



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ
ΙΔΡΥΜΑ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
ΕΔΑΦΩΝ ΑΠΟ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ»



ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ
ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Γιαννάκης Ιωάννης

ΠΑΤΡΑ 2018

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας με αντικείμενο τις τεχνολογίες απορρύπανσης του υπεδάφους από βαρέα μέταλλα.

Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η μελέτη της ρύπανσης του εδάφους από βαρέα μέταλλα και η παρουσίαση και σύγκριση των τεχνολογιών απορρύπανσης και αποκατάστασης των ρυπασμένων εδαφών που χρησιμοποιούνται ευρέως έως σήμερα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστώ θερμά των επιβλέπων καθηγητή κ. Ιωάννη Γιαννάκη για την υπόδειξη του θέματος καθώς και την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή:

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής

ΔΙΟΝΥΣΗΣ ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΑΜ6334

.....
(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει σαν θέμα την μελέτη και την παρουσίαση των χρησιμοποιούμενων μεθόδων απορρύπανσης και αποκατάστασης ρυπασμένων νερών από βαρέα μέταλλα.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο μελέτης και της μεγάλης σημασίας της ανάπτυξης τεχνολογιών αποκατάστασης των εδαφών που έχουν υποστεί ρύπανση από βαρέα μέταλλα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην ρύπανση του εδάφους και των επιπτώσεων της ρύπανσης. Το τρίτο κεφαλαίο αναφέρεται στον υπό μελέτη ρύπο, που είναι τα βαρέα μέταλλα. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των βαρέων μετάλλων και της παρουσίας τους στο περιβάλλον.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται και μελετώνται για αποκατάσταση και απορρύπανση των εδαφών που έχουν ρυπανθεί από βαρέα μέταλλα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση της υπάρχουσας νομοθεσίας για την απορρύπανση του εδάφους και τέλος στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη αυτή.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: *Βαρέα μέταλλα, απορρύπανση εδάφους, αποκατάσταση υπεδάφους.*

ABSTRACT

The aim of this thesis was to study and present the methods which are commonly used for decontamination and remediation of polluted soils by heavy metals.

In the first chapter is making an introduction to the subject of this study and the great importance of the development of technologies for the restoration of soils contaminated by heavy metals.

In the second chapter, is made a reference to the soil pollution and the effects of pollution. The third chapter refers to the pollutants focus mostly on heavy metals. In this chapter, we analyze heavy metals and their presence in the environment.

The fourth chapter describes the methods used and studied for remediation and decontamination of soils contaminated by heavy metals.

The fifth chapter analyzes the existing legislation on soil decontamination and finally, the sixth chapter presents the conclusions drawn from this study.

KEY WORDS: *Heavy metals, soil decontamination, soil restoration.*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iv
ABSTRACT	v
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- ΡΥΠΑΝΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ	3
2.1 ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	3
2.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ	5
2.3 ΤΥΧΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΡΥΠΩΝ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ.....	7
2.4 ΡΥΠΟΙ	8
2.4.1 Οργανικοί ρύποι.....	8
2.4.2 Ανόργανοι ρύποι.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ	13
3.1 ΧΗΜΕΙΑ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ	15
3.2 ΠΗΓΕΣ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ	18
3.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΕΠΙΒΑΡΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4- ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ/ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ	23
4.1 ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	23
4.1.1 Ελεγχόμενη βιοεξυγίανση.....	24
4.1.2 Βιοαερισμός	25
4.1.3 Φυτοεξυγίανση	27
4.1.4 Επεξεργασία σε σωρούς	33
4.1.5 Βιοαντιδραστήρες	34
4.2 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	36
4.2.1 Μέθοδος άντλησης εδαφικού αέρα.....	36
4.2.2 Μέθοδος έκπλυσης εδάφους.....	39
4.2.3 Μέθοδος ηλεκτροκινητικής απορρύπανσης	41
4.2.4 Μέθοδος διαπερατών αντιδρώντων φραγμάτων.....	44
4.2.5 Μέθοδος πλύσης εδάφους.....	44
4.2.6 Μέθοδος σταθεροποίησης - λιθοποίησης	46

4.2.7 Μέθοδος Οξειδοαναγωγής.....	52
4.3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ	53
4.3.1 Υαλοποίηση	53
4.3.2 Θέρμανση με ηλεκτρική αντίσταση.....	56
4.3.3 Πυρόλυση	57
4.3.4 Αποτέφρωση ή καύση.....	58
4.3.5 Έγχυση ατμού και άντληση	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5- ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ.....	61
5.1 Η ΕΘΝΙΚΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΠΕΡΙ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	65
5.2 Η ΕΘΝΙΚΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ – ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΥΠΑΣΜΕΝΩΝ ΧΩΡΩΝ	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	69
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	70

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

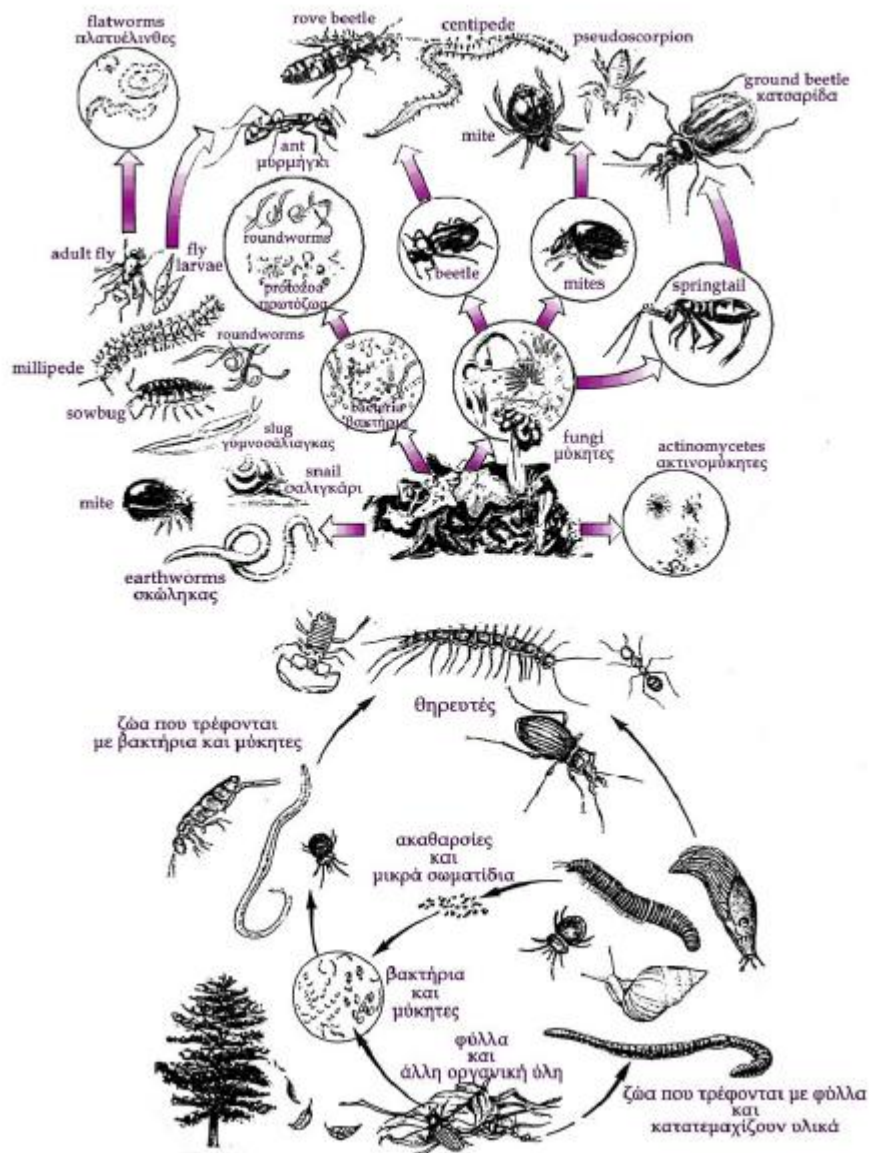
Ως έδαφος ορίζεται η επιφάνεια του φλοιού της γης στην οποία είναι δυνατή η ανάπτυξη ζωής. Είναι ένας από τους πιο σημαντικούς πεπερασμένους φυσικούς πόρους της γης και παίζει σημαντικό ρόλο στην ομαλή λειτουργία του περιβάλλοντος. Το έδαφος είναι τόσο σημαντικό για το περιβάλλον όσο η ατμόσφαιρα και το νερό, αλλά και για την ανθρώπινη κοινωνία. Παρόλα αυτά οι μελέτες που πραγματοποιούνται για την προστασία των πόρων αυτών αφορούν περισσότερο την ατμόσφαιρα και τα νερά (υπόγεια, επιφανειακά, θαλασσινό) παρά το έδαφος. Οι λόγοι οι οποίοι καθορίζουν το έδαφος και την προστασία ως ένα σημαντικό πόρο είναι στο ότι αποτελεί τη βάση για το 90 % των ανθρώπινων τροφίμων, των ζωοτροφών, των ινών και των καυσίμων, στηρίζει τους ανθρώπινους οικισμούς και συντελεί στο καθαρισμό των υπόγειων υδάτων και του αέρα (Τζόβολου, 2011; E.E., 2012; E.C., 2007). Ένας επιπλέον σημαντικός λόγος που οι μελέτες οφείλουν να στραφούν στην προστασία του εδάφους είναι ότι αποτελεί μία τεράστια φυσική δεξαμενή άνθρακα και λόγω της κλιματικής αλλαγής συτό τον κάνει ένα αρκετό σημαντικό πόρο. Το 20% του εκπεμπόμενου CO₂ από τις ανθρώπινες δραστηριότητες δεσμεύεται στο έδαφος. Συγκριτικά με την ατμόσφαιρα και τους ζωντανούς οργανισμούς που περιέχουν 760 και 560 τόνους οργανικού άνθρακα, στο έδαφος εκτιμάται πως 1550 δισεκατομμύρια τόνοι (<http://www.eea.europa.eu/el/articles/edafos>).

Για την διατήρηση και την βελτίωση των χαρακτηριστικών του εδάφους κρίνεται απαραίτητη η θεσμοθέτηση ενός νομικού πλαισίου. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η αναζήτηση και ο προσδιορισμός των αιτιών που προκαλούν και συντελούν στην επιβάρυνση της ομαλή λειτουργίας του εδαφικού συστήματος. Το νομικό πλαίσιο χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση της έλλειψης της κοινής πολιτικής για την προστασία και απορρύπανση του εδάφους προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια προσπάθεια προσδιορισμού των προβλημάτων αντιμετώπισης των μεθόδων απορρύπανσης του εδάφους,

Το έδαφος είναι ένας από τους πιο σημαντικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες για τα οικοσυστήματα καθώς αποτελεί ενδιαίτημα για χιλιάδες οργανισμούς. Συγκεκριμένα, αναφέρεται σε μελέτες ότι πάνω από 5 τόννοι πανίδας ζουν σε μόλις ένα εκτάριο εδάφους. Είναι ένα στοιχείο το οποίο είναι περίπλοκο και μεταβλητό καθώς στην Ευρώπη μόνο έχουν προσδιοριστεί περισσότερες από 320 βασικές κατηγορίες εδάφους, όπου η κάθε κατηγορία αποτελείται από ένα τεράστιο αριθμό παραλλαγών από πλευράς φυσικοχημικών και βιολογικών χαρακτηριστικών. Επίσημα έχουν αναγνωριστεί περισσότεροι από 10.000 διαφορετικοί τύποι εδάφους στην Ευρώπη (E.C., 2007). Οι λειτουργίες του εδάφους και των οικοσυστημάτων του εξαρτώνται από τη δομή του όπου τυχόν μεταβολές στην δομής του μπορεί να επιφέρουν αρνητικές επιπτώσεις (EEK, 2006). Αποτελεί έναν περιορισμένο μη ανανεώσιμος φυσικός πόρος με αποτέλεσμα να κάνει ακόμα πιο σημαντική την προστασία του και τη διαχείριση του στα πλαίσια της αειφορίας. Συγκεκριμένα για τη δημιουργία 2 cm επιφανειακού εδάφους απαιτούνται τουλάχιστον 500 χρόνια φυσικών διεργασιών (<http://www.eea.europa.eu/el/articles/edafos>).

Η συνήθης πρακτική απόρριψης απορριμμάτων αλλά και λυμάτων κατά το παρελθόν από τις διάφορες βιομηχανίες και άλλες εμπορικών δραστηριοτήτων, ήταν σε

αυτοσχέδιους χώρους εντός των χώρων όπου αυτές δραστηριοποιούνταν. Οι χώροι αυτοί απόθεσης απείχαν σημαντικά από τα σημερινά πρότυπα περιβαλλοντικής διαχείρισης. Αυτή η πρακτική είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των πιθανά ρυπασμένων τοποθεσιών, όπου σύμφωνα με την Ε.Ε των 39 να προσεγγίζει τις 2,5 εκατομμύρια τοποθεσίες κι από αυτές μόλις το 45 % έχει ερευνηθεί. Επίσης περίπου μισό εκατομμύριο από αυτές τις τοποθεσίες παρουσιάζουν φαινόμενα ρύπανσης και χρήζουν άμεσης αντιμετώπισης και μόλις στο 1/3 αυτών έχουν εκτελεστεί εργασίες αποκατάστασής τους (ΕΕΑ, 2014). Στις Η.Π.Α. υπολογίζονται περίπου 300.000 με 400.000 ρυπασμένες τοποθεσίες που αποτελούν είτε κυβερνητικές είτε ιδιωτικές εκμεταλλεύσεις με το ολικό κόστος απορρύπανσής τους αν εκτιμάται στα 500 δισεκατομμύρια μέχρι 1 τρισεκατομμύριο δολάρια. Το πρόβλημα βέβαια δεν είναι μόνο η εξασφάλιση των απαιτούμενων οικονομικών πόρων καθώς, ακόμα και αν ήταν δυνατή η διάθεση του ποσού, δεν υπάρχουν εγγυήσεις πως οι υπάρχουσες τεχνολογίες θα μπορέσουν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των αρμόδιων αρχών.



Εικόνα 1.1: Απεικόνιση βιοποικιλότητας και τροφικών αλυσίδων στο έδαφος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- ΡΥΠΑΝΣΗ ΕΛΑΦΟΥΣ

Με τον όρο ρύπανση περιγράφονται οι συνέπειες των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, άμεση ή έμμεση εισαγωγή, στον αέρα, το νερό ή το έδαφος, ουσιών ή θερμότητας που μπορούν να είναι επιζήμια την υγεία του ανθρώπου ή για την ποιότητα των υδατικών οικοσυστημάτων ή των χερσαίων οικοσυστημάτων που εξαρτώνται άμεσα από υδατικά οικοσυστήματα, συντελούν στη φθορά υλικής ιδιοκτησίας, ή επηρεάζουν δυσμενώς ή παρεμβαίνουν σε λειτουργίες αναψυχής ή σε λοιπές νόμιμες χρήσεις του περιβάλλοντος.

