης. Εάν η ρύπανση έχει εξαπλωθεί βαθιά στο έδαφος, καλό είναι να χρησιμοποιείτε φυτά με ισχυρό ριζικό σύστημα. Αντίθετα, εάν η ρύπανση περιορίζεται σε μικρό βάθος, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν φυτά με μικρότερα ριζικά συστήματα.

- Διενέργεια εργαστηριακών και πιλοτικών αξιολογήσεων και δοκιμών:

Για να διασφαλιστεί ότι τα φυτά που επιλέχθηκαν κατά την αρχική διαδικασία είναι κατάλληλα και ότι η τεχνολογία φυτοαποκατάστασης είναι αποτελεσματική, πρέπει να πραγματοποιηθούν εργαστηριακές και πιλοτικές δοκιμές. Αυτές οι δοκιμές καθορίζουν τις βέλτιστες συνθήκες για την εφαρμογή της μεθόδου και ζωτικής σημασίας παραμέτρους σχεδιασμού, όπως η απορροφούμενη ποσότητα ρύπων ανά φυτό και ο αριθμός των απαιτούμενων εγκαταστάσεων.

- Πυκνότητα φυτείας:

Η πυκνότητα στην οποία φυτεύονται τα φυτά κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επηρεάζει σημαντικά την απόδοση και το αποτέλεσμα τους. Τυπικά, τα πυκνά συσκευασμένα φυτά απορροφούν λιγότερους ρύπους ανά φυτό, αλλά αφαιρούν περισσότερους ρύπους ανά στρέμμα. Ωστόσο, η πυκνότητα φύτευσης επηρεάζει επίσης άλλους παράγοντες όπως η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος, η πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων, καθώς και η συνολική επιβίωση και ανάπτυξη. (Shah & Daverey, 2020)

- Υποχρεωτική τροφή των φυτών:

Η υγεία και η ανάπτυξη των φυτών εξαρτώνται από διάφορους κρίσιμους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της παροχής θρεπτικών ουσιών και της συντήρησης. Το άζωτο και ο φώσφορος είναι απαραίτητα θρεπτικά συστατικά που απαιτούνται για την ανάπτυξη των φυτών, αλλά η υπερβολική χρήση τους μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την επιτυχία της φυτοεξυγίανσης του εδάφους. Η έρευνα έχει δείξει ότι η αλόγιστη χρήση αυτών των θρεπτικών συστατικών μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγές στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του εδάφους, επηρεάζοντας τη συνολική

αποτελεσματικότητα των μεθόδων αποκατάστασης του εδάφους που βασίζονται σε φυτά (Shah & Daverey, 2020).

- Συντήρηση και άρδευση των φυτών.

Προκειμένου να ευδοκιμήσουν τα συστήματα φυτοαποκατάστασης, μια ακριβής και προσεκτική προσέγγιση στο πότισμα είναι ζωτικής σημασίας. Το παρεχόμενο νερό πρέπει να καλύπτει επαρκώς τις απαιτήσεις του εδάφους σε υγρασία, αντικαθιστώντας αυτό που χάνεται από την εξάτμιση και την αναπνοή. Ωστόσο, το υπερβολικό πότισμα μπορεί να εμποδίσει την ανάπτυξη των ριζών και να εμποδίσει την ανάπτυξη των φυτών, ενώ επίσης αυξάνει το κόστος και απειλεί την επιτυχία της διαδικασίας. Είναι επίσης σημαντικό να διατηρούνται τα φυτά μέσω πρακτικών όπως το κλάδεμα, η συγκομιδή και η προστασία τους από παράσιτα και ζιζάνια που θα μπορούσαν να εμποδίσουν την ανάπτυξη και τη συνολική τους απόδοση (Αντωνιάδης, et al., 2017).

- Αμειψισπορά:

Όταν χρησιμοποιείτε σύστημα απολύμανσης φυτών, η αμειψισπορά είναι απαραίτητη. Η παρατεταμένη καλλιέργεια ενός μοναδικού φυτού σε ένα συγκεκριμένο χωράφι μειώνει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου και την απόδοσή της. Αυτό οφείλεται στην ανοσία που αποκτούν τα παράσιτα και τα ζιζάνια στις ουσίες που χρησιμοποιούνται για την καταπολέμησή τους και στην εξάντληση των βασικών συστατικών του εδάφους που απαιτούνται για την ανάπτυξη των φυτών. Προκειμένου να αποφευχθούν αυτά τα ζητήματα και να βελτιωθούν οι τεχνολογικές επιδόσεις, πρέπει να εφαρμοστεί αμειψισπορά (Αντωνιάδης, et al., 2017).

- Χειρισμός και διάθεση παραγόμενων απορριμμάτων:

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκε ότι τα φυτά που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία φυτοαποκατάστασης γίνονται απόβλητα λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε ρύπους. Ως αποτέλεσμα, η συλλογή και η διαχείρισή τους είναι απαραίτητη. Η αποτέφρωση και η διάθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής επικίνδυνων αποβλήτων είναι δύο μέθοδοι διαχείρισης αυτών των αποβλήτων. Εναλλακτικά, τα μέταλλα που περιέχονται στα φυτά μπορούν να ανακτηθούν, αλλά μόνο αφού υποβληθούν σε κατάλληλη επεξεργασία, όπως συμβουλεύεται ο Antoniadis et al. το 2017.

Συνοψίζοντας, η παρακολούθηση των συστημάτων απορρύπανσης των φυτών περιλαμβάνει μια σειρά παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένης της ανάπτυξης των

φυτών, των χαρακτηριστικών του εδάφους, όπως η υγρασία και η θερμοκρασία, και των προς επεξεργασία ρύπων. Ο παρακάτω πίνακας επισημαίνει τις βασικές παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη κατά την εφαρμογή της τεχνολογίας ρύπανσης των φυτών, μαζί με το σκεπτικό για την παρακολούθησή τους. (Γιδαράκος κ.ά. 2009).

Εικόνα 11. Παράμετροι παρακολούθησης και αντίστοιχοι λόγοι

Παράμετρος	Λόγος παρακολούθησης
<b>Κλιματολογικά Δεδομένα</b>	
Θερμοκρασία	Ανάγκη συντήρησης (πότισμα)
Βροχόπτωση	
Σχετική υγρασία	
Ηλιοφάνεια	
Διεύθυνση και ένταση ανέμων	
<b>Φυτά</b>	
«Οπτικά» χαρακτηριστικά (ζωτικότητα, σημάδια υποανάπτυξης, ζημιές από έντομα ή ζώα, κα.)	Συντήρηση (αντικατάσταση φυτών, λίπανση, χρήση φυτοφαρμάκων, κτλ)
Σύσταση (ρίζες, φύλλα, κτλ.)	Ποσοτικοποίηση ρύπων και παραπροϊόντων τους
Αέρια αναπνοής	Ποσοτικοποίηση / πρόβλεψη λειτουργίας «συστήματος»
Ρυθμός αναπνοής	
Πυκνότητα ριζών	
<b>Έδαφος</b>	
Γεωχημικές παράμετροι (pH, θρεπτικά συστατικά, υγρασία, οξυγόνο, κα).	Βελτιστοποίηση ανάπτυξης φυτού και μικροβιακού φορτίου
Μικροβιακός πληθυσμός	Εκτίμηση ισοζυγίου νερού και ρυθμού εξατμισοδιαπνοής
Επίπεδα ρύπων και παραπροϊόντων τους	Ποσοτικοποίηση / πρόβλεψη λειτουργίας «συστήματος» Ποσοτικοποίηση ρύπων και παραπροϊόντων τους
<b>Υπόγειο Νερό</b>	
Χαρακτηριστικά υδροφορέα (διεύθυνση και ταχύτητα ροής, στάθμη Υ.Ο.)	Ποσοτικοποίηση ρύπων και παραπροϊόντων τους
Επίπεδα ρύπων και παραπροϊόντων τους	Ποσοτικοποίηση / πρόβλεψη λειτουργίας «συστήματος»

Η τελική απόφαση με το ποια μέθοδο φυτοαποκατάστασης δύναται να ακολουθηθεί βασίζεται σε ποικίλους παραγόντων και αποτελεί το σημαντικότερο κομμάτι για την αποφυγή λαθών που μπορεί να κοστίσουν σε χρόνο και χρήμα.

## 4.2 Χρόνος εφαρμογής της φυτοαπορρύπανσης

Η διαδικασία φυτοαπορρύπανση είναι γνωστό ότι είναι μια αργή μέθοδος, με ορισμένες περιπτώσεις να χρειάζονται έως και 15 χρόνια για να ολοκληρωθούν. Αν και αποτελεσματικό, το μειονέκτημά του έγκειται στη χρονοβόρα φύση του, καθώς η τεχνολογία αργεί να αποφέρει αποτελέσματα. Η διάρκεια της διαδικασίας εξαρτάται από τη συγκεκριμένη μολυσμένη τοποθεσία και επηρεάζεται σημαντικά από τις παραμέτρους που αναφέρονται στη μελέτη του Γιδαράκου και των συνεργατών του (2009):

- Η φύση και η ποσότητα της χρησιμοποιούμενης χλωρίδας
- Η φύση και η ποσότητα των ρύπων που απαιτούν αποκατάσταση.

- Το εύρος και το βάθος της μολυσμένης περιοχής.
- Τύπος εδάφους και φυσικοχημικές ιδιότητες
- Καιρικά μοτίβα που κυριαρχούν αυτή τη στιγμή

Η αποτελεσματικότητα της φυτοαπολύμανσης σχετίζεται άμεσα με τη διάρκεια εφαρμογής της, επομένως δεν αποτελεί αυτόνομη λύση για περιοχές υψηλού κινδύνου. Ως αποτέλεσμα, δεν μπορεί να θεωρηθεί ως μέθοδος προτεραιότητας (Ασπρογέρακας, 2020).

### **4.3 Συγκέντρωση των ρύπων**

Η μέθοδος φυτοαποκατάστασης είναι αποτελεσματική στην αντιμετώπιση περιοχών με χαμηλά έως μέτρια επίπεδα ρύπανσης. Ωστόσο, σε περιοχές με υψηλή ρύπανση, η χρήση φυτών ως υπερσυσσωρευτών παρουσιάζει δυσκολίες λόγω των τοξικών συνθηκών και των περιορισμένων ικανοτήτων απορρόφησης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός μεθόδων αποκατάστασης, όπου δίνεται προτεραιότητα στη σταθεροποίηση των ρύπων για την πρόληψη της εξάπλωσής τους πριν από την εφαρμογή φυτοαπορύπανσης. Σε καταστάσεις που περιλαμβάνουν έντονη ρύπανση με πολλαπλούς τύπους ρύπων στο έδαφος, ο ανταγωνισμός μεταξύ ιόντων μετάλλων και η ευαισθησία των φυτών σε συγκεκριμένα μέταλλα μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα. (Mijovilovich, et al., 2009) Το *Thlaspi caerulescens* είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα του προαναφερθέντος φαινομένου. Ενώ μπορεί να συσσωρεύσει αποτελεσματικά κάδμιο (Cd) και νικέλιο (Ni), είναι ευαίσθητο στον χαλκό (Cu) και επομένως ακατάλληλο για χρήση σε εδάφη με υψηλές συγκεντρώσεις χαλκού (Cu). Αυτό ανακαλύφθηκε από τους Mijovilovich et al. το 2009.

### **4.4 Κόστος εφαρμογής και λειτουργίας**

Η φυτοαποκατάσταση είναι μια εξαιρετικά οικονομική τεχνολογία αποκατάστασης εδάφους λόγω της απλοϊκής φύσης της. Χρησιμοποιώντας μόνο φυτά, μεθόδους άρδευσης και φροντίδας φυτών, ο εξοπλισμός που απαιτείται για τη φυτοαποκατάσταση είναι απίστευτα υποτυπώδης. Επιπλέον, η έλλειψη πολύπλοκων και ακριβών μηχανημάτων διατηρεί το λειτουργικό κόστος εντυπωσιακά χαμηλό. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα οικονομική όταν αντιμετωπίζουμε μεγάλους όγκους εδάφους ή νερού με χαμηλή έως μέτρια ρύπανση. Σε σύγκριση με άλλες τεχνικές φυτοαποκατάστασης, το κόστος για αυτή τη μέθοδο μπορεί να είναι έως και 100 φορές χαμηλότερο (Glass, 1999).

Σύμφωνα με τους Gidarakos et al. (2009), το κόστος που σχετίζεται με την εφαρμογή της προσέγγισης φυτοεξυγίανσης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στις ακόλουθες συνιστώσες δαπάνες:

- Έξοδα που σχετίζονται με το σχεδιασμό

Τα έξοδα που σχετίζονται με την έρευνα που απαιτούνται για την εξονυχιστική εξέταση των δεδομένων, την αξιολόγηση του πεδίου, τη διαμόρφωση σχεδίων δράσης και την εκτέλεση δοκιμών και εφαρμογών πεδίου, συνιστούν το κόστος.

- Έξοδα εγκατάστασης

Τα έξοδα που συνεπάγεται η προετοιμασία πεδίου για τη διευκόλυνση μιας διαδικασίας είναι σημαντικά. Η διαδικασία συνήθως περιλαμβάνει εργασίες προετοιμασίας του εδάφους, όπως φύτευση, ρύθμιση του εδάφους, άρδευση και αποστράγγιση, καθώς και την απαραίτητη εγκατάσταση περίφραξης. Επιπλέον, ενδέχεται να προκύψουν άλλα απρόβλεπτα έξοδα, όπως η άρση εμποδίων ή βάσεων, που πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη.

- Κόστος λειτουργιών

Τα έξοδα που προκύπτουν από τη συντήρηση των φυτών, συμπεριλαμβανομένου του ποτίσματος, των λιπασμάτων και των τοπικών παραγόντων και φυτοφαρμάκων, συμβάλλουν στο λειτουργικό κόστος. Επιπλέον, η διατήρηση της περιγραφής του αγρού και η παρακολούθηση της όλης διαδικασίας, συμπεριλαμβανομένων παραμέτρων όπως η συγκέντρωση θρεπτικών ουσιών, το pH και τα επίπεδα υγρασίας και η συγκέντρωση ρύπων, μαζί με τις καιρικές συνθήκες, αυξάνουν τα έξοδα υποδομής. Στο λειτουργικό κόστος περιλαμβάνεται και η μεταφυτευτική διαχείριση με στόχο την απομάκρυνση από το χωράφι.

#### **4.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα φυτοαπορρύπανσης**

Το κύριο πλεονέκτημα της φυτόαπορρύπανσης είναι ότι αποτελεί μία ‘πράσινη’ μέθοδος, καθώς συνεργεί με το περιβάλλον και δεν επεμβαίνει στους κανόνες της φύσης. Δημιουργεί ενδιαφέρον οπτικό αποτέλεσμα χωρίς τη χρήση ειδικού και κοστοβόρου εξοπλισμού. Σε σύγκριση με άλλα μέσα απορρύπανσης το συνολικό κόστος μίας τέτοιας επεμβάσης είναι σίγουρα χαμηλότερο και με βάση μελέτες μπορεί να αξιοποιηθεί για απορρύπανση μεγάλης ποικιλίας ρύπων. Η μέθοδος της φυτόαπορρύπανσης είναι διαδικασία που χρησιμοποιείται σε μεγάλες εκτάσεις



ρυπασμένων εδαφών, ενώ επίσης μεγάλο πλεονέκτημα αποτελεί ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί παράλληλα και με άλλες μεθόδους απορρύπανσης. Σαν μέθοδος αξίζει να υπογραμμιστεί ότι παράγει λιγότερα απόβλητα από άλλες τεχνικές απορρύπανσης.