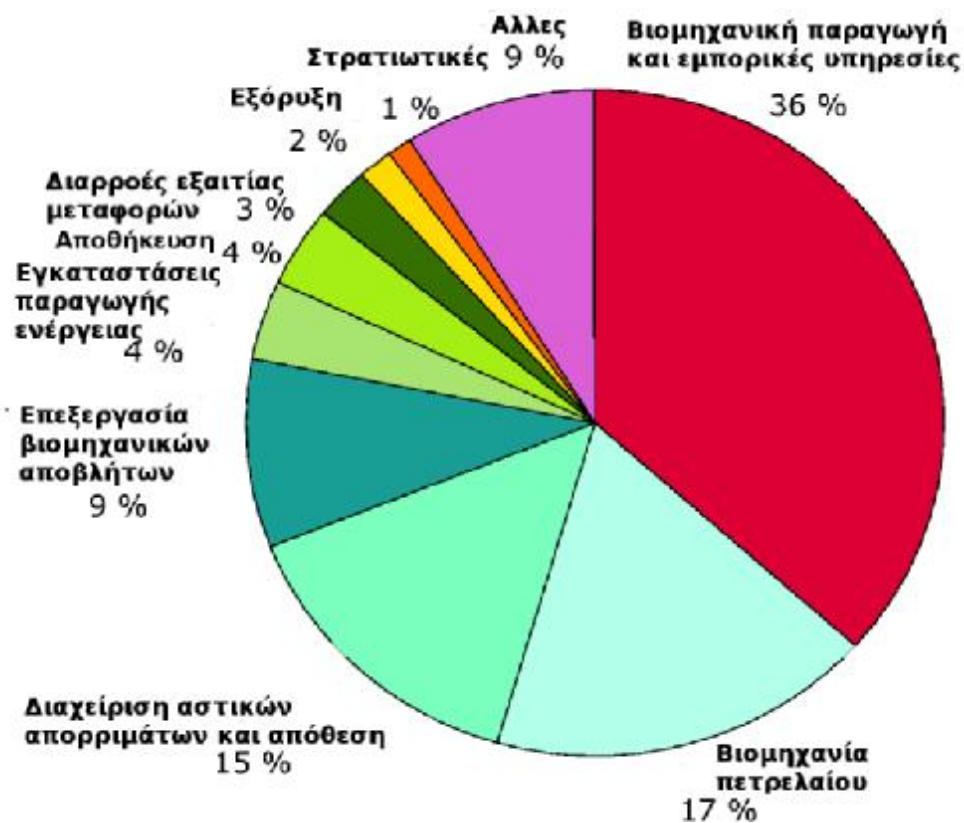
2.1 ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ

Η υποβάθμιση του εδάφους αποτελεί ένα σοβαρό πρόβλημα το οποίο προκαλείται και οξύνεται εξαιτίας των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων (ΕΕΚ, 2006). Το έδαφος γίνεται καθημερινά αποδέκτης μεγάλων ποσοτήτων από τοξικές και επιβλαβείς ουσίες με αποτέλεσμα την υποβάθμιση ή ακόμα και τη ρύπανση του (Τζόβολου, 2011). Τα προβλήματα που σχετίζονται με τη ρύπανση του εδάφους συνδέονται με την ανάπτυξη της βιομηχανίας και την καταναλωτική κατεύθυνση της κοινωνίας. Συγκεκριμένα οι σημαντικότερες οικονομικές δραστηριότητες που συμβάλλουν στην υποβάθμιση του εδάφους είναι ο κλάδος της βιομηχανικής παραγωγής, της παροχής υπηρεσιών, της βιομηχανίας επεξεργασίας πετρελαιοειδών και της επεξεργασίας απορριμμάτων από διάφορες δραστηριότητες, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1 (ΕΕΚ, 2006). Πρόσθετες αιτίες υποβάθμισης του εδάφους αποτελούν οι ακατάλληλες γεωργικές, κτηνοτροφικές και δασοκομικές πρακτικές, η εντατική χρήση γης, ο τουρισμός, η αστική και βιομηχανική επέκταση και τα κατασκευαστικά έργα (Ε.Σ., 2007; ΕΕΚ, 2006).

Το έδαφος, μαζί με τα υδάτινα συστήματα, είναι ο κυριότερος αποδέκτης της ανθρωπογενούς ρύπανσης. Οι βιομηχανικές, βιοτεχνικές και εμπορικές δραστηριότητες ρυπαίνουν σε μεγάλο βαθμό το έδαφος. Τα υγρά και στερεά απόβλητα αρχικά εναποτίθενται και επεξεργάζονται σε χερσαίες εγκαταστάσεις. Γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα, λιπάσματα και φυτοφάρμακα ρυπαίνουν καλλιεργημένες εκτάσεις. Ατυχήματα και διαρροές πετρελαίου, απόβλητα ορυχείων και λατομείων είναι μερικές άλλες αιτίες ρύπανσης εδαφών. Το έδαφος γίνεται αποδέκτης και των ατμοσφαιρικών ρύπων που κατακρημνίζονται με αργούς ρυθμούς ανάλογα με τις συνθήκες και τη γεωμορφολογία των περιοχών.

Η τύχη των οργανικών και ανόργανων ρύπων στο νερό, απορροφούνται από το έδαφος και μεταφέρονται στα διάφορα εδαφικά περιβαλλοντικά διαμερίσματα με τη βροχή και στα υπόγεια νερά. Οι συντελεστές κατανομής ρύπων μεταξύ εδαφών και νερού, εδάφους και ατμόσφαιρας, εδάφους και οργανικών συστατικών, παίζουν σημαντικό ρόλο για τον τελικό διασκορπισμό, μεταφορά, επανεξάτμιση και συσσώρευση ρύπων στα εδάφη. Οι συντελεστές κατανομής προκαθορίζουν και την τοξικότητα ρύπων στα φυτά και τα χερσαία ζώα, τη διάσπαση από φυσικές διεργασίες μέσα στο έδαφος και την βιοαποικοδόμιση τους μέσω των εδαφικών μικροοργανισμών.

Αυτά είναι τα βασικά προβλήματα της περιβαλλοντικής τοξικολογίας σε σχέση με τους τοξικούς και επικίνδυνους χημικούς ρύπους στα εδάφη.



Σχήμα 2.1: Απεικόνιση των σημαντικότερων οικονομικών δραστηριοτήτων που ευθύνονται για τη ρύπανση του εδάφους

Μελέτες για τις συγκεντρώσεις τους και τους μηχανισμούς τοξικότητας χρησιμεύουν για την εκτίμηση του κινδύνου για το περιβάλλον των ζωντανών οργανισμών και την υγεία του ανθρώπου. Ορισμένες από τις βασικές αιτίες ρύπανσης των εδαφών είναι:

- τα λιπάσματα και φυτοφάρμακα των γεωργικών εκμεταλλεύσεων
- τα υγρά και στερεά απόβλητα των κτηνοτροφικών εκμεταλλεύσεων
- τα υγρά και στερεά απόβλητα των χημικών βιομηχανιών
- τα αστικά και νοσοκομειακά απόβλητα που διατίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής και αποτέφρωσης σε υψηλές θερμοκρασίες
- η ρύπανση από την εκμετάλλευση του πετρελαίου, λιπαντικών υλών και ελαστικών τροχοφόρων
- η ρύπανση από απόβλητα μεταλλευτικών και λατομικών επιχειρήσεων
- η ρύπανση από βαρέα μέταλλα που προέρχονται από χημικές βιομηχανίες, καύση στερεών και υγρών ορυκτών καυσίμων και άλλες διεργασίες εμπλουτισμού ή καθαρισμού μεταλλευμάτων.

Το έδαφος δέχεται όλες αυτές τις τοξικές και επικίνδυνες χημικές ουσίες και παρασκευάσματα ή απόβλητα, τα οποία ανάλογα με τη γεωμορφολογία του εδάφους και άλλες εξωγενείς συνθήκες ρυπαίνουν τοπικά το έδαφος ή διασκορπίζονται σε άλλα περιβαλλοντικά διαμερίσματα (π.χ. υπόγεια νερά) ή εκπλύνονται στα διάφορα υδάτινα συστήματα. Στην περίπτωση των λιπασμάτων (νιτρικό και θειικό αμμώνιο, ουρία, φωσφορικά άλατα, άλατα καλίου) το έδαφος εμπλουτίζεται με θρεπτικά συστατικά για τα φυτά, αλλά δεν προσθέτουν τίποτα στην περίπτωση των χουμικών και των απαραίτητων εδαφικών ιχνοστοιχείων. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της οργανικής ύλης, η πορώδης υφή του εδάφους αλλοιώνεται και η συγκράτηση του νερού στο έδαφος μειώνεται. Με τη μείωση του νερού αυξάνεται η απώλεια θρεπτικών συστατικών και μειώνεται η γονιμότητα του εδάφους. Η προσπάθεια των γεωργών να αυξήσουν την απόδοση (χωρίς τη σωστή διαχείριση του προβλήματος) οδηγεί στην αύξηση της τοξικότητας των νιτρικών και άλλων λιπασμάτων στο έδαφος και στα νερά.

Παρόμοια προβλήματα ρύπανσης δημιουργούν ορισμένα από τα φυτοφάρμακα και οι μεταβολίτες τους στο έδαφος. Η συσσώρευση των υπολειμμάτων φυτοφαρμάκων σε γεωργικές εκτάσεις έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση τοξικών φαινομένων στους χερσαίους οργανισμούς, στους γαιοσκώληκες, τους νηματώδεις και τους μικροοργανισμούς, οι οποίοι με το χρόνο υποβαθμίζουν την υφή και την ποιότητα των εδαφών. Ιδιαίτερα προβλήματα προκαλούν τα φυτοφάρμακα που βιοαποικοδομούνται με αργούς ρυθμούς (μη βιοδιασπάσιμα) ή κατά τη διάσπασή τους παράγουν τοξικούς μεταβολίτες.

Τα βαρέα μέταλλα είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας ρύπανσης των εδαφών. Αν και οι χαμηλές συγκεντρώσεις μετάλλων μπορούν να γίνουν αποδεκτές από ορισμένα φυτά χωρίς να προκαλούν τοξικές βλάβες, οι υψηλές συγκεντρώσεις έχουν αρνητικές επιδράσεις στην ενζυμική λειτουργία σε χερσαία ζώα και τους γαιοσκώληκες, νηματώδεις και μικροοργανισμούς των εδαφών.

2.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ

Το έδαφος υπόκειται σε μια σειρά μη φυσικών διεργασιών, απειλών υποβάθμισης ακόμη και φαινομένων ρύπανσης οφειλόμενες στις ανθρώπινες δραστηριότητες. Ανάμεσα σε αυτές τις δράσεις περιλαμβάνονται διάβρωση, μείωση της οργανικής ύλης, εντοπισμένη και διάχυτη ρύπανση, οξύνιση, στεγανοποίηση/σφράγιση, συμπίκνωση, μείωση της βιοποικιλότητας, αλάτωση, πλημμύρες και κατολισθήσεις. Η εμφανής και αποδεδειγμένη επιβάρυνση του υπεδάφους έχει ποικίλες άμεσες, έμμεσες και συσσωρευτικές αρνητικές επιπτώσεις τόσο στο φυσικό όσο και στο ανθρωπογενές περιβάλλον. Διαταράσσοντας τις ροές αερίων, υδάτων και ενέργειας με συνέπεια την απώλεια γόνιμου εδάφους καθώς και των φυσικών λειτουργιών του (E.C., 2007; ΕΕΚ, 2006). Ειδικότερα, η ρύπανση του υπεδάφους έχει αρνητικές επιπτώσεις σε σημαντικούς φυσικούς, κοινωνικούς και οικονομικούς πόρους όπως:

Στην ποιότητα των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Η ρύπανση του υπεδάφους οφείλεται στη διεργασία της κατείσδυσης των επιφανειακών υδάτινων απορροών, τα οποία συμπαρασύρουν διάφορους ρύπους από την επιφάνεια του εδάφους με συνέπεια την αλλοίωση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των υπόγειων και των επιφανειακών υδάτων, επηρεάζοντας έτσι το σύνολο των χημικών και βιολογικών ισορροπιών. Άμεσες συνέπειες είναι η διαταραχή της ισορροπίας των

θρεπτικών στοιχείων όπως το άζωτο και ο φώσφορος με αποτέλεσμα την εμφάνιση φαινομένων ευτροφισμού, τοξικών επιπτώσεων στην υδατική πανίδα και χλωρίδα. Η υποβάθμιση της ποιότητας του εδάφους προκαλεί σημαντικές επιβαρύνσεις στην εύρυθμη λειτουργία των οικοσυστημάτων καθώς και στην ανθρώπινη υγεία.

Στη χλωρίδα και το ευρύτερο οικοσύστημα. Οι περισσότερες χημικές ουσίες και πετρελαιοειδή έχουν φυτοτοξικές ιδιότητες, προκαλώντας βλάβες όπως: αναστολή της ανάπτυξης, διαταραχή των διαδικασιών των φυτών, διαταραχή στις ισορροπίες των θρεπτικών συστατικών, κιτρίνισμα ή χλώρωση των φύλλων όσον αφορά τους φυτικούς οργανισμούς. Αναλογιζόμενοι τη συσχέτιση των φυτών με τα υπόλοιπα μέρη ενός τοπικού οικοσυστήματος μπορεί να αναφερθεί πως είναι δυνατή η παρατήρηση ακόμα και απώλειας της βιοποικιλότητας (EEK, 2006). Παρόμοια δράση έχουν και τα βαρέα μέταλλα.

Στην ανθρώπινη υγεία. Μια χημική ουσία σε κατάλληλη συγκέντρωση είναι δυνατό να προκαλέσει τοξικές επιδράσεις, αλλεργίες – ερεθισμούς, καρκινογένεση, ή ακόμα και γενετική μετάλλαξη. Το ρυπασμένο έδαφος σε μια περιοχή αποτελεί άμεσο κίνδυνο για τον άνθρωπο καθώς οι χημικές ουσίες βρίσκονται σε συγκέντρωση ικανή να προκαλέσει βλάβη. Οι αρνητικές επιδράσεις μπορεί να προκληθούν, είτε με άμεση επαφή του ανθρώπου με τη χημική ουσία (απορρόφηση από το δέρμα, εισπνοή σκόνης που προέρχεται από το ρυπασμένο έδαφος και εισπνοή από εξάτμιση ρυπαντών στην ατμόσφαιρα), είτε έμμεσα μέσω της κατανάλωσης φυτών ή εδάδιμων ζωικών οργανισμών και νερού που έχουν εκτεθεί σε ρυπογόνες ουσίες (και γενικότερα μέσω της τροφικής αλυσίδας) (SEPA, 2010; EEK, 2006; <http://www.intergeo.hgr/page.asp?pid=51&gr=1>).

Στην κατάσταση των κτιρίων και υλικών στην περιοχή. Διάφορες χημικές ουσίες προκαλούν διάβρωση σε ανόργανα υλικά όπως είναι το τσιμέντο, το μπετόν καθώς και σε οργανικά όπως τα πλαστικά. Σχετικά με τα διάφορα σημαντικά μέρη ενός κτιρίου ιδιαίτερη μνεία εξαιτίας αυξημένης πιθανότητας κινδύνου, πρέπει να γίνει στην περίπτωση της διάβρωσης σωλήνων που διέρχονται μέσα από τη ρυπασμένη περιοχή, ιδιαίτερα αν πρόκειται για σωλήνες του δικτύου πόσιμων υδάτων. Καθώς και η ασφάλεια των εργαζομένων κατά την κατασκευή του δικτύου ύδρευσης αλλά και των κατοίκων της περιοχής που πρόκειται να καταναλώσουν το νερό.