Σημαντικό μειονέκτημα της φυτόαπορρύπανσης αποτελεί ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσεις σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο η αποκατάσταση του μολυσμένου εδάφους. Ο χρόνος αυτός μπορεί να διαρκέσει πολλά χρόνια. Επίσης το μικροκλίμα της περιοχής μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη χρήση φυτών σε μία τέτοια διαδικασία. Αναποτελεσματική μπορεί να είναι η μέθοδος σε εδάφη με υψηλά επίπεδα ρύπων, ενώ αν χρειαστεί περαιτέρω επεξεργασία, όπως απομάκρυνση των φυτών έπειτα την απορρύπανση, υπάρχει αύξηση του κόστους. Αρνητικό αποτελεί το γεγονός αν τα φυτά που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία φυτόαποκατάστασης αποτελούν τροφή για το ζωικό βασίλειο, διότι επικίνδυντοι ρύποι εισέρχονται στη τροφική αλυσίδα. Τέλος η διαδικασία της φυτόαποκατάστασης αποτελεί μία καινούργια μέθοδος απορρύπανσης και χρειάζεται έντονη και μακροχρόνια έρευνα για την βελτιστοποίηση της.

#### **4.6 Εφαρμογή φυτοαπορρύπανσης στην Ελλάδα**

Η Ελλάδα έχει 2000 τοποθεσίες που μαστίζονται από επικίνδυνες συνθήκες και ρύπανση, καθιστώντας τη φυτοαποκατάσταση ιδανική λύση (Ιγνατιάδου, 2022). Αυτές οι περιοχές, που βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση με βιομηχανικές και μεταλλουργικές εγκαταστάσεις και κοιτάσματα απορριμμάτων, υποφέρουν λόγω της ανεπαρκούς νομοθεσίας για την προστασία του περιβάλλοντος. Τα προβληματικά σημεία είναι διάσπαρτα σε όλη την Ελλάδα, όπως το Θριάσιο Πεδίο, τα Οινόφυτα, η Θεσσαλονίκη, η Καβάλα, ο Βόλος, τα ορυχεία της Κασσάνδρας και εγκαταλελειμμένα ορυχεία στη Θάσο, το Λαύριο και την Ερμιόνη (Ατσαλάκης, 2014). Το Λαύριο πλήττεται ιδιαίτερα παρά τη διακοπή των μεταλλουργικών δραστηριοτήτων, με υψηλά επίπεδα βαρέων μετάλλων να εξακολουθούν να υπάρχουν (Χαρβάλας, 2019). Η Κοζάνη, η Πτολεμαΐδα και το Στρατώνι στη Χαλκιδική είναι άλλες κακόφημες περιοχές που παλεύουν με σοβαρή ρύπανση μετάλλων λόγω εξόρυξης. Σε απάντηση, έχουν διεξαχθεί πολυάριθμα πειραματικά προγράμματα και πιλοτικές μελέτες σε αυτούς τους μολυσμένους τομείς για την εφαρμογή φυτοαποκατάστασης.

Μελέτη που έγινε το 2010 από την Καζάκου και τους συνεργάτες της διερεύνησε την απορρόφηση του νικελίου (Ni) από το *Alyssum lesbiacum* και το *Thlaspi ochroleucum*, σε μολυσμένες περιοχές της Λέσβου. Τα αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι και τα δύο

είδη φυτών έχουν υψηλό δυναμικό απορρόφησης, αλλά το *Alyssum lesbiacum* βρέθηκε πιο αποτελεσματικό από το *Thlaspi ochroleucum*, καθιστώντας το ιδιαίτερα κατάλληλο υποψήφιο για τη διαδικασία της φυτοεξαγωγής.

Μια μελέτη του 2010 εξέτασε την ικανότητα βιοσυσώρευσης των *Brassica napus*, *Zea mays*, *Medicago sativa*, *Hordeum vulgare* και *Triticum aestivum*. Εστιάζοντας στις δυνατότητές τους για φυτοαποκατάσταση, οι ερευνητές στόχευσαν να προσδιορίσουν εάν το μολυσμένο από λάσπη χώμα αστικών λυμάτων θα μπορούσε να αποκατασταθεί. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όλα τα φυτικά είδη ήταν ικανά στη βιοσυσώρευση βαρέων μετάλλων, καθιστώντας τα ιδανικά υποψήφια για φυτοεκχύλιση (Suchkova, et al., 2010).

Στη λεκάνη της ανατολικής Πτολεμαΐδας της Μακεδονίας, ένας από τους μεγαλύτερους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα της Ελλάδας, που βρίσκεται στον Άγιο Δημήτριο, μελετήθηκε για τις συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στο έδαφος και σε δείγματα φυτών. Η μελέτη, που διεξήχθη από τους Savvidis et al. το 2011, εξέτασαν τα καλλιεργούμενα φυτά *Zea mays* L. και *Brassica oleracea* var. *capitata* L., καθώς και μη καλλιεργούμενα φυτά *Verbascum phlomoides* L. και *Rumex acetosa* L. Τα αποτελέσματα έδειξαν υψηλές συγκεντρώσεις χρωμίου (Cr) τόσο στο έδαφος όσο και στα φυτά που περιβάλλουν το εργοστάσιο. Επιπλέον, οι ρίζες των φυτών είχαν υψηλότερη συγκέντρωση βαρέων μετάλλων σε σύγκριση με άλλα φυτικά όργανα. Η μελέτη πρότεινε ότι το *Brassica oleracea* var. *capitata* L. είχε τη δυνατότητα να αποκαταστήσει τα μολυσμένα με βαρέα μέταλλα εδάφη καθώς μπορούσε να αφαιρεθεί με τις ρίζες του από το μολυσμένο έδαφος.

Το 2014, μια μελέτη επιβεβαίωσε ότι το φυτό *Limoniastrum Monopetalum* αφαιρεί αποτελεσματικά τα βαρέα μέταλλα κάδμιο (Cd) και μόλυβδο (Pb) από μολυσμένο έδαφος (Manousaki, et al., 2014). Η μελέτη είχε στόχο να αξιολογήσει τις δυνατότητες του φυτού ως λύση στη ρύπανση του εδάφους. Διεξήχθησαν δύο πειράματα, καλλιεργώντας το *L. Monopetalum* σε δοχεία γεμάτα με μολυσμένο έδαφος με κάδμιο (Cd) και μόλυβδο (Pb), το ένα με άγρια και το άλλο με καλλωπιστικά φυτά. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το άγριο *L. Monopetalum* ήταν ένας πολλά υποσχόμενος υπερσυσσωρευτής για την αφαίρεση βαρέων μετάλλων, ενώ το καλλωπιστικό φυτό ήταν λιγότερο ανθεκτικό σε υψηλές συγκεντρώσεις καδμίου (Cd) και μολύβδου (Pb).

Αυτά τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι το *L. Monopetalum* θα μπορούσε να αξιοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές.