Υπάρχουν καταγεγραμμένες περιπτώσεις όπου η ρύπανση του υπεδάφους ήταν η αιτία πρόκλησης ατυχημάτων σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, με συνέπεια το θάνατο ή τον τραυματισμό εργαζομένων σε αυτές. Όπως για παράδειγμα η διαρροή πτητικών πετρελαιοειδών προϊόντων (π.χ. βενζίνη) από υπόγειες δεξαμενές ή σωληνογραμμές σε πρατήρια υγρών καυσίμων, μπορεί να προκαλέσει τη μεταφορά των πτητικών ουσιών μέσω του διαπερατού γεωλογικού υποβάθρου με αποτέλεσμα τη συσσώρευση τους σε γειτονικούς υπόγειους χώρους, όπου είναι δυνατόν να δημιουργηθούν συνθήκες εκρηκτικής ατμόσφαιρας και με την εμφάνιση σπινθήρα να υπάρξει έκρηξη, με ότι αρνητικές συνέπειες συνεπάγονται.

Στην αισθητική της περιοχής. Η γενική εικόνα που εμφανίζεται σε ένα ρυπασμένο πεδίο συμβάλει σημαντικά στην υποβάθμιση της αισθητικής της ευρύτερης

περιοχής. Εγκαταλελειμμένες επιβαρυνμένες περιοχές δεν ενδείκνυνται για καμία χρήση με αποτέλεσμα να καθίστανται άχρηστες και με την πάροδο του χρόνου να γίνονται αποδέκτες περαιτέρω ρυπαντικών φορτίων με ανεξέλεγκτη συνήθως διάθεση αποβλήτων (μπαζών, διαφόρων στερεών και υγρών αποβλήτων), εφόσον δεν προβλεφθούν άμεσα μέτρα αποκατάστασης και εξυγίανσης του υπεδάφους. Δυσοσμίες από πτητικές οργανικές ουσίες που βρίσκονται σε ρυπασμένα εδάφη ή επιφανειακά νερά, ή προέρχονται από προϊόντα φυσικής βιοαποικοδόμησης (μεθάνιο, υδρόθειο) μπορούν να προκαλέσουν την πλήρη απαξίωση της ίδιας της ρυπασμένης περιοχής όπως και των γειτονικών εκτάσεων. Τέλος η παρουσία ρύπων στο έδαφος αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα στον εμπλουτισμό μιας περιοχής με φυσικά στοιχεία συντελώντας στην αισθητική υποβάθμιση μιας περιοχής. (EPA, 2011; <http://www.intergeo.hgr/page.asp?pid=51&gr=1>).

Στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη της περιοχής. Η αποτροπή αξιοποίησης μιας περιοχής εξαιτίας της παρουσίας ρύπων στο έδαφος έχει ως συνέπεια την παρατήρηση οικονομικών επιπτώσεων. Ειδικότερα το ρυπασμένο έδαφος μια περιοχή που δεν είναι δυνατό να αξιοποιηθεί, έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια εκτάσεων και πιθανών χρήσεων όπως καλλιέργεια, κατασκευές, χώρων αναψυχής και πρασίνου. Η απώλεια δεν περιορίζεται αποκλειστικά στα όρια της ρυπασμένης περιοχής, αλλά εκτείνεται και στο γύρω χώρο, καθώς αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα για την ανάπτυξη κατοικίας και επαγγελματικής δραστηριότητας σε περιβαλλοντικά υποβαθμισμένο χώρο. Η αξία της γης και των κατοικιών υποβαθμίζεται καθώς και η ποιότητα ζωής, λόγω των φαινομένων μεταφοράς της ρύπανσης με τον αέρα και τα ύδατα. Υπάρχουν δηλαδή επιπτώσεις που συνδέονται όχι μόνο με το κόστος αποκατάστασης, αλλά και με την αξία της γης, τη χρήση της, και τον τρόπο που επηρεάζονται οι γειτονικές κοινότητες (EEA, 1999; E.C., 2007; Τζόβολου, 2011; <http://www.intergeo.hgr/page.asp?pid=51&gr=1>).

2.3 ΤΥΧΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΡΥΠΩΝ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ

Οι ακατάλληλες πρακτικές απόρριψης απορριμάτων και λυμάτων που ακολουθήθηκαν τις περασμένες δεκαετίες, είχαν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση αρκετών γεγονότων επιβάρυνσης και ρύπανσης του εδάφους. Ταυτόχρονα το ίδιο χρονικό διάστημα παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση του όγκου των απορριμάτων καθώς και του αριθμού των επικίνδυνων ουσιών που περιέχονταν σε αυτά. Ομοίως ο κλάδος της βιομηχανίας βρέθηκε αντιμέτωπος με το πρόβλημα της διαχείρισης νέων χημικών ουσιών τα οποία ήταν πιθανό να επιβαρύνουν το περιβάλλον. Συνέπεια ήταν και είναι να δυσχεραίνεται η εφαρμογή κατάλληλων πρακτικών διαχείρισης για την προστασία του εδάφους. Παρατηρώντας το πλήθος των χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται δύσκολα υπάρχει πλέον τομέας του κλάδου της βιομηχανίας και των υπηρεσιών, όπου να μπορεί να αποκλεισθεί η πιθανότητα ύπαρξης ρύπανσης του εδάφους ή των υπογείων υδάτων (EEA, 1999).

Η ρύπανση του εδάφους δεν περιορίζεται αποκλειστικά στην ύπαρξη ουσιών. Δραστηριότητες που έχουν ως αποτέλεσμα, την ανεπαρκή διαχείριση των υδάτων στις αστικές περιοχές, την αφαίρεση επιφανειακού εδάφους, όπως και η σφράγιση και η συμπίεση του εδάφους έχουν και έμμεσες και συσσωρευτικές επιπτώσεις εξαιτίας της

δημιουργίας περιοχών συγκέντρωσης ρύπων, δημιουργώντας σημεία αυξημένης συγκέντρωσης (Meuser, 2010). Η υπηρεσία περιβάλλοντος της ΕΕ προσδίδει ιδιαίτερη σημασία στη σφράγιση και συμπίεση του εδάφους. Υπολογίζεται πως περίπου το 9% της επιφάνειας της ΕΕ καταλαμβάνεται από δρόμους και τσιμέντο. Κύρια αιτία της συμπίεσης του εδάφους είναι η χρήση βαρέων μηχανημάτων και οι κατασκευαστικές εργασίες. Το συμπίεσμένο έδαφος αποκτά σημαντικά μεγαλύτερη πυκνότητα. Συνέπεια είναι να παρατηρούνται έμμεσες επιπτώσεις στο έδαφος, όπως η μείωση του αερισμού του εδάφους, σχετική αύξηση της θερμοκρασίας, μείωση των ποσοτήτων υδάτων που μπορούν να αποθηκευτούν, μείωση της διείσδυτικότητας των ριζών, μειωμένη βιολογική δραστηριότητα, καθώς και μειωμένη λήψη θρεπτικών και υδάτων από τα φυτά της περιοχής (EPA, 2011). Ταυτόχρονα, λόγω της μείωσης της διαθέσιμης χωρικής επιφάνειας συρρικνώνεται η δυνατότητα απομάκρυνσης ρύπων δια μέσω των φυσικών λειτουργιών του εδάφους και του υπεδάφους.

Οι δραστηριότητες αυτές έχουν αρνητική επίπτωση, με την έννοια ότι παρακαλύεται η επιτέλεση των ευρέως φάσματος λειτουργιών του εδάφους προς όφελος του ανθρώπου και των οικοσυστημάτων, με αποτέλεσμα να υποβαθμίζεται η γονιμότητα του εδάφους, να παρατηρείται μείωση του άνθρακα και της βιοποικιλότητας, καθώς και η ικανότητα συγκράτησης νερού, με αποτέλεσμα να διαταράσσονται οι κύκλοι των αερίων και των θρεπτικών συστατικών και να περιορίζεται η διάσπαση των ρύπων (EEK, 2006).

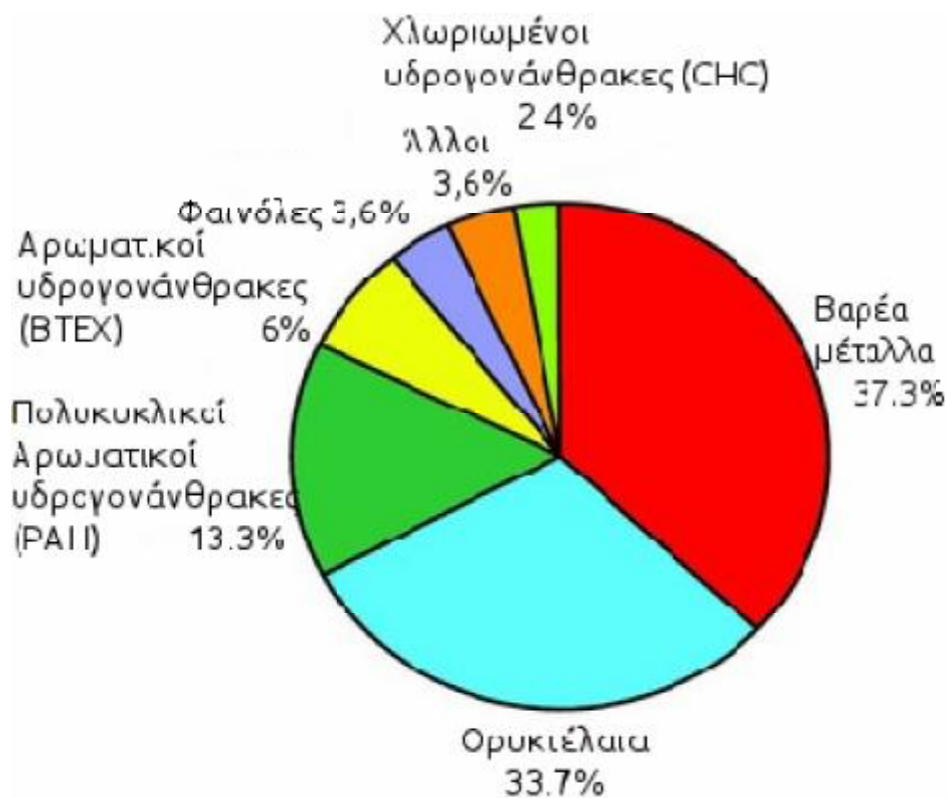
2.4 ΡΥΠΟΙ

Το μέγεθος και η σημασία των συνεπειών από τη ρύπανση του περιβάλλοντος εξαρτώνται από το είδος, την ποσότητα, τη τοξικότητα και τη διάρκεια παραμονής των ρύπων στο περιβάλλον. Για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου απορρύπανσης η περιγραφή των ρύπων αποτελεί προαπαιτούμενο. Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των ρύπων καθορίζουν τη συμπεριφορά τους στο περιβαλλοντικό μέσο. Οι διαφορετικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τα μέταλλα και τους οργανικούς ρύπους (ταυτόχρονα με το υψηλό κόστος που απαιτείται για τη μείωση των συνεπειών τους) έχει ως αποτέλεσμα οι επιστήμονες να ακολουθούν τη συνήθη τακτική να επικεντρώνονται στην αντιμετώπιση μιας κατηγορίας ρύπων (NAS et al., 1999). Ενώ δεν είναι λίγες οι έρευνες που αναγκάζονται να επικεντρωθούν στην αντιμετώπιση ενός και μόνο ρύπου.

2.4.1 Οργανικοί ρύποι

Η επίδραση των οργανικών ρύπων στη διαχείριση του περιβάλλοντος γίνεται κατανοητή από το ποσοστό που κατέχουν στο σύνολο των επικίνδυνων ρυπογόνων ουσιών, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2. Σχεδόν κάθε οικονομική δραστηριότητα συνοδεύεται από την ύπαρξη προϊόντων οργανικής σύνθεσης. Το πετρέλαιο αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή ενέργειας παγκοσμίως, ταυτόχρονα είναι από τις συνηθέστερες πρώτες ύλες της χημικής βιομηχανίας. Τα προϊόντα διύλισης, τα λιπαντικά, οι διάφοροι διαλύτες και άλλα παράγωγα της χημικής βιομηχανίας πετρελαίου αποτελούν την πρώτη ύλη των λιπασμάτων, των φυτοφαρμάκων, καθώς και συνθετικών προϊόντων όπως τα πλαστικά και τα απορρυπαντικά ακόμη και ορισμένες εκρηκτικές ύλες. Εξαιτίας της ευρείας χρήσης τους, τα οργανικά προϊόντα μετά την εκπλήρωση του σκοπού τους, είναι σύνηθες να απαντώνται στα βιομηχανικά και αστικά απόβλητα. Ο

τελικός αποδέκτης των προϊόντων είναι συνήθως το έδαφος ή κάποιος υδάτινος αποδέκτης αν έχουν περάσει από κάποια εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων. Ακόμη η ρύπανση οφειλόμενη στο πετρέλαιο και τα παράγωγα προϊόντα του οφείλεται κυρίως στις χερσαίες μεταφορές, τις διαρροές από εργοστάσια, τις βιοτεχνίες και τις αποθήκες τους, τις παλαιές εγκαταστάσεις διυλιστηρίων, τα πρατήρια υγρών καυσίμων και τα διάφορα ατυχήματα σε εγκαταστάσεις άντλησης πετρελαίου. Συνεπώς, η εκτεταμένη χρήση πετρελαίου αυξάνει αυτομάτως τις πιθανότητες ρύπανσης του περιβάλλοντος από τα διάφορα προϊόντα του (Τζόβολου, 2011).



Σχήμα 2.2: Κατανομή ρύπων στο έδαφος και τα υπόγεια ύδατα

Οι υδρογονάνθρακες των πετρελαιοειδών αποτελούν μια πολύ σημαντική κατηγορία ρυπογόνων ουσιών για το έδαφος και τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Επίσης, οι διεργασίες καύσεως έχουν οδηγήσει στην ευρεία ρύπανση του εδάφους από πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs) που είναι γνωστοί για την υψηλή τοξικότητά τους. Στη καύση ομάδων όπως οι χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες οφείλεται και η εμφάνιση ρύπων όπως οι διοξίνες.

Οι βασικές αιτίες τοξικότητας και επικινδυνότητας των οργανικών ρύπων αποτελούν αρχικά η αδυναμία πλήρους αποικοδόμησης τους από τους μικροοργανισμούς εξαιτίας της ανθρωπογενούς προέλευσης τους, στην μεταβολή τους εξαιτίας φυσικών ή βιολογικών διεργασιών με αποτέλεσμα τη παραγωγή τοξικών

παραπροϊόντων. Τέλος στη δυνατότητα βιοσυσσώρευσης τους, καθώς έχουν την ιδιότητα να συσσωρεύονται στους βιολογικούς ιστούς, κυρίως στο λιπώδη ιστό. Ως εκ τούτου εμφανίζουν άμεσες, έμμεσες, βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες επιδράσεις στους μικροοργανισμούς, τη χλωρίδα και τη πανίδα του εδάφους μιας περιοχής (Τζόβολου, 2011; Βαλαβανίδης, 2007).