Μια πειραματική μελέτη που διεξήχθη το 2015 διερεύνησε την αποκατάσταση του εδάφους σε περιοχές μολυσμένες από βαρέα μέταλλα μέσω φυτοαποκατάστασης. Η έρευνα διεξήχθη σε δύο περιοχές της Ελλάδας, την Ολυμπιάδα και το Στρατώνι Χαλκιδικής. Το φυτό *Nerium oleander* χρησιμοποιήθηκε για την απορρύπανση των δύο περιοχών, δίνοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η φυτοαπορρύπανση μετά τη διαδικασία φυτοσταθεροποίησης ήταν εφικτή και αποτελεσματική και στις δύο τοποθεσίες. Επιπλέον, η έρευνα δείχνει ότι τα υποπροϊόντα της ηλεκτρολυτικής επεξεργασίας πυρόλυσης πλούσιου σε μαγγάνιο και οξείδια σιδήρου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία χημικής σταθεροποίησης, παράγοντας βιώσιμα αποτελέσματα βελτιώνοντας τις συνθήκες ανάπτυξης των φυτών. Το σκελετικό υλικό και ο φλοιός της ρίζας επηρέασαν επίσης θετικά την ανάπτυξη των φυτών, ενώ οι μύκητες έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην προαγωγή της. Η επιστροφή των βρύων μετά από δύο χρόνια μετά την αποκατάσταση χρησιμεύει ως σαφής ένδειξη της μεγάλης προόδου που έχει σημειωθεί στη βελτίωση των υφιστάμενων συνθηκών. Η έρευνα αποκαλύπτει επίσης ότι για να εξασφαλιστεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα στην αποκατάσταση των μολυσμένων εδαφών με τη χρήση της τεχνικής φυτοαποκατάστασης, είναι απαραίτητο να ακολουθηθούν ορισμένα βήματα. Αυτά περιλαμβάνουν την εξέταση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του μολυσμένου εδάφους, τη χρήση εδαφοβελτιωτικών, την επιλογή φυτών με αυξημένη ανοχή σε υψηλά επίπεδα βαρέων μετάλλων και την προσεκτική παρακολούθηση της μεθόδου, ιδιαίτερα κατά τα πρώτα τρία χρόνια εφαρμογής (Βουλγαρίδου, 2015).

Το 2015, διεξήχθη έρευνα με στόχο την αναζωογόνηση περιοχών που επηρεάζονται από τη διάθεση της λυματολάσπης, βελτιώνοντας ταυτόχρονα την ποιότητα της ιλύος. Η μελέτη εκτελέστηκε σε δύο φάσεις - εργαστηριακές (in-situ) και πιλοτικές (ex-situ) εφαρμογές. Κατά το αρχικό στάδιο, διεξήχθη ένα πείραμα 30 ημερών σε συνθήκες θερμοκηπίου για τη διερεύνηση της σκοπιμότητας χρήσης διαφόρων φυτικών ειδών που καλλιεργήθηκαν σε λάσπη από τη Μονάδα Επεξεργασίας Λυμάτων Θεσσαλονίκης. Τα αποτελέσματα του πειράματος ήταν συντριπτικά θετικά, με την ποιότητα της λάσπης σημαντικά βελτιωμένη, καλύτερες συνθήκες αερισμού και μειωμένα επίπεδα ιχνοστοιχείων, περίσσεια θρεπτικών ουσιών και αλάτων όπως P και

Na. Σύμφωνα με τη μελέτη, τα *Helianthus annuus* L. και *Zea mays* L. βρέθηκαν να είναι τα καταλληλότερα φυτικά είδη για την πιλοτική εφαρμογή. (Suchkova, et al, 2015)

Το 2016, πραγματοποιήθηκε μια ερευνητική μελέτη για την αξιολόγηση της πιθανής αποτελεσματικότητας του φυτού *Juncus Acutus* στη μείωση της συγκέντρωσης αντιβιοτικών και μετάλλων στα υγρά απόβλητα από βιομηχανίες και νοσοκομεία. Η μελέτη διεξήχθη υπό ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκηπίου και απέδωσε θετικά αποτελέσματα, σύμφωνα με τους Christofilopoulos et al. Το φυτό επέδειξε αξιοσημείωτη αποτελεσματικότητα αφαίρεσης διαφόρων αντιβιοτικών ουσιών όπως η σιπροφλοξασίνη, η σουλφαμεθοξαζόλη και η δισφαινόλη. Επιπλέον, υπό τις ίδιες συνθήκες, έδειξε πολλά υποσχόμενη αφαίρεση βαρέων μετάλλων όπως Cr, Cd, Ni και Zn σε διάστημα 28 ημερών. Η μελέτη αποκάλυψε ότι το φυτό *Juncus acutus* μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε εφαρμογές φυτοεξυγίανσης σε κατασκευασμένα συστήματα υδροτόπων για την επεξεργασία λυμάτων από αστικές, βιομηχανικές ή φαρμακευτικές πηγές. Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι το φυτό θα μπορούσε να είναι επιρρεπές σε βλάβες σε υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, παρόλο που δεν παρουσίαζε ισχυρή φυτοτοξικότητα.

Η περιοχή του Ασωπού, μια από τις πιο ευάλωτες περιοχές της Ελλάδας, επιλέχθηκε για το έργο LIFE, ένα ερευνητικό εγχείρημα με στόχο την αποκατάσταση του εδάφους και την προστασία των πηγών νερού. Κατά τη διάρκεια τεσσάρων ετών, πραγματοποιήθηκαν έντεκα διαφορετικές ενέργειες, με τεχνικές φυτοαποκατάστασης που παρουσιάζουν εξέχουσα θέση στα βήματα 8 και 9. Επιλέχθηκαν διάφορα είδη φυτών, συμπεριλαμβανομένων των *Juncus Acutus*, *Tamarix Gallica*, *Sarcocornia Parennis* και *Halimion Eportulacoides*, για την εξαγωγή βαρέων μετάλλων όπως ο χαλκός (Cu), νικέλιο (Ni) και κάδμιο (Cd). Η δράση 8, η οποία περιελάμβανε τη χρήση του *Tamarix Gallica* ως μέτρο ελέγχου και αφαίρεσης για το χρώμιο (Cr) και άλλα βαρέα μέταλλα, παρεμποδίστηκε από έντονες βροχοπτώσεις. Παρόλα αυτά, το έργο κρίθηκε επιτυχημένο και χρησιμοποιήθηκε συνολική χρηματοδότηση 2.708.267 €. Ως αντικατάσταση της Δράσης 8, εφαρμόστηκε η Δράση 8.2, η οποία διήρκεσε 2,5 χρόνια. Αυτή η νέα δράση είχε στόχο να επιδείξει τρόπους προστασίας των υπόγειων υδάτων και των καλλιεργειών από τη ρύπανση με Cr(VI) στο έδαφος και τις πηγές νερού που χρησιμοποιούνται για άρδευση. Το πείραμα επικεντρώθηκε σε μια περιοχή όπου καλλιεργούνταν τα καρότα, με στόχο την αξιολόγηση της πρόσληψης του Cr(VI) από

τα καρότα και των σχετικών κινδύνων για την ανθρώπινη υγεία κατά την κατανάλωση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι παρόλο που το Cr(VI) υπήρχε σε μεγάλες ποσότητες στα φύλλα και το εξωτερικό περίβλημα των καρότων, τα ενδοφυτικά βακτήρια το μετέτρεψαν αποτελεσματικά σε Cr(III), γεγονός που έκανε τα καρότα λιγότερο επικίνδυνα. Ταυτόχρονα, ξεκίνησε η Δράση 9, με στόχο τη διερεύνηση της σκοπιμότητας χρήσης τεχνικών φυτοεξαγωγής και φυτοσταθεροποίησης για την απομάκρυνση του χρωμίου από τα υπόγεια ύδατα. Το πιλοτικό σύστημα χρησιμοποίησε αλόφυτα, συμπεριλαμβανομένων των *Juncus acutus*, *Halimion portulacoides*, *Tamarix gallica* και *Sarcocornia perennis*. Τα ευρήματα αποκάλυψαν ότι το *Juncus acutus* ήταν το πιο αποτελεσματικό φυτό στην απομάκρυνση του Cr(VI), ακολουθούμενο από τα *Halimion portulacoides*, *Sarcocornia perennis* και *Tamarix gallica*, με ποσοστό απομάκρυνσης 50% κατά την πρώτη φάση του πειράματος (LIFE10 ENV/GR /000601, 2016).

Το 2017, μια ολοκληρωμένη έρευνα εξέτασε εδάφη πλούσια σε νικέλιο σε διάφορες περιοχές της Λέσβου, συμπεριλαμβανομένου του Αμπελικού, του Ολύμπου και των Λουτρών. Η μελέτη είχε στόχο να καθορίσει τον ιδανικό χρόνο για τη συγκομιδή του *Alyssum lesbiacum* για τη μεγιστοποίηση της φυτοεξαγωγής του νικελίου. Τα αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι το 3ο και το 4ο έτος του κύκλου ζωής του φυτού είχαν την υψηλότερη συγκέντρωση νικελίου, ενώ η μέγιστη φυτοεκχύλιση επιτεύχθηκε τον 3ο χρόνο, όπως αναφέρουν οι Αδαμίδης και συν. (2017).

Μια μελέτη του 2018 διερεύνησε εάν ένας χημικός παράγοντας, Na-EDTA σε επίπεδο συγκέντρωσης 0,01M, θα μπορούσε να διευκολύνει την απορρόφηση βαρέων μετάλλων όπως το αρσενικό (As), ο μόλυβδος (Pb) και ο ψευδάργυρος (Zn) από μολυσμένο έδαφος χρησιμοποιώντας το φυτό *Pteris vittata* (Καλύβας κ.ά., 2018). Η έρευνα διεξήχθη με τη συλλογή μολυσμένου εδάφους από τα ορυχεία Λαυρίου και την τοποθέτησή του σε ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες εντός θερμοκηπίου. Η περιοχή επιλέχθηκε λόγω της ρύπανσης από βαρέα μέταλλα, κυρίως από εξόρυξη. Τα ευρήματα ήταν αισιόδοξα, καθώς το Na<sup>2</sup>-EDTA 0,01M αύξησε σημαντικά την πρόσληψη As, Pb και Zn στο φυτό *Pteris vittata*. Σε συνδυασμό με την εφαρμογή EDTA, η χρήση λυμάτων ελαιοτριβείου κατά 15% βοήθησε περαιτέρω στην απορρόφηση των ρύπων από τα φυτά. Ωστόσο, η μελέτη υποδηλώνει ότι απαιτείται περισσότερη έρευνα, ιδίως όσον αφορά τη χρήση των λυμάτων του ελαιοτριβείου για την ενίσχυση της πρόσληψης ρύπων από το έδαφος. (Καλύβας κ.ά., 2018).

Μια μελέτη που διεξήχθη το 2019 εξέτασε τη δυνατότητα της ρίγανης (*Origanum Vulgare*) να απορροφά το εξασθενές χρώμιο Cr(VI) από το μολυσμένο έδαφος. Η ερευνητική ομάδα επέλεξε το συγκεκριμένο είδος φυτού λόγω της ανθεκτικότητας και της ευρείας εξάπλωσής του στις ελληνικές περιοχές. Συνέλεξαν δείγμα εδάφους από την Ευξυνούπολη, μια αμόλυντη περιοχή κοντά στην πόλη του Βόλου, και στη συνέχεια το εμβολίασαν με εξασθενές χρώμιο Cr(VI). Τα ευρήματα της έρευνας έδειξαν ότι η ρίγανη είναι αποτελεσματική στη μείωση του εξασθενούς χρωμίου Cr(VI) σε μολυσμένο έδαφος όταν η συγκέντρωσή της πέφτει μεταξύ 150-200 mg. (Levizou, et al, 2019).

Το 2020, οι ερευνητές διεξήγαγαν μια μελέτη για την απορρόφηση βαρέων μετάλλων από δασικά φυτικά είδη σε μεταλιγνιτικές περιοχές της Βόρειας Ελλάδας, με επίκεντρο την Πτολεμαΐδα, την Κοζάνη και το κάτω Γραμματικό (Samara, et al., 2020). Η μελέτη επικεντρώθηκε σε τέσσερα είδη με ποικίλη μορφολογία φύλλων - δύο κωνοφόρα (*Pinus nigra* Arn., *Cupressus arizonica* Greene) και δύο πλατύφυλλα (*Robinia pseudoacacia* L., *Populus nigra* L.). Τα βαρέα μέταλλα που μετρήθηκαν ήταν ο σίδηρος (Fe), ο χαλκός (Cu), το χρώμιο (Cr), το νικέλιο (Ni), το κάδμιο (Cd), το μαγγάνιο (Mn), ο ψευδάργυρος (Zn) και το κοβάλτιο (Co). Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντικές διαφορές στις συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων μεταξύ του κοιτάσματος λιγνίτη και των περιοχών ελέγχου, καθώς και μεταξύ των ειδών που μελετήθηκαν. Μεγαλύτερες συγκεντρώσεις μετάλλων παρατηρήθηκαν στο λιγνιτικό κοίτασμα, ωστόσο κανένα είδος δεν παρουσίασε μέγιστη απορρόφηση για όλα τα μέταλλα. Τα επίπεδα απορρόφησης των βαρέων μετάλλων εξετάστηκαν στη μελέτη, αποκαλύπτοντας ότι ο σίδηρος απορροφάται περισσότερο και το κοβάλτιο το λιγότερο (με φθίνουσα σειρά: σίδηρος (Fe) > ψευδάργυρος (Zn) > μαγγάνιο (Mn) > χαλκός (Cu) > χρώμιο (Cr) > νικέλιο (Ni) > κοβάλτιο (Co)). Τα συνολικά ευρήματα της έρευνας ήταν πολλά υποσχόμενα, υπογραμμίζοντας τη σημασία της επιλογής κατάλληλων ειδών δέντρων για την αποκατάσταση ενδιαιτημάτων σε περιοχές που έχουν μολυνθεί από βαρέα μέταλλα (Samara, et al, 2020).

Ο Charvalas και οι συνεργάτες του (2021) έχουν εντοπίσει μια αποτελεσματική προσέγγιση για την αποκατάσταση του μολυσμένου εδάφους από βαρέα μέταλλα: τη φυτοεξυγίανση. Για τη μελέτη αυτή επιλέχθηκαν δύο περιοχές της Ελλάδας, οι οποίες υπόκεινται σε εντατικές μεταλλουργικές δραστηριότητες και ρύπανση από βαρέα μέταλλα. Οι τοποθεσίες μελέτης, ο Άγιος Δημήτριος Κοζάνης και το Στρατώνι στη

Χαλκιδική, έχουν υψηλά επίπεδα χρωμίου (Cr), ψευδαργύρου (Zn), χαλκού (Cu), νικελίου (Ni), μολύβδου (Pb) και αργύρου (Ag) στο έδαφός τους, λόγω των δραστηριοτήτων εξόρυξης λιγνίτη και μετάλλων. Η μελέτη προσδιορίζει κατάλληλα φυτά, λαμβάνοντας υπόψη το περιφερειακό κλίμα, για χρήση ως υπερσυσσωρευτές βαρέων μετάλλων. Για το Στρατώνι προτείνονται τα *Populus tremula*, *Platanus orientalis*, *Quercus ilex*, *Pteris vittata* και *Pinus sylvestris*, ενώ για τον Άγιο Δημήτριο τα *Populus spp.* θεωρείται ο πιο αποτελεσματικός υπερσυσσωρευτής λόγω της υψηλής ικανότητας απορρόφησης μετάλλων.