Αν και είναι δυνατός ο διαχωρισμός των οργανικών ρύπων σε διάφορες κατηγορίες σύμφωνα με τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τους, υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες υγρών οργανικών ρύπων: 1) Οι μη υδατικές υγρές φάσεις με πυκνότητα μικρότερη του νερού (Light non-aqueous phase liquids, LNAPL). Χαρακτηριστικό τους αποτελεί ο σχηματισμός ξεχωριστής φάσης πάνω από αυτό. Σε αυτή τη κατηγορία περιλαμβάνονται οι χλωριωμένοι διαλύτες και οι πετρελαϊκή υδρογονάνθρακες (π.χ. βενζίνη, κηροζίνη, diesel πετρέλαιο θέρμανσης κ.ά.) και, 2) Οι μη υδατικές υγρές φάσεις με πυκνότητα μεγαλύτερη του νερού (Dense non-aqueous phase liquids, DNAPL), που μπορούν να διεισδύουν στα υπόγεια ύδατα και να σχηματίζουν πλούμια (plumes) μέσα στο έδαφος και τα πετρώματα (π.χ. λινθρακόπισσα, κρεόζωτο, χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες κ.ά) (Τζόβολου, 2011; NAS et al., 2004).

Η αντιμετώπιση της ρύπανσης των οργανικών ρύπων στο έδαφος αποτελεί ένα πεδίο το οποίο έχει αναλάβει σημαντικά μεγαλύτερο βάρος των διαθέσιμων εμπορικών εφαρμογών και της επιστημονικής κοινότητας.

2.4.2 Ανόργανοι ρύποι

Στην κατηγορία των ανόργανων ρύπων ανήκουν στοιχεία και ενώσεις τα οποία σε φυσιολογικές συνθήκες απαντώνται σε μικρές συγκεντρώσεις στο έδαφος. Η παρουσία τους οφείλεται είτε στα ορυκτά του εδάφους, αποτελούν δηλαδή φυσικά στοιχεία του εδάφους, είτε στην εισαγωγή τους από ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι σημαντικότεροι εκπρόσωποι των ανόργανων ρύπων είναι τα μέταλλα και διάφορα ραδιενεργά στοιχεία.

Τα μέταλλα αποτελούν φυσικά στοιχεία του εδάφους καταλαμβάνοντας ένα μικρό ποσοστό της ολικής σύστασης του εδάφους. Αναφέρονται σε μια μεγάλη ομάδα στοιχείων τα οποία έχουν οικονομική και βιολογική σημασία. Διαθέτουν κοινές χαρακτηριστικές ιδιότητες. Η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, η λαμψη, η θερμική αγωγιμότητα, η δυνατότητα σχηματισμού ιόντων, είναι ελατά και όλκιμα αποτελούν τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά. Σε φυσικές συνθήκες περιβάλλοντος όλα τα μέταλλα είναι στερεά, με εξαίρεση τον υδράργυρο. Η πλειοψηφία τους έχει υψηλή πυκνότητα και παρουσιάζουν ανθεκτικότητα. Επιπλέον διαθέτουν χαρακτηριστικό αργυρό ή πλατινένιο χρώμα, με εξαίρεση τον χαλκό ο οποίος είναι ερυθρός και τον χρυσό με το ιδιαίτερο κίτρινο χρώμα του. Παραδείγματα μετάλλων αποτελούν ο σίδηρος, ο χαλκός, το αργίλιο, το νάτριο, το ασβέστιο, ο ψευδάργυρος, το μαγνήσιο, το τιτάνιο και το ουράνιο.

Οι σημαντικότερες επιπτώσεις στο έδαφος οφείλονται στα λεγόμενα βαρέα μέταλλα, τα οποία αποτελούν υπο-κατηγορία των μετάλλων. Φαινόμενα επιβάρυνσης είναι δυνατό να εμφανιστούν και από άλλα μέταλλα όπως το ασβέστιο, το νάτριο, το κάλλιο κτλ. Η σημαντικότερη επίπτωση των μετάλλων αυτών αποτελεί η αλάτωση του εδάφους. Τα αλατούχα εδάφη μειώνουν τη διαθεσιμότητα του νερού στις καλλιέργειες

και τη διαθεσιμότητα των μικροθρεπτικών σε αυτές. Επίσης, οι αυξημένες συγκεντρώσεις ορισμένων ιόντων μπορεί να δράσουν τοξικά σε ορισμένες καλλιέργειες και να υποβαθμίσουν τη δομή του εδάφους. Η αδυναμία διατήρησης των φυσικών χαρακτηριστικών του εδάφους μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα ερημοποίησης.

The image shows a periodic table of elements. Three regions are highlighted with colored boxes: a blue box labeled 'Metal' covering the majority of the table, a green box labeled 'Metalloid' covering elements like Boron, Silicon, Germanium, Arsenic, Antimony, and Tellurium, and a yellow box labeled 'Nonmetal' covering elements like Carbon, Nitrogen, Oxygen, Fluorine, and the noble gases. The lanthanide and actinide series are shown in separate rows at the bottom.

Σχήμα 2.3: Ο περιοδικός πίνακας και η αντιστοίχιση των στοιχείων σε μέταλλα και μη <https://www.thoughtco.com/metals-nonmetals-and-metalloids-periodic-table-608867>

Άλλοι ανόργανοι ρύποι οι οποίοι δεν ανήκουν στα μέταλλα αποτελούν οι ενώσεις του αζώτου και του φωσφόρου. Οι ενώσεις του αζώτου και του φωσφόρου προέρχονται πρωτίστως από τον κλάδο της γεωργίας και της κακής χρήσης λιπασμάτων. Η παρουσία τους σε υψηλές συγκεντρώσεις στο έδαφος είναι δυνατό να οδηγήσει σε πιθανά περιβαλλοντικές επιπτώσεις όπως αυξημένες εκπομπές αμμωνίας οι οποίες συμβάλλουν στην οξίνιση του εδάφους, την αλάτωση, τον ευτροφισμό των υδάτων και στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Στην παραγωγή οξειδίων του αζώτου τα οποία συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Οι αερομεταφερόμενες ενώσεις του αζώτου συμβάλλουν στο σχηματισμό άλλων αέριων ρύπων όπως το όζον το οποίο είναι δυνατό να προκαλέσει επιπτώσεις σε. Η μακροχρόνια στέρηση τους από το έδαφος ελλοχεύει τον κίνδυνο της μείωσης της αποδοτικότητας του εδάφους και της ερημοποίησης του. (http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agriculture_and_environment_-_pollution_risks)



Σχήμα

2.4: Παράδειγμα ερημοποίησης του εδάφους

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ

Ο όρος βαρέα μέταλλα αναφέρεται σε κάθε μεταλλικό στοιχείο το οποίο έχει σχετικά μεγάλη πυκνότητα και είναι τοξικό ή δηλητηριώδες ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Τα βαρέα μέταλλα είναι φυσικά στοιχεία που έχουν υψηλό ατομικό βάρος και πυκνότητα τουλάχιστον 5 φορές μεγαλύτερη από εκείνη του νερού (Tchounwou et al., 2012). Χαρακτηριστικά παραδείγματα βαρέων μετάλλων αποτελούν ο υδράργυρος, το κάδμιο, το αρσενικό, το χρώμιο και ο μόλυβδος. Αποτελούν φυσικά στοιχεία του φλοιού της γης. Δεν υφίσταται η δυνατότητα αποδόμησης ή καταστροφής τους. Στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας πτυχιακής εργασίας παρουσιάζονται οι πηγές των βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον καθώς και οι επιπτώσεις τους όταν παρουσιάζονται σε υψηλές συγκεντρώσεις.

Στην προσπάθεια ακριβούς προσδιορισμού του όρου βαρέα μέταλλα ο οποίος θεωρείται ασαφής είναι δυνατό να συναντηθούν διάφοροι ορισμοί σύμφωνα με την πυκνότητα, το ατομικό βάρος, τον ατομικό αριθμό ακόμη και τη θέση του στοιχείου στον περιοδικό πίνακα. Στην προσπάθεια προσδιορισμού των βαρέων μετάλλων σύμφωνα με την πυκνότητα τους, είναι δυνατόν να βρεθούν ορισμοί οι οποίοι αναφέρουν πως η ελάχιστη πυκνότητα ενός μετάλλου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 4 g/cm^3 ή 5 g/cm^3 ή ακόμη και 7 g/cm^3 . Με βάση το ατομικό βάρος των στοιχείων ως βαρέα μέταλλα ορίζονται τα μέταλλα με ατομικό βάρος μεγαλύτερο του νατρίου ή ένας ακόμη πιο αόριστος ορισμός αναφέρει τα μέταλλα με μεγάλο ατομικό βάρος. Στην περίπτωση του εδάφους η ανάγκη ενός ορισμού που να περιέχει βιολογικές προεκτάσεις κρίνεται απαραίτητος. Συνεπώς ένας κατάλληλος ορισμός είναι πως βαρέα μέταλλα καλούνται τα στοιχεία τα οποία είναι γενικώς τοξικά στους έμβιους οργανισμούς χωρίς να είναι απαραίτητα υψηλής πυκνότητας ή να εμφανίζουν αποκλειστικά μεταλλικό χαρακτήρα. Σε αυτά περιλαμβάνονται το αρσενικό, το κάδμιο, το χρώμιο, ο χαλκός, ο μόλυβδος, ο υδράργυρος, το νικέλιο και ο ψευδάργυρος.

Τα προβλήματα που προκαλούνται από την έλλειψη ενός καθολικού ορισμού περιορίζεται με την αναφορά λίστας συγκεκριμένων μετάλλων που συνοδεύει τη νομοθεσία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της συγκεκριμένης τακτικής αποτελεί η Οδηγία 2006/11/EK για την προστασία των υδάτων.

Η ρύπανση οφειλόμενη σε βαρέα μέταλλα αποτελεί ένα από τα πολυπλοκότερα περιβαλλοντικά ζητήματα (Abioye et al., 2011). Πηγές βαρέων μετάλλων είναι οι εκπομπές από τις μεταφορές, υπολείμματα από λυματολάσπη και άλλα απορρίμματα που τοποθετούνται στο έδαφος όπως ορυκτά, λιπάσματα και φυτοφάρμακα. Τα βιομηχανικά απόβλητα περιέχουν συχνά μεγάλες συγκεντρώσεις ιόντων μετάλλων εξαιτίας της αυξανόμενης χρήσης τους σε διαφορετικές δραστηριότητες όπως τα ορυχεία, η παραγωγή ενέργειας, η παραγωγή καυσίμων, η βιομηχανία και εφαρμογή λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, η μεταλλουργία, η επεξεργασία δέρματος τα ηλεκτρονικά απορρίμματα. Τα μέταλλα στο διάλυμα του εδάφους βρίσκονται ως μεταλλικά ιόντα (π.χ. Cd^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{3+}), ως οργανικά και ανόργανα σύμπλοκα (π.χ. ZnCl^+ , CdCl^{3-}) ή σε σύνδεση με κolloειδή με αποτέλεσμα την οξίνιση του εδάφους (EPA, 1992).

Τα μέταλλα διέπονται από χαρακτηριστικά τα οποία τα καθιστούν επικίνδυνα για το έδαφος. Αρχικά δεν είναι δυνατή η διάσπαση τους σε απλούστερες μορφές ούτε η καταστροφή τους. Συνεπώς τα μεταλλικά ιόντα δεν είναι δυνατό να αποικοδομηθούν

από τους μικροοργανισμούς του εδάφους με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζονται από συνεχή κυκλοφορία. Τα βαρέα μέταλλα από το έδαφος τελικώς εισέρχονται στη τροφική αλυσίδα και αποτελούν κίνδυνο για τα τοπικά οικοσυστήματα. Συνέπεια της εισροής τους στη τροφική αλυσίδα είναι η εμφάνιση φαινόμενων βιοσυσσώρευσης (NAS et al., 1997; Abioye et al., 2011). Άλλο χαρακτηριστικό των βαρέων μετάλλων είναι το γεγονός πως για την εκδήλωση επιβάρυνσης στο έδαφος δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη υψηλών συγκεντρώσεων. Ακόμη και σε μικρές συγκεντρώσεις της τάξης των 1-10 mg/L, είναι δυνατό να συντελέσουν σε εκδήλωση τοξικών φαινομένων (Ισαρη, 2015). Η συσσώρευση τους στο έδαφος επιδρά στην αποδοτικότητα του εδάφους, στη μικροβιακή δραστηριότητα και την ανάπτυξη της χλωρίδας. Η έκθεση στα βαρέα μέταλλα συνήθως είναι χρόνια εξαιτίας της μεταφοράς τους μέσω της τροφικής αλυσίδας (USDA, 2000; Abioye et al., 2011), καθώς εδάφη επιβαρυνόμενα με βαρέα μέταλλα μπορούν να παράγουν φαινομενικά κανονικά προϊόντα τα οποία όμως να είναι ακατάλληλα για τροφή από ανθρώπους ή την πανίδα. Τέλος, η αποθήκευση τους στα εδάφη μέσω της ρόφησης στην οργανική ύλη και τα ορυκτά του εδάφους είναι δυνατό να συντελέσει στην μακροπρόθεσμη επιβάρυνση του εδάφους, καθώς χωρίς τη δυνατότητα φυσικής αποικοδόμησης η τοξικότητα τους διαρκεί για χρόνια. Κάποια από αυτά μπορεί από μικρής τοξικότητας να μετατραπούν σε υψηλής τοξικότητας σε συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος, όπως ο υδράργυρος (EPA, 1992).

Τα βαρέα μέταλλα αποτελούν απειλή τόσο για τον άνθρωπο όσο και για τη χλωρίδα και την πανίδα αν δεν αποκατασταθούν σε αβλαβή επίπεδα. Ορισμένα από αυτά είναι ιδιαίτερα τοξικά για τους οργανισμούς, όπως ο υδράργυρος (Hg), ο Μόλυβδος (Pb), το Κάδμιο (Cd), το Αρσενικό (As) προκαλώντας χρόνιες και οξείες βλάβες. Αντίθετα άλλα όπως τα σίδηρος (Fe), χαλκός (Cu), Ψευδάργυρος (Zn), κοβάλτιο (Co), Μαγγάνιο (Mn), Βανάδιο (V), είναι απαραίτητα για τη ζωή σε μικρές συγκεντρώσεις, αλλά σε μεγαλύτερες ευθύνονται για τοξικές δράσεις. Ενδιάμεσα βρίσκονται μέταλλα όπως το Σελήνιο (Se), το Νικέλιο (Ni), ο Κασσίτερος (Sn), το Χρώμιο (Cr) των οποίων η παρουσία είναι ευεργετική για τον οργανισμό εξαρτώμενα από τις ποσότητες που λαμβάνονται. Ο παραπάνω διαχωρισμός των μετάλλων βρίσκεται υπό συνεχή αναθεώρηση καθώς τελικά δεν υπάρχει σήμερα αμφιβολία ότι όλα τα μέταλλα είναι τοξικά στα έμβια όντα και όχι απαραίτητως αποκλειστικά σε υψηλές συγκεντρώσεις (Abioye et al., 2011).