Πολυάριθμες μελέτες έχουν επιβεβαιώσει ότι η μέθοδος απολύμανσης των φυτών είναι μια εξαιρετικά αποτελεσματική τεχνολογία για την επεξεργασία των μολυσμένων εδαφών. Αυτή η αναδυόμενη μέθοδος αποκατάστασης έχει εφαρμοστεί με επιτυχία τις τελευταίες δύο δεκαετίες, παράγοντας εξαιρετικά αποτελέσματα σε μια σειρά από μολυσμένα περιβάλλοντα. Η φυτοαποκατάσταση έχει γίνει ιδιαίτερα δημοφιλής λόγω της ικανότητάς της να συνδυάζεται άψογα με το φυσικό τοπίο, χωρίς να απαιτεί σημαντική δαπάνη ενέργειας ή πόρων. Αυτή η μέθοδος χρειάζεται επίσης ελάχιστο εξοπλισμό, καθώς τα φυτά και τα δέντρα αναπτύσσονται για τον έλεγχο της διάβρωσης, τον καλλωπισμό των τοποθεσιών, τη μείωση του θορύβου, τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και την αποκατάσταση του μολυσμένου εδάφους. Συνοπτικά, η φυτοεξυγίανση είναι μια ευέλικτη και φιλική προς το περιβάλλον λύση για τη ρύπανση του εδάφους (Νέστωρας, 2019).

## Συμπεράσματα

Η ρύπανση του εδάφους έχει γίνει ένα πιεστικό περιβαλλοντικό ζήτημα, που απαιτεί επείγουσα προσοχή. Η Ευρωπαϊκή Ένωση δαπανά ένα εκπληκτικό ποσό 17,3 δισεκατομμυρίων ευρώ ετησίως για την αποκατάσταση μολυσμένων περιοχών, υπογραμμίζοντας το μέγεθος του προβλήματος. Για να ξεπεραστεί αυτή η πρόκληση, ο κόσμος χρειάζεται καινοτόμες λύσεις όπως η φυτοεξυγίανση, μια οικονομικά αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία με τεράστιες δυνατότητες. Η μέθοδος ξεχωρίζει για την ικανότητά της να χειρίζεται μια ποικιλία ρύπων, να ανακτά μέταλλα και να επεξεργάζεται μεγάλες εκτάσεις γης. Αν και η αποτελεσματικότητά της σε εξαιρετικά μολυσμένες περιοχές είναι αμφισβητήσιμη και μπορεί να χρειαστεί πολύς χρόνος για να παραχθούν αποτελέσματα, τα πλεονεκτήματά της υπερτερούν των μειονεκτημάτων της. Δεν είναι περίεργο ότι οι επιστήμονες έχουν εκδηλώσει έντονο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της τεχνολογίας για τον μετριασμό των επιπτώσεων της ρύπανσης της γης.

Αυτή η τεχνολογία αιχμής βασίζεται στη χρήση φυτών με τη μοναδική ικανότητα να απορροφούν τους ρύπους και να τους βιοσυσσωρεύουν. Επιτυγχάνει την απορρύπανση του εδάφους μέσω μιας σειράς μηχανισμών και διαδικασιών. Τα φυτά υπερσυσσωρευτών απορροφούν πρώτα τους ρύπους του εδάφους μέσω του ριζικού τους συστήματος και στη συνέχεια τους διοχετεύουν στα φύλλα και τους μίσχους τους, καθαρίζοντας αποτελεσματικά το έδαφος. Στην Ελλάδα, η τεχνολογία έχει εφαρμοστεί πειραματικά με εξαιρετικά αποτελέσματα και υπόσχεται μεγάλες προσπάθειες καθαρισμού σε παγκόσμιο επίπεδο. Η φυτοεξυγίανση ήταν ιδιαίτερα επιτυχημένη σε ελληνικές περιοχές, όπως το Θριάσιο Πεδίο, η Θεσσαλονίκη, η Καβάλα, τα Οινόφυτα, ο Βόλος και τα ορυχεία στις περιοχές της Κασσάνδρας, της Θάσου, της Ερμιόνης και του Λαυρίου. Οι περιοχές αυτές έχουν υψηλά επίπεδα ρύπανσης, κυρίως λόγω της βιομηχανικής και μεταλλουργικής δραστηριότητας. Η τεχνολογία εφαρμόστηκε με θετικά αποτελέσματα και στο Στρατώνι Χαλκιδικής, στην Ολυμπιάδα, στην Κοζάνη και στην Πτολεμαΐδα, όπου τα μολυσμένα εδάφη και τα νερά θέτουν σημαντικές περιβαλλοντικές προκλήσεις. Συνολικά, η τεχνολογία απολύμανσης των φυτών είναι μια πολλά υποσχόμενη αναδυόμενη επιλογή που έχει αποδείξει την αποτελεσματικότητά της στην αποκατάσταση ενός ευρέος φάσματος μολυσμένων εδαφών και υδάτων. Η τεχνική φυτοαπορρόφησης υπόσχεται πολλά για χρήση με μη ανακαλυφθέντα φυτά που μπορεί να έχουν εξαιρετικές ικανότητες βιοαπορρόφησης.



Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν γενετικά τροποποιημένα φυτά για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου. Η τεχνική μπορεί επίσης να συνδυαστεί με άλλες μεθόδους αποκατάστασης, αποδίδοντας εξαιρετικά αποτελέσματα. Για περαιτέρω βελτίωση των δυνατοτήτων αυτής της τεχνολογίας, είναι ζωτικής σημασίας να επενδύσουμε στην έρευνα και να εξασφαλίσουμε χρηματοδότηση. Αυτή η τεχνολογία προσφέρει μια αποτελεσματική λύση για την αποκατάσταση του εδάφους, χρησιμοποιώντας φυτά που έχουν την ικανότητα να βιοσυσσωρεύουν ρύπους και προσφέρει προοπτικές ανάπτυξης στο φάσμα των ρύπων, των φυτών και των πεδίων εφαρμογής.

## Βιβλιογραφία

### Αγγλική Βιβλιογραφία

- Abdu, N., Abdullahi, A. A., & Abdulkadir, A. (2017). Heavy metals and soil microbes. *Environmental chemistry letters*, 15, σσ. 65-84.
- Abdul, K. S., Jayasinghe, S. S., Chandana, E. P., Jayasumana, C., & De Silva, P. M. (2015). Arsenic and human health effects: A review. *Environmental toxicology and pharmacology*, 40(3), σσ. 828-846.
- Adamidis, G. C., Aloupi, M., Mastoras, P., Papadaki, M.-L., & Dimitrakopoulos, P. G. (2017). Is annual or perennial harvesting more efficient in Ni phytoextraction? *Plant and Soil*, 418(1-2), σσ. 205-218.
- Adriano, D. C. (2001). *Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals*. New York: Springer-Verlag.
- Alharbi, O. M., Basheer, A. A., Khattab, R. A., & Ali, I. (2018). Health and environmental effects of persistent organic pollutants. *Journal of Molecular Liquids*, 263, σσ. 442-453.
- Alloway, B. J. (2013). Sources of heavy metals and metalloids in soils. *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability*, σσ. 11-50.
- Antoniadis, V., Levizou, E., Shaheen, S. M., Sik Ok, Y., Sebastian, A., Baum, C., . . . Rinklebe, J. (2017). Trace elements in the soil-plant interface: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation—A review. *Earth-Science Reviews*, 171, σσ. 621-645.
- Argiri, A., Ioannou, Z., Gavala, P. M., & Dimirkou, A. (2013). Phosphorus Removal from Aqueous Solutions and Greek Soils using Modified Natural Minerals and Its Impact on the Morphological Characteristics of Crops. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44(1-4), σσ. 551-565.
- Ariunbaatar, J., Panico, A., Esposito, G., Pirozzi, F., & Lens, P. N. (2014). Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste. *Applied energy*, 123, σσ. 143-156.
- Baker, A. J., McGrath, S. P., Reeves, R. D., & Smith, J. A. (2000). Metal hyperaccumulator plants: A review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. Στο N. Terry, & G. Banuelos, *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water* (σσ. 85-107). Boca Raton, FL: Lewis.
- Bell, M. R. (2014). Endocrine-disrupting actions of PCBs on brain development and social and reproductive behaviors. *Current Opinion in Pharmacology*, σσ. 134-144.

- Bilal, M., Shah, J. A., Ashfaq, T., Gardazi, S. M., Tahir, A. A., Pervez, A., . . . Mahmood, Q. (2013). Waste biomass adsorbents for copper removal from industrial wastewater—a review. *Journal of Hazardous Materials*, 263(2), σσ. 322-333.
- Brown, P. H. (2016). Nickel. Στο *Handbook of plant nutrition* (σσ. 411-426). CRC Press.
- Charvalas, G., Solomou, A. D., Giannoulis, K. D., Skoufogianni, E., Bartzialis, D., Emmanouil, C., & Danalatos, N. G. (2021). Determination of heavy metals in the territory of contaminated areas of Greece and their restoration through hyperaccumulators. *Environ Sci Pollut Res Int*, 28(4), σσ. 3858-3863.
- Christofilopoulos, S., Syranidou, E., Gkavrou, G., Manousaki, E., & Kalogerakis, N. (2016). The role of halophyte *Juncus acutus* L. in the remediation of mixed contamination in a hydroponic greenhouse experiment. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 91(6), σσ. 1665-1674.
- Cooper, C. B., & Alley, F. C. (2009). *Air Pollution Control: A Design Approach*.
- Cui, J., & Holden, N. M. (2015). The relationship between soil microbial activity and microbial biomass, soil structure and grassland management. *Soil and Tillage Research*, 146, σσ. 32-38.
- DesMarias, T. L., & Costa, M. (2019). Mechanisms of chromium-induced toxicity. *Current opinion in toxicology*, 14, σσ. 1-7.
- Domingo, J. L., & Bocio, A. (2007). Levels of PCDD/PCDFs and PCBs in edible marine species and human intake: a literature review. *Environment international*, 33(3), σσ. 397-405.
- Fomina, M., & Gadd, G. M. (2014). Biosorption: current perspectives on concept, definition and application. *Bioresource technology*, 160, σσ. 3-14.
- Gall, S., Müller, I., Walter, C., Seelig, H., Steenkamp, L., Pühse, U., . . . Gerber, M. (2017). Associations between selective attention and soil-transmitted helminth infections, socioeconomic status, and physical fitness in disadvantaged children in Port Elizabeth, South Africa: An observational study. *PLoS neglected tropical diseases*, 11(5).
- Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., & Catalano, A. (2020). The effects of cadmium toxicity. *International journal of environmental research and public health*, 17(11).
- Glass, D. (1999). *US and International Markets for Phytoremediation, 1999-2000*. Needham, MA: D. Glass Associates, Inc.
- Gong, Y., Zhao, D., & Wang, Q. (2018). An overview of field-scale studies on remediation of soil contaminated with heavy metals and metalloids: Technical progress over the last decade. *Water Research*, 147, σσ. 440-460.

- Heffer, P., & Prud'homme, M. (2013). Fertilizer outlook 2013–2017. *81st International Fertilizer Industry Association Conference* (σ. 8). Chicago, IL: Paper No.: A/13/78.
- Jaffre, T., Brooks, R. R., Lee, J., & Reeves, R. D. (1976). *Sebertia acuminata*: A nickel-accumulating plant from New Caledonia. *Science*, *193*, σσ. 579-580.
- Kalyvas, G., Tsitselis, G., Gasparatos, D., & Massas, I. (2018). Efficacy of EDTA and OliveMill Wastewater to Enhance As, Pb, and Zn Phytoextraction by *Pteris vittata* L. from a Soil Heavily Polluted by Mining Activities. *Sustainability*, *10*(6).
- Kazakou, E., Adamidis, G. C., Baker, A. J., Reeves, R. D., Godino, M., & Dimitrakopoulos, P. G. (2010). Species adaptation in serpentine soils in Lesbos Island (Greece): metal hyperaccumulation and tolerance. *Plant and Soil*, *332*(1-2), σσ. 369-385.
- Kim, K. H., Jahan, S. A., Kabir, E., & Brown, R. J. (2013). A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects. *Environment international*, *60*, σσ. 71-80.
- Kim, Y. A., Park, J. B., Woo, M. S., Lee, S. Y., Kim, H. Y., & Yoo, Y. H. (2019). Persistent Organic Pollutant-Mediated Insulin Resistance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(3).
- Landmeyer, J. E. (2012). *Introduction to Phytoremediation of Contaminated Groundwater: Historical Foundation, Hydrologic Control and Contaminant Remediation*. Netherlands: Springer.
- Lasat, M. M. (2000). *The Use of Plants for the Removal of Toxic Metals from Contaminated Soil*. American Association for the Advancement of Science, Environmental Science and Engineering Fellow.
- Law, R. J., Covaci, A., Harrad, S., Herzke, D., Abdallah, M. A.-E., Fernie, K., . . . Takigami, H. (2014). Levels and trends of PBDEs and HBCDs in the global environment: Status at the end of 2012. *Environment International*, *65*, σσ. 147-158.
- Levizou, E., Zanni, A. A., & Antoniadis, V. (2019). Varying concentrations of soil chromium(VI) for the exploration of tolerance thresholds and phytoremediation potential of the oregano (*Origanum vulgare*). *Environmental Science and Pollution Research*, *26*(1), σσ. 14-23.
- Linder, M. C. (2013). *Biochemistry of copper*. Springer Science & Business Media.
- Loréal, O., Cavey, T., Bardou-Jacquet, E., Guggenbuhl, P., Ropert, M., & Brissot, P. (2014). Iron, hepcidin, and the metal connection. *Frontiers in pharmacology*, *5*.
- Lucia, U., Simonetti, M., Chiesa, G., & Grisolia, G. (2017). Ground-source pump system for heating and cooling: Review and thermodynamic approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *70*, σσ. 867-874.

- Ma, L. Q., Komar, K. M., Tu, C., Zhang, W., Cai, Y., & Kenelly, E. D. (2001). A fern that hyper accumulates arsenic. *Nature*, 409, σσ. 579-582.
- Mahar, A., Wang, P., Ali, A., Awasthi, M. K., Lahori, A. H., Wang, Q., . . . Zhang, Z. (2016). Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 126, σσ. 111-121.
- Mahmood, I., Imadi, S. R., Shazadi, K., Gul, A., & Hakeem, K. (2016). Effects of pesticides on environment. *Plant, soil and microbes: volume 1: implications in crop science*, σσ. 253-269.
- Manousaki, E., Galanaki, K., Papadimitriou, L., & Kalogerakis, N. (2014). Metal Phytoremediation by the Halophyte *Limoniastrummonopetalum* (L.) Boiss: Two Contrasting Ecotypes. *International Journal of Phytoremediation*, 16(7-8), σσ. 755-769.
- Memon, A. R., Aktoprakligil, D., Ozdemir, A., & Vertii, A. (2001). Heavy metal accumulation and detoxification mechanism in plants. *Turk J. Bot.*, 25, σσ. 111-121.
- Mijovilovich, A., Leitenmaier, B., Meyer-Klaucke, W., Kroneck, P. M., Götz, B., & Küpper, H. (2009). Complexation and Toxicity of Copper in Higher Plants. II. Different Mechanisms for Copper versus Cadmium Detoxification in the Copper-Sensitive Cadmium/Zinc Hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* (Ganges Ecotype). *Plant Physiol*, 151(2), σσ. 715-731.
- Nadal, M., Marquès, M., Mari, M., & Domingo, J. L. (2015). Climate change and environmental concentrations of POPs: A review. *Environmental research*, 143, σσ. 177-185.
- Nas, F. S., & Ali, M. (2018). The effect of lead on plants in terms of growing and biochemical parameters: a review. *MOJ Ecol. Environ. Sci*, 3(4), σσ. 265-268.
- Płotka-Wasyłka, J., Szczepańska, N., de la Guardia, M., & Namieśnik, J. (2016). Modern trends in solid phase extraction: new sorbent media. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 77, σσ. 23-43.
- Rascio, N., & Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*, 180(2), σσ. 169-181.
- Reeves, R. D. (2006). Hyperaccumulation of trace elements by plants. Στο J. Morel, G. Echevarria, & N. Goncharova, *Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils* (σσ. 25-52). Netherlands: NATO Science Series.
- Rice, K. M., Walker, E. M., Wu, M., Gillette, C., & Blough, E. R. (2014). Environmental mercury and its toxic effects. *Journal of preventive medicine and public health*, 47(2).