Η αύξηση της συγκέντρωσης των βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον εξαιτίας ανθρώπινων δραστηριοτήτων έχει ως αποτέλεσμα την επιβάρυνση του εδάφους. Στις Ηνωμένες Πολιτείες οι 2 στις 3 τοποθεσίες οι οποίες βρίσκονται στην εθνική λίστα προτεραιότητας για την αντιμετώπιση της ρύπανσης του εδάφους είναι αντιμετώπιζόμενες με ρύπανση οφειλόμενη σε βαρέα μέταλλα αποδεικνύοντας την έκταση του προβλήματος. Κάδμιο, χαλκός, μόλυβδος, υδράργυρος, νικέλιο, αρσενικό, χρώμιο, σελήνιο, και ψευδάργυρος θεωρούνται τα πιο επικίνδυνα μέταλλα και περιλαμβάνονται στη λίστα με τους ρύπους προτεραιότητας της αμερικανικής προστασίας περιβάλλοντος (EPA) (<http://water.epa.gov/scitech/methods/cwa/pollutants.cfm>; USDA, 2000)



Σχήμα 3.1: Απεικόνιση ρύπανσης επιφανειακού αποδέκτη οφειλόμενη σε μέταλλα.
<https://www.chinadialogue.net/article/show/single/en/7079-China-faces-long-battle-to-clean-up-its-polluted-soil>

3.1 ΧΗΜΕΙΑ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

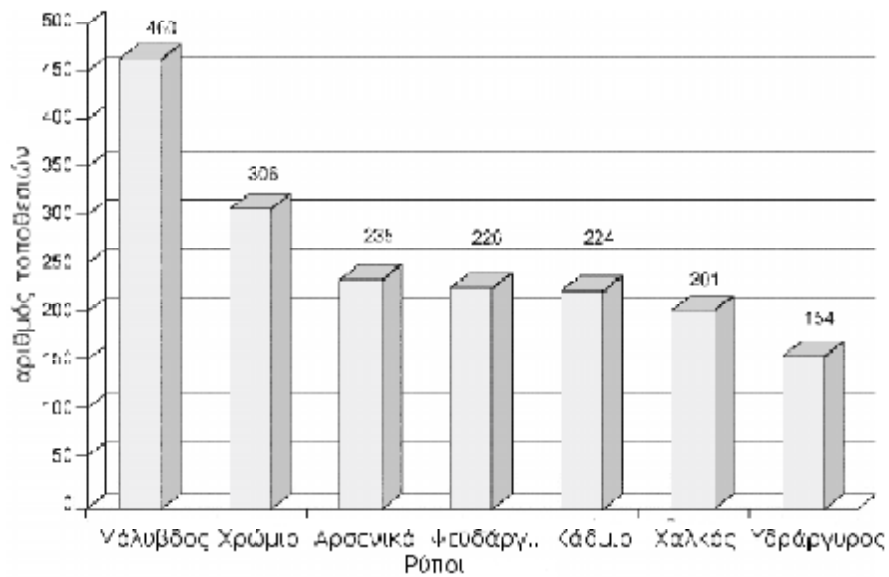
Τα βαρέα μέταλλα είναι ενώσεις που δεν αποδομούνται με φυσικές διεργασίες και έτσι παραμένουν στο περιβάλλον για μεγάλο χρονικό διάστημα. Τα βαρέα μέταλλα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη θρέψη των ζωικών και φυτικών οργανισμών και χαρακτηρίζονται σαν θρεπτικά ιχνοστοιχεία. Οι απαιτήσεις των οργανισμών σε μέταλλα ποικίλουν ανάλογα με το είδος του οργανισμού και πάντα οι συγκεντρώσεις τους κυμαίνονται σε πολύ χαμηλές τιμές και σε στενά όρια. Μια σοβαρή διαταραχή του ισοζυγίου σε μέταλλα είναι δυνατόν να οδηγήσει σε θάνατο. Κάποια από τα βαρέα μέταλλα όμως δεν ανήκουν στην κατηγορία των θρεπτικών ιχνοστοιχείων και θεωρούνται τοξικά ακόμα και σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Τέτοια μέταλλά είναι το κάδμιο, ο μόλυβδος, ο υδράργυρος κ.α. Για αυτό το σκοπό έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι απομάκρυνσης των μετάλλων αυτών από το έδαφος όταν αυτά απαντώνται σε υψηλές συγκεντρώσεις (Asrari, 2014).

Τα μέταλλα απαντώνται με διάφορες μορφές στο έδαφος. Η ολική συγκέντρωση του κάθε μετάλλου είναι καθοριστικής σημασίας για την επιλογή κατάλληλης μεθόδου απορρύπανσης. Στο έδαφος τα μέταλλα είναι δυνατό να βρεθούν στις παρακάτω μορφές

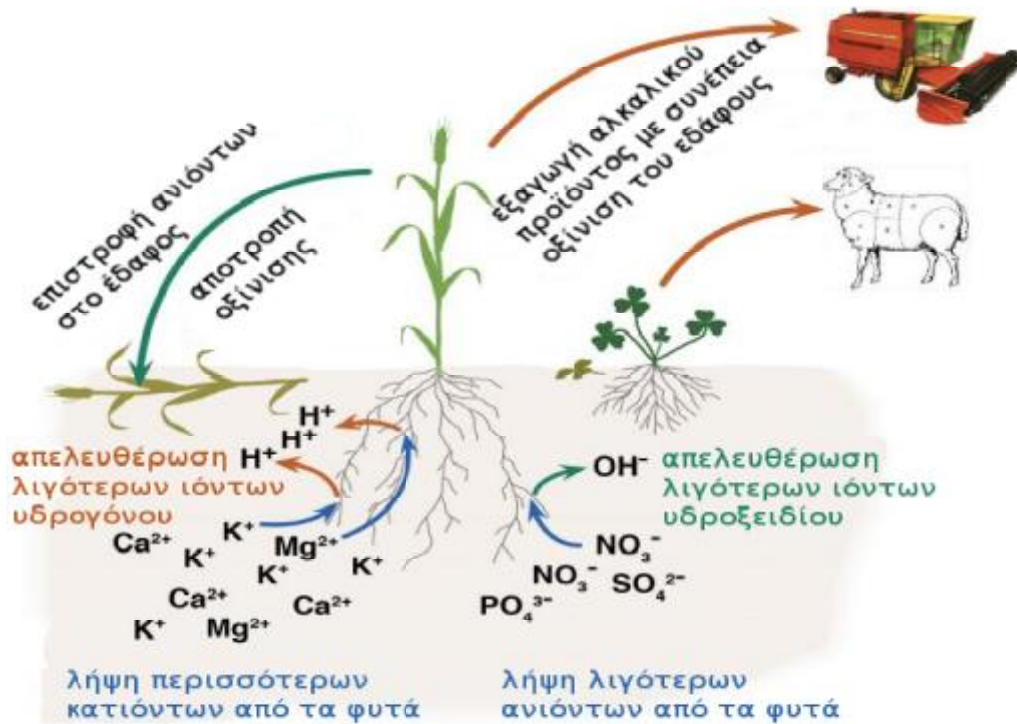
- διαλυμένα στο υδατικό διάλυμα του εδάφους
- να κατέχουν θέσεις μέσω ανταλλαγής στην ανόργανη ύλη του εδάφους
- να είναι ροφημένα στην ανόργανη ύλη του εδάφους
- στην αδιάλυτη οργανική ύλη του εδάφους ως στερεά σε καθαρή ή μη μορφή που καθιζάνουν

- στην δομή των ορυκτών (NAS et al., 1999, EPA, 1992)
- Τα μέταλλα που εισέρχονται στο περιβάλλον από ανθρώπινες δραστηριότητες απαντώνται σε όλες τις παραπάνω μορφές εκτός από τη δομή των ορυκτών.
- Οι διαφορετικές οξειδωτικές καταστάσεις των μετάλλων μπορούν να παρουσιάσουν διαφορετική χημική συμπεριφορά. Η χημική κατάσταση των μετάλλων και των μεταλλοειδών επηρεάζεται από το δυναμικό οξειδοαναγωγής το οποίο τελικά καθορίζει την κινητικότητα και τοξικότητα τους. Αλλάζοντας το δυναμικό οξειδοαναγωγής είναι δυνατή η μεταβολή της κινητικότητας τους. Τα οξείδια των μετάλλων είναι σταθερά σε συνθήκες περίσσειας οξυγόνου αλλά είναι δυνατό να διαλυθούν σε ανοξικές συνθήκες με συνέπεια την αύξηση της κινητικότητας του. Οι δυνατότητες ρόφησης του εδάφους αυξάνονται με την αυξημένη παρουσία οργανικής ύλης, αργίλων και υδροξειδίων του Fe⁻, Mn⁻ και Al⁻ (NAS et al., 1999; https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf).
- Η κινητικότητα των βαρέων μετάλλων εξαρτάται από το pH και τις οξειδοαναγωγικές συνθήκες των αποβλήτων. Γενικώς η κινητικότητα των βαρέων μετάλλων στο έδαφος αυξάνεται καθώς μειώνεται το pH (με εξαίρεση το σελήνιο Se). Αντίστοιχα τιμές pH μεγαλύτερες από 11 έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της κινητικότητας των βαρέων μετάλλων (EPA, 1986). Ταυτόχρονα τα αμφοτέρω μέταλλα όπως το χρώμιο και ο ψευδάργυρος είναι επίσης διαλυτά σε μεγάλα pH (https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf). Ανάλογα με το pH για τη καθίζηση των μεταλλικών οξειδίων η σειρά κινητικότητας στα διαλύματα εδάφους υπό οξειδωτικές συνθήκες μειώνεται ως εξής δισθενές μαγνήσιο= δισθενές ασβέστιο > δισθενής υδράργυρος > δισθενές μαγγάνιο > δισθενές κάδμιο > δισθενές νικέλιο= δισθενές κοβάλτιο= δισθενής μόλυβδος > δισθενές βηρύλλιο > δισθενής ψευδάργυρος= δισθενής χαλκός > τρισθενές χρώμιο > τρισθενής σίδηρος.
 Η αύξηση της κινητικότητας των μετάλλων στο έδαφος αυξάνει τη συγκέντρωσή τους στα υδατικά διαλύματα του εδάφους. Συνέπεια είναι η πρόσληψή τους από τα φυτά και η αύξηση της πιθανότητας να κατεισδύσουν προς τα υπόγεια ύδατα. Η κινητικότητα των μετάλλων μειώνεται σύμφωνα με τα στοιχεία Cd >> Zn >> Tl > Ni > Co > Cu > As,Cr >>Pb>>Hg (https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf).
 διάλυμα μόνο με κατάλληλη ακινητοποίηση σταθεροποίηση.

Οξειδωτικές συνθήκες επικρατούν όταν απουσιάζει η αποικοδόμηση της οργανικής ύλης και κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Οξειδωτικές συνθήκες εμφανίζονται σε εντατικώς καλλιεργούμενες γεωργικές εκτάσεις εξαιτίας της απομάκρυνσης οργανικής ύλης και στοιχείων του εδάφους. Οι αναγωγικές συνθήκες συνήθως επικρατούν όταν παρατηρείται περίσσεια οργανικής ύλης και η παροχή οξυγόνου είναι περιορισμένη (NAS et al., 1999). Στην αντιμετώπισή τους για την απορρύπανση του εδάφους είναι ανάγκη να κατανοηθεί πως τα μέταλλα απομακρύνονται από ένα



Σχήμα 3.2: Μέταλλα που απαντώνται στις τοποθεσίες αποκατάστασης στις ΗΠΑ (Πηγή: EPA, 2000).

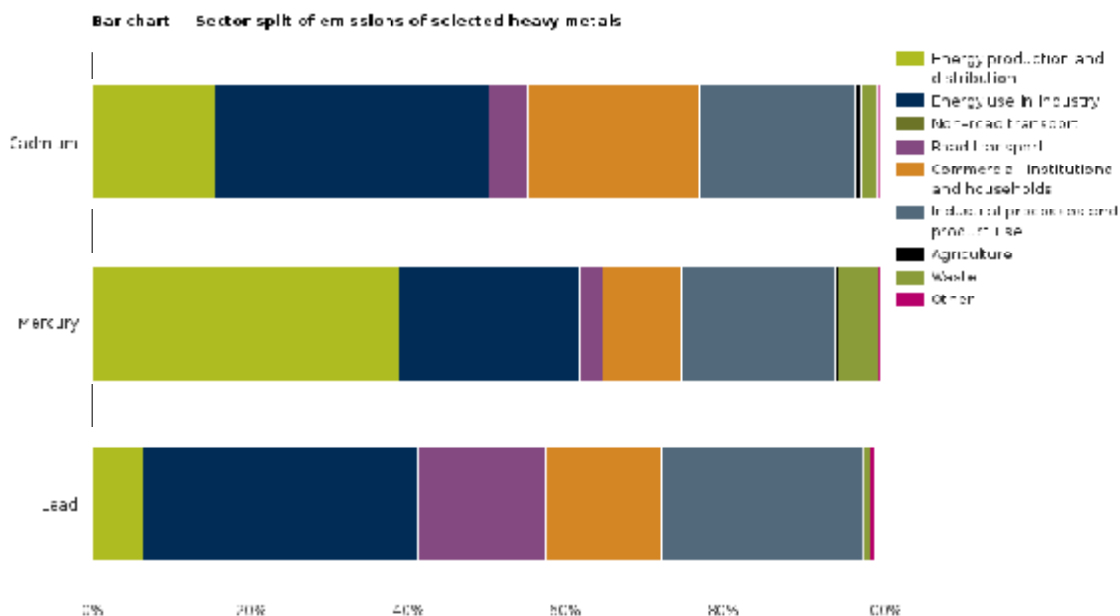


Σχήμα

3.3: Μηχανισμός δημιουργίας οξειδωτικών συνθηκών του εδάφους οφειλόμενες στην αγροτική χρήση (Πηγή: <https://www.agric.wa.gov.au/soil-acidity/causes-soil-acidity?page=0%2C1>).

3.2 ΠΗΓΕΣ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Τα μέταλλα αποτελούν φυσικά στοιχεία του εδάφους καταλαμβάνοντας ένα μικρό ποσοστό της ολικής σύστασης του εδάφους. Αναφέρονται σε μια μεγάλη ομάδα στοιχείων τα οποία έχουν οικονομική και βιολογική σημασία. Ορισμένα από αυτά είναι ιδιαίτερα τοξικά για τους οργανισμούς, όπως ο υδράργυρος (Hg), ο Μόλυβδος (Pb), το Κάδμιο (Cd), το Αρσενικό (As) προκαλώντας χρόνιες και οξείες βλάβες. Αντίθετα άλλα όπως τα σίδηρος (Fe), χαλκός (Cu), Ψευδάργυρος (Zn), κοβάλτιο (Co), Μαγγάνιο (Mn), Βανάδιο (V), είναι απαραίτητα για τη ζωή σε μικρές συγκεντρώσεις, αλλά σε μεγαλύτερες ευθύνονται για τοξικές δράσεις. Ενδιάμεσα βρίσκονται μέταλλα όπως το Σελήνιο (Se), το Νικέλιο (Ni), ο Κασσίτερος (Sn), το Χρώμιο (Cr) των οποίων η παρουσία είναι ευεργετική για τον οργανισμό εξαρτώμενα από τις ποσότητες που λαμβάνονται. Η παρούσα αντίληψη πως όλα τα μέταλλα είναι εν δυνάμει τοξικά στα έμβια όντα χωρίς να απαιτούνται υψηλές συγκεντρώσεις έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή αναθεώρηση του παραπάνω διαχωρισμού (Abioye et al., 2011). Εφόσον οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων δεν αποκαθίστανται σε ασφαλή επίπεδα αποτελούν απειλή για τον ανθρώπινο πληθυσμό, τη χλωρίδα και την πανίδα μιας περιοχής.



Σχήμα 3.4: Πηγές βαρέων μετάλλων για τις περιπτώσεις καδμίου, υδραργύρου και μόλυβδου.

Η αύξηση της συγκέντρωσης των βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον εξαιτίας ανθρώπινων δραστηριοτήτων έχει ως αποτέλεσμα την επιβάρυνση του εδάφους. Οι κύριες πηγές των βαρέων μετάλλων στο έδαφος από ανθρώπινες δραστηριότητες προέρχονται συνήθως από (Wuana et al, 2011): α) λιπάσματα, β) εντομοκτόνα, γ)

υπολείμματα ιλύος από επεξεργασία αποβλήτων, δ) βιομηχανικά απόβλητα, ε) μεταλλωρυχεία ή διεργασίες μεταλλουργιών. Στις Ηνωμένες Πολιτείες οι 2 στις 3 τοποθεσίες οι οποίες βρίσκονται στην εθνική λίστα προτεραιότητας για την αντιμετώπιση της ρύπανσης του εδάφους είναι αντιμέτωπες με ρύπανση οφειλόμενη σε βαρέα μέταλλα αποδεικνύοντας την έκταση του προβλήματος. Κάδμιο, χαλκός, μόλυβδος, υδράργυρος, νικέλιο, αρσενικό, χρώμιο, σελήνιο, και ψευδάργυρος θεωρούνται τα πιο επικίνδυνα μέταλλα και περιλαμβάνονται στη λίστα με τους ρύπους προτεραιότητας της αμερικανικής προστασίας περιβάλλοντος (EPA).

Τα μέταλλα διέπονται από χαρακτηριστικά τα οποία τα καθιστούν επικίνδυνα για το έδαφος. Αρχικά δεν είναι δυνατή η διάσπαση τους σε απλούστερες μορφές ούτε η καταστροφή τους. Συνεπώς τα μεταλλικά ιόντα δεν είναι δυνατό να αποικοδομηθούν από τους μικροοργανισμούς του εδάφους με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζονται από συνεχή κυκλοφορία. Τα βαρέα μέταλλα από το έδαφος τελικώς εισέρχονται στη τροφική αλυσίδα και αποτελούν κίνδυνο για τα τοπικά οικοσυστήματα. Συνέπεια της εισροής τους στη τροφική αλυσίδα είναι η εμφάνιση φαινομένων βιοσυσώρευσης. Άλλο χαρακτηριστικό των βαρέων μετάλλων είναι το γεγονός πως για την εκδήλωση επιβάρυνσης στο έδαφος δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη υψηλών συγκεντρώσεων. Ακόμη και σε μικρές συγκεντρώσεις της τάξης των 1-10 mg/L, είναι δυνατό να συντελέσουν σε εκδήλωση τοξικών φαινομένων (Ισαρη, 2015). Η συσώρευση τους στο έδαφος επιδρά στην αποδοτικότητα του εδάφους, στη μικροβιακή δραστηριότητα και την ανάπτυξη της χλωρίδας. Η έκθεση στα βαρέα μέταλλα συνήθως είναι χρόνια εξαιτίας της μεταφοράς τους μέσω της τροφικής αλυσίδας (USDA, 2000), καθώς εδάφη επιβαρυνόμενα με βαρέα μέταλλα μπορούν να παράγουν φαινομενικά κανονικά προϊόντα τα οποία όμως να είναι ακατάλληλα για τροφή από ανθρώπους ή την πανίδα. Τέλος, η αποθήκευση τους στα εδάφη μέσω της ρόφησης στην οργανική ύλη και τα ορυκτά του εδάφους είναι δυνατό να συντελέσει στην μακροπρόθεσμη επιβάρυνση του εδάφους, καθώς χωρίς τη δυνατότητα φυσικής αποικοδόμησης η τοξικότητα τους διαρκεί για χρόνια. Κάποια από αυτά μπορεί από μικρής τοξικότητας να μετατραπούν σε υψηλής τοξικότητας σε συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος, όπως ο υδράργυρος (EPA, 1992).

Πίνακας 3.1: Τα μέταλλα που περιλαμβάνονται στην οδηγία 2006/11/EK

Ψευδάργυρος	Χρώμιο	Αρσενικό	Γελλούριο	Βόριο
Χαλκός	Μόλυβδος	Αντιμόνιο	Άργυρος	Ουράνιο
Νικέλιο	Σελήνιο	Μολυβδένιο	Βάριο	Βανάδιο
Τιτάνιο	Κασσίτερος	Θάλλιο	Βηρύλλιο	Κοβάλτιο

Ένας τρόπος χαρακτηρισμού των επικίνδυνων ρυπογόνων ουσιών είναι και αυτός που δίνεται από την Οδηγία 2006/11/EK της Ε.Ε, για τη ρύπανση που προκαλείται από ορισμένες επικίνδυνες ουσίες που εκχέονται στο υδάτινο περιβάλλον η οποία τις χωρίζει σε δυο κατηγορίες:

1. Στις πλέον τοξικές (Κατηγορία 1 - Black List), όπου περιλαμβάνονται 6 οικογένειες οργανικών ρύπων και μόλις 2 βαρέων μετάλλων (υδράργυρος, κάδμιο και οι ενώσεις τους)
2. Στις λιγότερο τοξικές (Κατηγορία 2 - Grey List). Μεταλλοειδή και μέταλλα καθώς και οι ενώσεις αυτών

Ο σκοπός είναι να απαλειφθεί η ρύπανση του εδάφους και των υπόγειων υδάτων από τις ουσίες της Κατηγορίας 1 (Black List) και να περιορισθεί η ρύπανση από τις ουσίες της Κατηγορίας 2 (Grey List). Ομοίως στην οδηγία 2000/60/EK για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στο τομέα της πολιτικής των υδάτων. Από μελέτες (Hu et al., 2013) που έχουν πραγματοποιηθεί σε δείγματα πεδίου επιβεβαιώνεται πως η επιβάρυνση του εδάφους από βαρέα μέταλλα οφείλεται κυρίως σε ανθρωπογενής παράγοντες. Συγκεκριμένα, έδειξαν ότι το Cd, ο Cu, και ο Zn είχε συγκεντρώσεις δυο φορές πιο πάνω από το αναμενόμενο για την περιοχή κάτι το οποίο οφειλόταν καθαρά σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν την επιτακτική ανάγκη για την αποκατάσταση και την προστασία του ρυπασμένου εδάφους, αλλά και την ανάπτυξη νέων στρατηγικών για την μείωση της ρύπανσης από βαρέα μέταλλα κυρίως για περιοχές με αναπτυσσόμενη βιομηχανία και αστικοποίηση (Hu et al., 2013).

3.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΕΠΙΒΑΡΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ

Οι επιπτώσεις εξαιτίας της επιβάρυνσης του υπεδάφους από βαρέα μέταλλα έχει άμεσες και έμμεσες οι οποίες είναι αρνητικές επιπτώσεις σε σημαντικούς φυσικούς, κοινωνικούς και οικονομικούς πόρους. Οι διεργασίες που πραγματοποιούνται στο έδαφος κατά την επιβάρυνση αυτή προκαλεί είτε την βραχυχρόνια είτε την μακροχρόνια υποβάθμιση του. Όσον αφορά τις επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον, μερικές από αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η διάβρωση του εδάφους
- Η μείωση της οργανικής ύλης
- Η παρουσία τοπικής ή διάχυτης ρύπανση
- Η οξύνιση του εδάφους
- Η στεγανοποίηση/ σφράγιση των πόρων του εδάφους
- Η συμπύκνωση, μείωση της βιοποικιλότητας,
- Η άμεση επίπτωση στην ποιότητα του νερού και του αέρα,
- Η άμεση επίπτωση στις κλιματικές αλλαγές (EEK, 2006) καθώς διαταράσσονται οι ροές αερίων, υδάτων και ενέργειας (E.C., 2007; EEK, 2006).

Όσον αφορά το ανθρώπινο περιβάλλον οι επιπτώσεις από την ρύπανση του εδάφους με βαρέα μέταλλα παρουσιάζονται παρακάτω:

Υγεία: Η πιο σημαντική επίπτωση είναι στην ανθρώπινη υγεία. Τα βαρέα μέταλλα ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις μπορούν να προκαλέσουν τοξικές επιδράσεις, αλλεργίες – ερεθισμούς, καρκινογένεση, ή ακόμα και γενετική μετάλλαξη. Το ρυπασμένο έδαφος που έχει ρυπανθεί μπορεί να αποτελέσει άμεσο κίνδυνο για τον άνθρωπο. Η δράση των βαρέων μετάλλων στην ανθρώπινη υγεία μπορεί να προκληθεί. Οι αρνητικές επιδράσεις μπορεί να προκληθούν, είτε έμμεσα μέσω της κατανάλωσης φυτών και νερού που έχουν εκτεθεί στη ρύπανση (SEPA, 2010; EEK, 2006; <http://www.intergeo.hgr/page.asp?pid=51&gr=1>) είτε άμεσα με την επαφή του ανθρώπου με τη χημική ουσία που μπορεί να απορροφηθεί από το δέρμα ή να εισπνεύσει σκόνης που προέρχεται από το ρυπασμένο έδαφος.

Πίνακας 3.2 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία από βαρέα μέταλλα (Πηγή: Dixit et al., 2015)

Βαρέα μέταλλα	Όριο (ppm) [EPA]	Επιπτώσεις
Ag	0.10	Προκαλεί αλλαγή στο χρώμα του δέρματος σε γκρι ή μπλε-γκρι, προβλήματα στο αναπνευστικό σύστημα, ερεθισμό στο λαιμό, και πόνους στο στομάχι.
As	0.01	Επηρεάζει τις βασικές κυτταρικές διεργασίες όπως είναι η οξειδωτική φωσφορύλιωση και σύνθεση ATP.
Cd	5.0	Καρκινογόνο, μεταλλαξιογόνο, διατάραξη του θυροειδή, βλάβη των πνευμόνων και εύθραυστα οστά επηρεάζει τη ρύθμιση του ασβεστίου σε βιολογικά συστήματα.
Cr	0.1	Απώλεια μαλλιών.
Cu	1.3	Εγκεφαλικές βλάβες και στα νεφρά, αυξημένα επίπεδα καταλήγουν σε κίρρωση του ήπατος και χρόνια αναιμία, ερεθισμό στο στομάχι και έντερο,
Hg	2.0	Αυτοάνοσες ασθένειες, κατάθλιψη, υπνηλία, κόπωση, απώλεια μαλλιών, αϋπνία, απώλεια μνήμης, προβλήματα όρασης, τρόμος, διαταραχές ερεθισμού, εγκεφαλική βλάβη, πνευμονική και νεφρική ανεπάρκεια
Ni	0.2 (WHO)	Αλλεργικές δερματικές παθήσεις όπως κνησμός, καρκίνος των πνευμόνων, μύτη, ιγμόρεια, λαιμός μέσω συνεχούς εισπνοής, ανοσοτοξικό, νευροτοξικό, γονιδοτοξικό, επηρεάζουν τη γονιμότητα, προκαλεί τριχόπτωση.
Pb	15	Η υπερβολική έκθεση στα παιδιά προκαλεί μειωμένη ανάπτυξη, μειωμένη νοημοσύνη, απώλεια βραχυπρόθεσμης μνήμης, αναπηρίες και προβλήματα μάθησης και συντονισμού, κίνδυνος καρδιαγγειακής νόσου
Se	50	Η έκθεση σε διατροφή περίπου 300 μg/ημέρα επηρεάζει την λειτουργία του θυροειδή, εξασθένηση της δραστηριότητας λεμφοκυττάρων, ηπατοτοξικότητα και γαστρεντερικές διαταραχές
Zn	0.5	Ζάλη, κόπωση κ.α.

Νερό: ένα ρυπασμένο έδαφος μπορεί να προκαλέσει υποβάθμιση στην ποιότητα των υδάτων είτε επιφανειακών, είτε υπόγειων. Μέσω της κατείδυσης και της επιφανειακής απορροής η ρύπανση του υπεδάφους οδηγεί στην αλλοίωση των χαρακτηριστικών των υδάτων. Άμεση συνέπεια των τοξικών επιπτώσεων είναι η διαταραχή της ισορροπίας στην υδατική πανίδα και χλωρίδα.

Οικοσύστημα: Τα περισσότερα βαρέα μέταλλα λειτουργούν βιοσυσσωρευτικά στην λειτουργία των οργανισμών προκαλώντας έτσι βλάβες και αναστολή της ανάπτυξης, κιτρίνισμα ή χλώρωση των φύλλων στα φυτά ή ακόμα και απώλεια της βιοποικιλότητας (EEK, 2006; Singh and Kalamdhad, 2011).

Κτίρια και υλικά: Η παρουσία κάποιων μετάλλων μπορεί να προκαλέσουν διάβρωση σε ανόργανα υλικά όπως είναι το τσιμέντο, το μπετόν καθώς και σε οργανικά όπως τα πλαστικά. Η διάβρωση σωλήνων θεωρείται ιδιαίτερα επικίνδυνη όταν διέρχονται από μια ρυπασμένη περιοχή, κυρίως όταν πρόκειται για σωλήνες του δικτύου πόσιμων υδάτων. Σε αυτή την περίπτωση η ασφάλεια των εργαζομένων κατά την κατασκευή του δικτύου ύδρευσης αλλά και των κατοίκων της περιοχής που πρόκειται να καταναλώσουν το νερό είναι επιβλαβής.

Αισθητική. Μια ρυπασμένη περιοχή συμβάλει σημαντικά στην υποβάθμιση της αισθητικής της ευρύτερης περιοχής. Η νέκρωση της περιοχής από την χλωρίδα μπορεί να προκαλέσει την πλήρη απαξίωση της ίδιας της ρυπασμένης περιοχής όπως και των γειτονικών περιοχών. Οι επιβαρυνμένες περιοχές εγκαταλείπονται με αποτέλεσμα να καθίστανται άχρηστες και με την πάροδο του χρόνου να γίνονται αποδέκτες περαιτέρω ρυπαντικών φορτίων με ανεξέλεγκτη συνήθως διάθεση αποβλήτων (μπαζών, διαφόρων στερεών και υγρών αποβλήτων).

Ανάπτυξη: Η οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη μιας περιοχής μπορεί να επηρεαστεί από ένα ρυπασμένο πεδίο. Αυτή η περιοχή δεν μπορεί να αξιοποιηθεί με κανέναν τρόπο, με αποτέλεσμα την απώλεια εκτάσεων και πιθανών χρήσεων όπως καλλιέργεια, κατασκευές, χώρων αναψυχής και πρασίνου. Η ρυπασμένη περιοχή επηρεάζει και την γύρω έκταση, καθώς δεν περιορίζεται στα όρια της ρυπασμένης περιοχής, εφόσον κανείς δεν θέλει να ζει ή να δραστηριοποιείται σε περιβαλλοντικά υποβαθμισμένο χώρο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την υποβάθμιση της αξίας της γης και των κατοικιών. Επίσης υποβαθμίζεται και η ποιότητα ζωής των κατοίκων της περιοχής, εξαιτίας των φαινομένων μεταφοράς της ρύπανσης με τον αέρα και τα ύδατα στις κατοικήσιμες περιοχές. (EEA, 1999; E.C., 2007; Τζόβολου, 2011; <http://www.intergeo.hgr/page.asp?pid=51&gr=1>).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4- ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ/ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΛΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ

Οι υπάρχουσες τεχνολογίες εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών είναι αρκετά εξειδικευμένες και είναι δυνατόν να ταξινομηθούν σε ξεχωριστές κατηγορίες, βάσει κάποιου συγκεκριμένου κριτηρίου. Για παράδειγμα, οι χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες μπορούν κατ' αρχήν να διακριθούν σε in-situ και ex-situ, ανάλογα με το αν εφαρμόζονται απευθείας στο πεδίο (χωρίς την απομάκρυνση του ρυπασμένου εδάφους) ή αν περιλαμβάνουν την απομάκρυνση του ρυπασμένου μέσου και την επεξεργασία του μακριά από το πεδίο σε ειδικές εγκαταστάσεις.

Μια άλλου είδους διάκριση αφορά στους μηχανισμούς τους οποίους εκμεταλλεύεται κάθε τεχνολογία για την απομάκρυνση του εκάστοτε ρύπου, οι οποίοι αν είναι φυσικοί κατατάσσουν την αντίστοιχη τεχνολογία στις φυσικές μεθόδους επεξεργασίας εδαφών, αν είναι χημικοί στις χημικές μεθόδους, αν είναι βιοτικοί στις μεθόδους βιοεξυγίανσης, κτλ. Επίσης, η κατάταξη των τεχνολογιών αποκατάστασης εδαφών μπορεί να πραγματοποιηθεί και βάσει της επίδρασή τους στον εκάστοτε ανεπιθύμητο ρύπο, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει την πλήρη καταστροφή του (π.χ. βιοαποδόμηση), την απομάκρυνσή του από το ρυπασμένο πεδίο (π.χ. τεχνολογία άντλησης εδαφικού αέρα), τη δέσμευσή του (π.χ. φυτοεξυγίανση) ή απλά τον περιορισμό του (π.χ. σταθεροποίηση - στερεοποίηση) (<http://www.epa.gov/superfund/accomp/news/phyto.htm>; <http://www.epa.gov/oust/pubs/tums.htm>).

Στη συνέχεια, οι παρουσιαζόμενες τεχνολογίες εξυγίανσης εδαφών κατατάσσονται βάσει της φύσης των μηχανισμών απομάκρυνσης των υφιστάμενων ρύπων σε:

- βιολογικές,
- φυσικοχημικές
- θερμικές.

Τέλος, αξίζει να τονιστεί το γεγονός ότι οι τεχνολογίες εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών συμβάλουν έμμεσα, αλλά σημαντικά και στην προστασία ή ακόμη και στην αποκατάσταση των υποκείμενων υδροφορέων. Η απομάκρυνση ρύπων από την ακόρεστη ζώνη του εδάφους, όχι μόνο αποκλείει τη μεταφορά αυτών στην κορεσμένη ζώνη, αλλά αντιθέτως ευνοεί την αντίστροφη μεταφορά αυτών, δηλαδή από τα υπόγεια ύδατα προς την ακόρεστη ζώνη, κυρίως μέσω εξάτμισης (για περιπτώσεις που οι υφιστάμενοι ρύποι είναι πτητικοί).

4.1 ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΛΑΦΟΥΣ

Η αρχή λειτουργίας των βιολογικών μεθόδων αποκατάστασης του εδάφους βασίζονται στις παρακάτω προσεγγίσεις και περιλαμβάνουν (Chibuike et al., 2014):

- Ενίσχυση των βιοχημικών μηχανισμών για την αποτοξίνωση και υποβάθμιση των χημικών ουσιών που περιέχονται στο έδαφος. Περιλαμβάνονται η διαχείριση παραγόντων του εδάφους όπως η υγρασία, τα θρεπτικά, το pH, η προσθήκη οργανικών ουσιών, διαχείριση της ποσότητας του οξυγόνου που

περιέχεται στο έδαφος ώστε να επιτευχθούν αερόβιες ή αναερόβιες συνθήκες αποικοδόμησης.

- Εμπλουτισμός με εξωγενείς ή ειδικευμένους μικροοργανισμούς. Η χρήση διαφορετικών μικροοργανισμών για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων ρύπων.
- Εφαρμογή καθαρών ενζύμων τα οποία λειτουργούν ως καταλύτες για την βιολογική αποικοδόμηση.
- Απορρόφηση των ρύπων από τη χλωρίδα του εδάφους.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές βιοεξυγίανσης οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν είτε επί τόπου στο χώρο (in situ), είτε μετά από εκσκαφή του εδάφους (ex situ). Οι τεχνικές αυτές είναι οι εξής:

- In situ βιοεξυγίανση:
 - Ελεγχόμενη βιοεξυγίανση (Bioremediation)
 - Βιοαερισμός (Bioventing)
 - Φυτοεξυγίανση (Phytoremediation)
- Ex situ βιοεξυγίανση:
 - Επεξεργασία σε σωρούς (Biorpiles)
 - Βιοαντιδραστήρες (Bioreactors)

4.1.1 Ελεγχόμενη βιοεξυγίανση

Είναι μια μέθοδος που πραγματοποιείται η χρήση μικροοργανισμών για την απομάκρυνση οργανικών και ανόργανων ρύπων. Η μέθοδος βασίζεται στις μικροβιολογικές ενζυμικές δραστηριότητες για τη μετάλλαξη και αποικοδόμηση των ρύπων (Abioye, 2011). Σκοπός της μεθόδου είναι η διάσπαση της οργανικής μάζας σε βιομάζα και ακίνδυνα προϊόντα μεταβολισμού όπως διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο και ανόργανα άλατα (EPA, 1990). Για την επίτευξη αξιόλογων αποτελεσμάτων πρόκληση αποτελεί η δημιουργία των κατάλληλων συνθηκών στους μικροοργανισμούς σε διαφορετικά βάθη και τοποθεσίες με την παροχή θρεπτικών και το καθορισμό της κατάλληλης υγρασίας.

Η βιοεξυγίανση αποτελεί μια από τις υποσχόμενες μεθόδους για την αποκατάσταση εδάφους όπου περιέχονται οργανικοί και ανόργανοι ρύποι. Είναι μια διαδικασία που χαρακτηρίζεται από τη χρήση μικροοργανισμών και φυτών για την αποτοξίνωση ή την απομάκρυνση. Συνηθίζεται οι συνθήκες να προσαρμόζονται στις απαιτήσεις των μικροοργανισμών ώστε να επιταχύνεται η διαδικασία (Abioye, 2011), αλλά για την κατάλληλη μεταβολή των συνθηκών απαιτεί συνεχή παρακολούθηση (monitoring). Οι αρχικές προσπάθειες περιορίζονταν στην αντιμετώπιση υδρογονανθράκων. Η παροχή οξυγόνου και θρεπτικών γινόταν με τη χρήση διαλυμάτων νερού και της επανακυκλοφορίας του.

Η απόδοση της μεθόδου εμφάνιζε περιορισμούς εξαιτίας της χρήσης νερού για τη παροχή οξυγόνου. Η μικρή διαλυτότητα του στο νερό ήταν πρόβλημα. Η επόμενη γενιά χρησιμοποιείσει υπεροξειδίου του υδρογόνου για να παρέχει μια αποδοτικότερη μέθοδο στην παροχή οξυγόνου σε διαλυτή μορφή. Η χρήση του υπεροξειδίου είχε ως αποτέλεσμα τη δραματική αύξηση παροχή οξυγόνου με δυνατότητες παροχής 10 έως 50 φορές περισσότερα ισοδύναμα οξυγόνο συγκριτικά με τα αρχικά συστήματα αερισμού (NAS et al., 1997).

Πλεονεκτήματα της βιολογικής αποκατάστασης συγκριτικά με άλλες μεθόδους περιλαμβάνουν καταστροφή των ρύπων και όχι μεταφορά τους σε άλλο μέσο, ελάχιστη δυνατή έκθεση των εργαζόμενων στους ρύπους, μακροχρόνια προστασία των τοπικών

κοινωνιών, πιθανή μείωση της διάρκειας του χρόνου αποκατάστασης. Αποτελεί μια συμφέρουσα οικονομικά λύση για την αποκατάσταση συγκριτικά διότι είναι μια φυσική διαδικασία όπου δεν παράγονται τοξικά παραπροϊόντα. Επιπλέον παρέχει μόνιμη λύση ως αποτέλεσμα της ανοργανοποίησης των ρύπων στο περιβάλλον. Χαρακτηρίζεται ως οικολογική προσέγγιση στο ζήτημα της υποβάθμισης/επιβάρυνσης και ρύπανσης του εδάφους (Abioye, 2011).

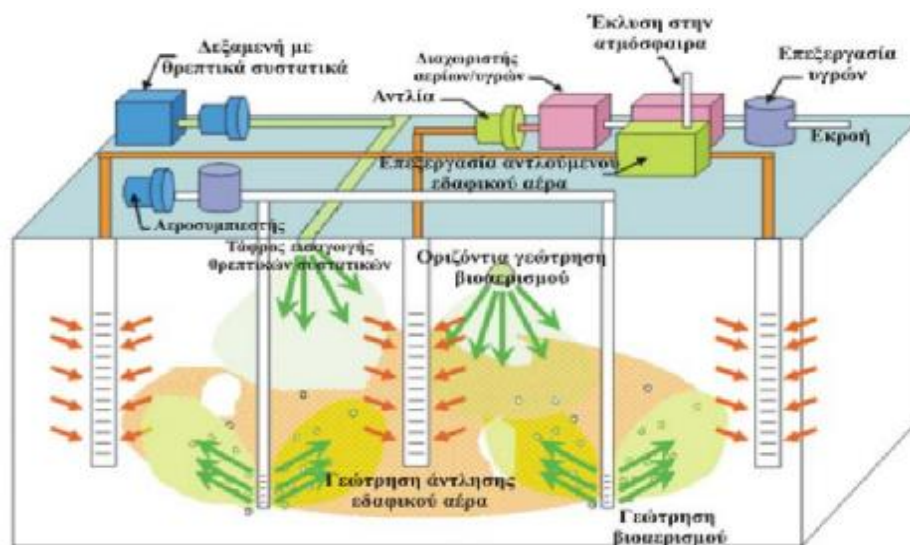
Στα μειονεκτήματα της μεθόδου μπορούν να συμπεριληφθούν το γεγονός πως δεν υπάρχει πλήρης αποκατάσταση καθώς κάποιο μικρό ποσοστό των ρύπων πάντα παραμένει στο έδαφος. Αποτέλεσμα είναι η απαίτηση εφαρμογής συμπληρωματικής μεθόδου ώστε να επιτευχθεί η πλήρης απομάκρυνση των ρύπων. Επίσης πολλές φορές τα προϊόντα που παράγονται από τους μικροοργανισμούς είναι άγνωστα με αποτέλεσμα να μην μπορεί να προβλεφθεί η συμπεριφορά τους (EPA, 1990). Επιπλέον, μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε μέρη όπου οι περιβαλλοντικές συνθήκες ευνοούν την μικροβιολογική δραστηριότητα και ανάπτυξη (Abioye, 2011). Η παρουσία αργίλων εξαιτίας της δυνατότητας τους για συγκράτηση μεγαλύτερων ποσοστών υγρασίας εμποδίζει τη διάχυση του οξυγόνου ενώ μεγάλες συγκεντρώσεις οργανικής ύλης μπορεί να οδηγήσουν στην αύξηση της μικροβιολογικής δραστηριότητας και την μηδένιση του διαθέσιμου οξυγόνου με συνέπεια την μεταβολή της μικροβιολογικής δομής σε αναερόβιες συνθήκες και των συνεπειών της πιθανής παραγωγής μεθανίου (Sims, 1990).

4.1.2 Βιοαερισμός

Η μέθοδος του βιοαερισμού (bioventing) αποσκοπεί στην in situ βιοαποικοδόμηση των οργανικών ρύπων που έχουν διαρρεύσει στο έδαφος της ακόρεστης ζώνης. Οι ρύποι οι οποίοι μπορούν να αντιμετωπιστούν με επιτυχία με την τεχνική του βιοαερισμού είναι κυρίως βιοαποικοδομήσιμα οργανικά συστατικά όπως βενζίνη, diesel, jet fuel, πετρέλαιο, μη χλωριωμένων διαλυτών, ορισμένων ειδών ζιζανιοκτόνα και PAHs (Φάμελλος, 2012).

Κύριος στόχος της διεργασίας του βιοαερισμού ρυπασμένων εδαφών είναι η αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου στο υπέδαφος με απευθείας εισαγωγή αέρα σε αυτό, μέσω κατάλληλων γεωτρήσεων (σχήμα 4.1). Η δράση αυτή πραγματοποιείται όταν ο ρυθμός φυσικής βιοαποικοδόμησης περιορίζεται από την έλλειψη οξυγόνου ([https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-](https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf)

[Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf](https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf)). Η ποσότητα του αέρα που παρέχεται είναι αποκλειστικά η απαιτούμενη από τους μικροοργανισμούς. Με την αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου στο έδαφος, ενισχύονται οι υπάρχοντες μικροοργανισμοί, που έχουν την ικανότητα να αποικοδομούν αερόβια τους υφιστάμενους οργανικούς ρύπους. Ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες του εδάφους, εκτός από την παροχή οξυγόνου μπορεί να κριθεί αναγκαία και η παροχή θρεπτικών (π.χ. φωσφόρου και αζώτου). Σκοπός της μεθόδου δεν είναι η εξάτμιση των ρύπων αλλά η αποδόμηση τους, αυτός ο περιορισμός της ροής του αέρα διαφέρει την μέθοδο από άλλες. Πρακτικά όμως, πάντοτε λαμβάνει χώρα ένα μικρό ποσοστό εξαέρωσης ρύπων.



Σχήμα 4.1: Ενδεικτικό σύστημα βιοαερισμού με παροχή θρεπτικών συστατικών σε συνδυασμό με τη τεχνολογία άντλησης εδαφικού αέρα (Πηγή: Γιδάρακος, 2008).

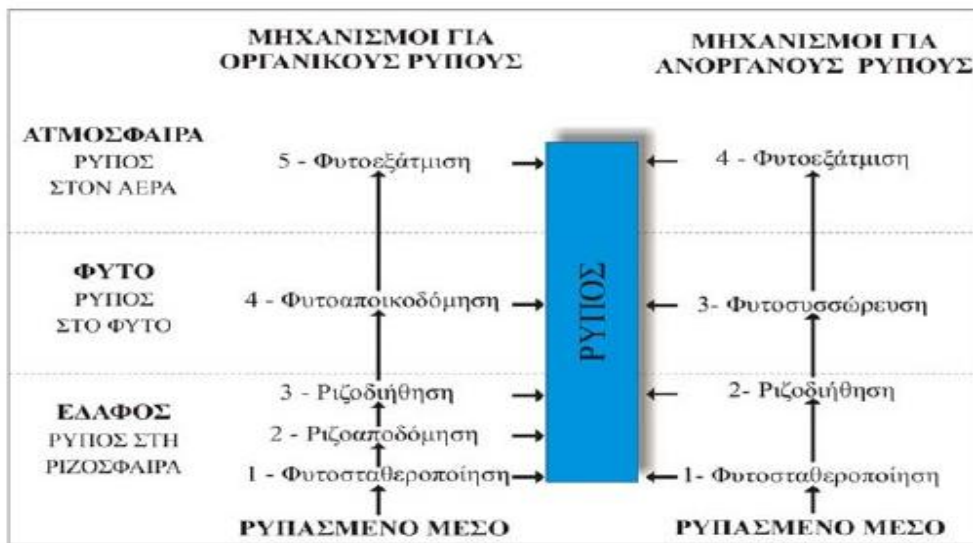
Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η διαθεσιμότητα κατάλληλου εξοπλισμού και η ευκολία εγκατάστασης. Η απλότητα σε μηχανολογικό εξοπλισμό και λειτουργία συμβάλλει στην ελάχιστη επιβάρυνση της τοποθεσίας οφειλόμενη στη μέθοδο. Απαιτούνται συγκριτικά περιορισμένοι ενεργειακοί πόροι καθώς η ροή αέρα που απαιτείται είναι μικρότερη συγκριτικά με άλλες μεθόδους. Έχει τη δυνατότητα να προσεγγίσει τοποθεσίες του υπεδάφους με περιορισμένη πρόσβαση (π.χ. κάτω από κτίρια). Είναι δυνατή η συνεργασία της με άλλες μεθόδους όπως η αεροδιασπορά (NAS et al., 1997; Φάμελλος, 2012; EPA, 2004; https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf). Υπάρχει η πιθανότητα με σωστή εφαρμογή της μεθόδου και παρακολούθησης των παραμέτρων του εδάφους να μην είναι απαραίτητη η χρήση εξοπλισμού για την αποκατάσταση των αερίων που εξέρχονται από το έδαφος. Το κόστος της μεθόδου είναι ανταγωνιστικό και οι χρόνοι εξυγίανσης σχετικά μικροί. Ο χρόνος που απαιτείται κυμαίνεται από 6 μήνες έως 2 χρόνια σε ιδανικές συνθήκες (EPA, 2006; EPA, 2004).

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνονται οι δυσκολίες εφαρμογής σε τοποθεσίες με υψηλή συγκέντρωση ρύπων. Οι υψηλές συγκεντρώσεις είναι δυνατό να έχουν τοξικά αποτελέσματα στους μικροοργανισμούς. Χωρίς μικροοργανισμούς του εδάφους είναι αδύνατη η εφαρμογή. Η απόδοση της μεθόδου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους, πιο συγκεκριμένα εξαρτάται από τη κοκκομετρία, τη διαπερατότητα και τη διαστρωμάτωση του εδάφους ώστε να είναι δυνατός ο αερισμός. Επιπλέον εξαρτάται από την παρουσία μικροοργανισμών, τη θερμοκρασία του εδάφους, τις συγκεντρώσεις θρεπτικών και την υγρασία του εδάφους τα οποία καθορίζουν το ρυθμό ανάπτυξης των μικροοργανισμών. Η ύπαρξη κορεσμένων πόρων του εδάφους δεν επιτρέπει τη διέλευση αέρα με άμεση συνέπεια η εφαρμογή της μεθόδου να περιορίζεται στην ακόρεστη ζώνη του υπεδάφους. Ο χρόνος που απαιτείται εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των ρύπων. Σημαντικό για την εφαρμογή της μεθόδου είναι οι προς απομάκρυνση ρύποι να παρουσιάζουν σχετικά χαμηλή

πητικότητα και υψηλή διαλυτότητα στο νερό, ώστε να αποτρέπεται η εξάτμισή τους και να παρατηρείται προτεραιότητα στην βιοαποικοδόμηση τους (EPA, 2004).

4.1.3 Φυτοεξυγίανση

Η φυτοεξυγίανση (phytoremediation) αποτελεί μια καινοτόμο in-situ τεχνολογία αποκατάστασης εδαφών, υπογείων υδάτων ή άλλου ρυπασμένου μέσου, που περιλαμβάνει την απομάκρυνση, τη μεταφορά, τη σταθεροποίηση και την καταστροφή οργανικών και ανόργανων ρύπων με την χρήση φυτών. Βασίζεται στη χρήση φυτών για την απομάκρυνση, περιορισμό ή μετάλλαξη διαφορετικών ρύπων (EPA, 2006). Με την πάροδο του χρόνου τα φυτά έχουν εξελίξει ποικίλους μηχανισμούς για την αντιμετώπιση τοξικών στοιχείων στο περιβάλλον τους. Τα φυτά παρουσιάζουν τη δυνατότητα αντιμετώπισης οργανικών ρύπων και βαρέων μετάλλων με διαφορετικούς μηχανισμούς. Συνέπεια των πολλών και διαφορετικών μηχανισμών είναι η μέθοδος να εμφανίζεται ελκυστική, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου το έδαφος είναι πιθανό να περιέχει συνδυασμό ρύπων. Η βέλτιστη εφαρμογή της μεθόδου παρατηρείται σε περιπτώσεις όπου οι συγκεντρώσεις των ρύπων χαρακτηρίζονται χαμηλές ή μεσαίες και η έκταση της περιοχής αποκατάστασης είναι μεγάλη. Οι δυσκολίες στην περίπτωση υψηλών συγκεντρώσεων οφείλονται στην πιθανότητα ύπαρξης τοξικών συνθηκών για τα φυτά. Τουλάχιστον να συγκεντρώνει περισσότερες πιθανότητες επιτυχίας συγκριτικά με τις φυσικές και χημικές μεθόδους. Τα φυτά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ποικίλλουν και η επιλογή τους μπορεί να προσαρμοστεί στους ρύπους καθώς και στα τοπικά οικολογικά χαρακτηριστικά (NAS et al., 1999). Η επιλογή του κατάλληλου μηχανισμού φυτοεξυγίανσης για συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται από το είδος και τις ιδιότητες των υφιστάμενων ρύπων (π.χ. βιοαποδομησιμότητα, πτητικότητα, τάση προσρόφησης, υδροφοβία ή υδροφιλία, κ.α.), το χρησιμοποιούμενο φυτό (π.χ. είδος, μέγεθος, ηλικία), καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά του προς εξυγίανση εδάφους (Γιδαράκος, 2008).



Σχήμα 4.2: Μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων από το υπέδαφος στο φυτό και από το φυτό στην ατμόσφαιρα κατά την εφαρμογή της τεχνολογίας της φυτοεξυγίανσης (Πηγή: Γιδαράκος, 2008).

Οι μηχανισμοί αντιμετώπισης των φυτών όπως φαίνονται στο σχήμα 4.2 σε περιπτώσεις ρύπανσης είναι:

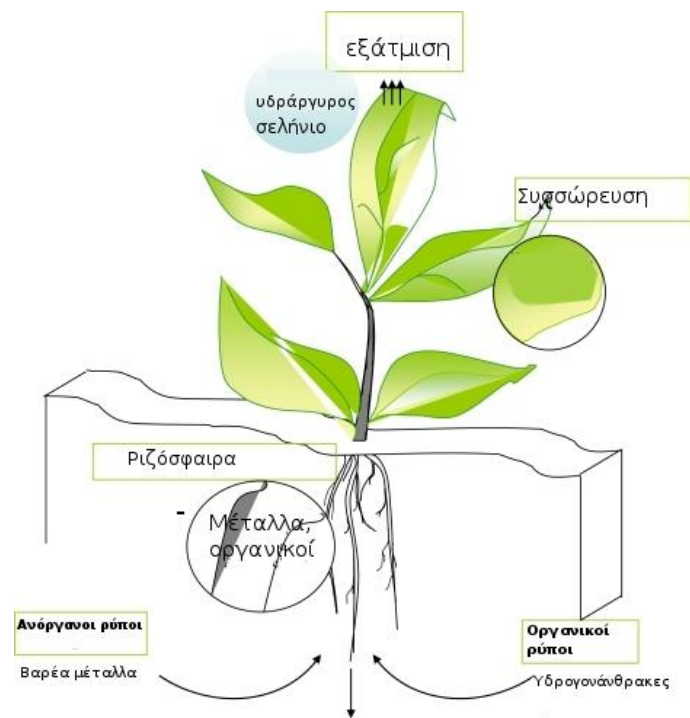
Ριζοαποδόμηση (rhizodegradation): Ουσιαστικά πρόκειται για μια έμμεση μέθοδο βιοαποδόμησης από τους μικροοργανισμούς του εδάφους με τη βοήθεια του ριζικού συστήματος των φυτών. Η παρουσία του ριζικού συστήματος των φυτών προκαλεί συνθήκες καλύτερου αερισμού στο έδαφος και βοηθά στη ρύθμιση της υγρασίας του εδάφους δημιουργώντας ευνοϊκές συνθήκες για τους μικροοργανισμούς. Επιπλέον η βιοαποικοδόμηση ενισχύεται από την παρουσία ενώσεων όπως ζάχαρα, αμινοξέα κτλ. τα οποία προέρχονται από το ριζικό σύστημα. Πλεονέκτημα της παρουσίας των παραπάνω ενώσεων αποτελεί ο παράπλευρος μεταβολισμός ρύπων από τους μικροοργανισμούς, κατά την αποδόμηση των ενώσεων αυτών. Καθώς οι μικροοργανισμοί καταναλώνουν τα θρεπτικά του εδάφους συχνά είναι απαραίτητη η προσθήκη θρεπτικών ώστε να διατηρείται ο πληθυσμός τους. Ο χώρος δράσης του μηχανισμού εκτείνεται περίπου 1 mm από κάθε ρίζα, επομένως φυτά με πυκνό ριζικό σύστημα αποτελούν κατάλληλες επιλογές. Ο μηχανισμός έχει τη δυνατότητα αντιμετώπισης οργανικών ρύπων (EPA, 2006; Γιδαράκος, 2008).

Ριζοδιήθηση (Rhizofiltration): Η διήθηση με τη βοήθεια του ριζικού συστήματος των φυτών στην πραγματικότητα είναι η ρόφηση των ρύπων στις ρίζες τους (USDA, 2000). Αυτό είναι δυνατό όταν οι ρύποι βρίσκονται εντός υδατικού διαλύματος γύρω από το ριζικό σύστημα. Ο μηχανισμός εφαρμόζεται ήδη στην επεξεργασία λυμάτων με πλεονεκτήματα την υψηλή απόδοση, το χαμηλό κόστος και την ευκολία στην εφαρμογή (EPA, 2006). Ο συγκεκριμένος μηχανισμός μπορεί να αποβεί ιδιαίτερα χρήσιμος στην περίπτωση σχετικά ρηχών υδροφορέων για την εξυγίανση υπογείων υδάτων. Τα φυτά αναπτύσσονται σε θερμοκήπια με υδροπονικές μεθόδους. Σταδιακά πραγματοποιείται προσθήκη των ρυπασμένων υδάτων ώστε να εγκλιματιστούν τα φυτά στις νέες συνθήκες. Στη συνέχεια τα φυτά τοποθετούνται στην προς

εξυγίανση τοποθεσία όπου οι ρίζες συλλέγουν μέσω του νερού τους ρύπους. Μόλις οι ρίζες κορεστούν με τους ρύπους τα φυτά συλλέγονται μαζί με τις ρίζες τους και οδηγούνται για περαιτέρω επεξεργασία. Η μέθοδος εφαρμόστηκε στο Τσέρνομπιλ της Ουκρανίας όπου ηλίανθοι χρησιμοποιήθηκαν με αυτόν το τρόπο για την απομάκρυνση ραδιενεργών ρύπων από τα υπόγεια ύδατα (USDA, 2000).

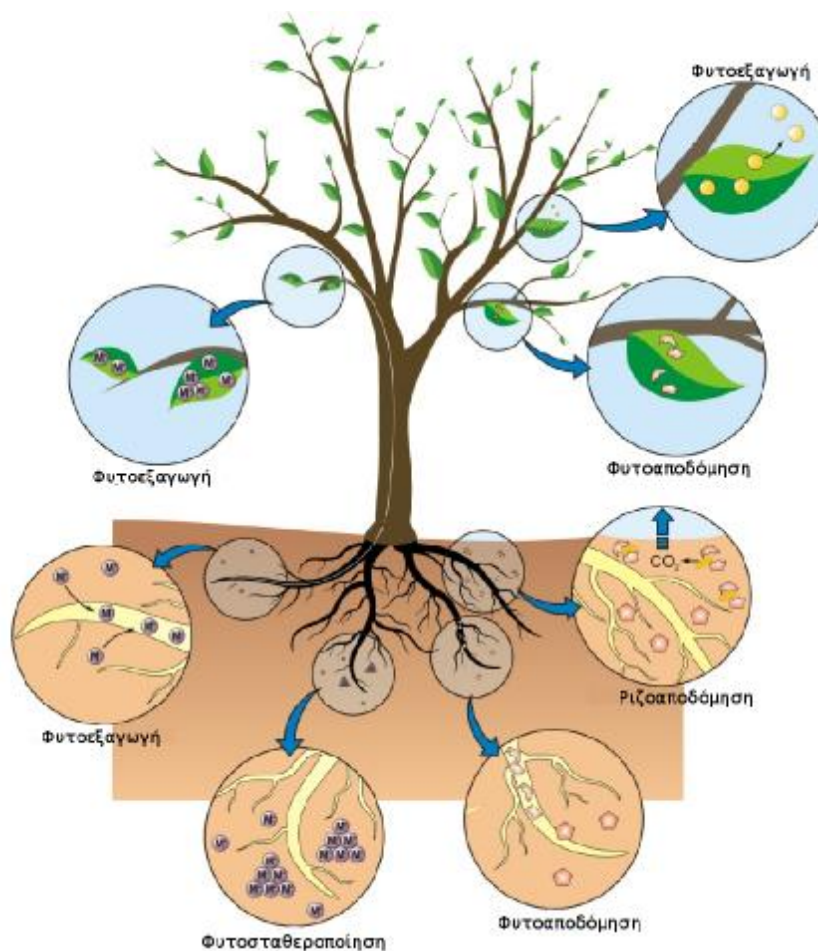
Φυτοαποδόμηση (phytodegradation) ή Φυτομετατροπή (phytotransformation): Καλείται η πρόσληψη των ρύπων από το υπέδαφος και μεταβολισμός αυτών εντός του φυτού, στις ρίζες, στον κορμό ή στα φύλλα.

Φυτοεξάτμιση (Phytovolatilization): Ο μηχανισμός βασίζεται στη δυνατότητα ορισμένων φυτών να απορροφούν ρύπους από το υπέδαφος, να τους μεταλλάσσουν σε ακίνδυνες μορφές και στη συνέχεια να διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα μέσω των φύλλων. Ο μηχανισμός χρησιμοποιείται κυρίως για οργανικούς ρύπους όμως έχει προσελκύσει ενδιαφέρον για μέταλλα όπως ο υδράργυρος, το σελήνιο και το αρσενικό τα οποία φαίνεται πως υπάρχει δυνατότητα μεταφοράς τους στην ατμόσφαιρα μέσω της μετάλλαξης τους σε ακίνδυνες μορφές (πχ για το Se σε C_2H_6Se