- Roohani, N., Hurrell, R., Kelishadi, R., & Schulin, R. (2013). Zinc and its importance for human health: An integrative review. *Journal of research in medical sciences: the official journal of Isfahan University of Medical Sciences*, 18(2).
- Samara, T., Spanos, I., Platis, P., & Papachristou, T. G. (2020). Heavy metal retention by different forest species used for restoration of post-mining landscapes, N. Greece. *Sustainability*, 12(11).
- Sánchez, F., & Hartlieb, P. (2020). Innovation in the mining industry: Technological trends and a case study of the challenges of disruptive innovation. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37(5), σσ. 1385-1399.
- Sarma, H. (2011). Metal hyperaccumulation in plants: a review focusing on phytoremediation technology. *J. Environ. Sci. Technol.*, 4(2), σσ. 118-138.
- Savvidis, T., Metentzoglou, E., Mitrakas, M., & Vasara, E. (2011). A study of chromium, cooper, and lead distribution from lignite fuels using cultivated and non-cultivated plants as biological monitors. *Water, air, and soil pollution*, 220(1-4), σσ. 339-352.
- Schoor, J. L. (1997). *Phytoremediation: Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center Technology Evaluation Report TE-98-01*.
- Shah, V., & Daverey, A. (2020). Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. *Environmental Technology & Innovation*, 18.
- Simon, F. G., Meggyes, T., & McDonaft, C. (2002). *Advanced Groundwater Remediation - Active and Passive Technologies*. European Science Foundation, Thomas Telford Publications.
- Stegmann, R., Brunner, G., Calmano, W., & Matz, G. (2001). *Treatment of Contaminated Soil – Fundamentals, Analysis, Applications*. Springer.
- Suchkova, N., Alifragkis, D., Ganoulis, J., Darakas, E., Savvidis, T., & Stolberg, F. (2015). Reclamation with phytoremediation of area affected by sewage sludge at the Thessaloniki Wastewater Treatment Plant in Sindos (Greece). *Toxicological & Environmental Chemistry*, 97(1), σσ. 103-115.
- Suchkova, N., Darakas, E., & Ganoulis, J. (2010). Phytoremediation as a prospective methodfor rehabilitation of areas contaminated by long-term sewage sludge storage: A Ukrainian–Greek case study. *Ecological Engineering*, 36(4), σσ. 373-378.
- Suthersan, S. S. (1996). *Remediation Engineering: Design Concepts*. Lewis Publishers.
- Tangahu, B. V., 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*, 2011, σσ. 1-31.

- Terry, N., & Banuelos, G. S. (2020). *Phytoremediation of contaminated soil and water*. CRC press.
- Tóth, G., Hermann, T., Da Silva, M. R., & Montanarella, L. (2016). Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment International*, 88, σσ. 299-309.
- Tripathi, V., Edrisi, S. A., Chen, B., Gupta, V. K., Vilu, R., Gathergood, N., & Abdilash, P. C. (2017). Biotechnological Advances for Restoring Degraded Land for Sustainable Development. *Trends in Biotechnology*, 35(9), σσ. 847-859.
- Wang, Y., Ying, H., Yin, Y., Zheng, H., & Cui, Z. (2019). Estimating soil nitrate leaching of nitrogen fertilizer from global meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 657, σσ. 96-102.
- Wei, Z., Van Le, Q., Peng, W., Yang, Y., Yang, H., Gu, H., . . . Sonne, C. (2021). A review on phytoremediation of contaminants in air, water and soil. *Journal of Hazardous Materials*, 403.Φ
- Ye, S., Zeng, G., Wu, H., Zhang, C., Liang, J., Dai, J., . . . Cheng, M. (2017). Co-occurrence and interactions of pollutants, and their impacts on soil remediation—a review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 47(16), σσ. 1528-1553.
- Zhao, F. J., Lombi, E., & McGrath, S. P. (2003). Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant and Soil*, 249, σσ. 37-43.
- Ασπρογέρακας, Ν. (2020). *Αξιολόγηση τεχνικών φυτοαποκατάστασης στη διαχείριση γεωργικών αποβλήτων επιφορτισμένων με υπολείμματα γεωργικών φαρμάκων*. Πάτρα: Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας.
- Ατσαλάκης, Κ. (2014). *Φυτοεξυγίανση εδάφους από κάδμιο με χρήση του αλόφυτου *Crithmum Maritimum**. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Βουλγαρίδου, Ε. (2015). *Αποκατάσταση των λειτουργιών του εδάφους σε ρυπασμένες από βαρέα μέταλλα περιοχές*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης: Σχολή Γεωπονίας, Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος.
- Γεωργιάδης, Θ., Ζιώμας, Ι., Ιγνατιάδου, Α., Καλλέργης, Γ., Καμπεξίδης, Χ., Κομνίτσας, Κ., . . . Φερεντίνος, Γ. (2004). *Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Φυσικό Περιβάλλον και Ρύπανση, Τόμος Δ'. Διάθεση αποβλήτων και οι επιπτώσεις τους στο Περιβάλλον*.
- Γιδαράκος, Ε., & Αϊβαλιώτη, Μ. (2005). *Τεχνολογίες Αποκατάστασης Εδαφών και Υπογείων Υδάτων από Επικίνδυνους Ρύπους*. Ζυγός.
- Γιδαράκος, Ε., Αϊβαλιώτη, Μ., Γιαννής, Α., & Καλδέρης, Δ. (2009). *Μελέτη για τη διερεύνηση, αξιολόγηση και αποκατάσταση ανεξέλεγκτων ρυπασμένων χώρων / εγκαταστάσεων από βιομηχανικά και επικίνδυνα απόβλητα στην Ελλάδα*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος. Εργαστήριο

Διαχείρισης Τοξικών & Επικινδύνων Αποβλήτων. Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Περιβάλλον», ΕΠΠΕΡ.

- Ζώττα, Ε. (2018). *Συγκριτική Μελέτη Τεχνολογιών Φυτοεξυγίανσης Ρυπασμένων Εδαφών από Βαρέα Μέταλλα*. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- Ιγνατιάδου, Β. (2022). *Φυτοαπορρύπανση εδαφών: πρόσφατες εξελίξεις και προοπτικές εφαρμογής σε προβληματικά εδάφη στην Ελλάδα*. Θεσσαλονίκη: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- Καββάδας, Μ. (2007). *Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής*. Ε.Μ. Πολυτεχνείου.
- Νέστωρας, Ε. (2019). *Φυτοεξυγίανση: Μια αειφορική τεχνολογία αφαίρεσης περιβαλλοντικών ρυπαντών από το έδαφος και το νερό με τη χρήση φυτών. Η αποκατάσταση με φυτοεξυγίανση στην Ελλάδα*. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- Πρωτονοτάριος, Τ. Β. (2005). *Μελέτη των παραμέτρων ρύπανσης και αξιολόγηση μεθοδολογιών για την εξυγίανση των εδαφών*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο: Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Τομέας Χημικών Επιστημών, Σχολή Χημικών Μηχανικών.
- Φαραώνη, Ε. (2011). *Αποκατάσταση ρυπασμένων τοπίων με την μέθοδο της Φυτοεξυγίανσης*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Χαρβάλας, Γ. (2019). *Εξυγίανση ρυπασμένων εδαφών από αρσενικό (As) και μόλυβδο (Pb) με τη μέθοδο της φυτοσταθεροποίησης. Η περίπτωση του Λαυρίου*. Βόλος: Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης.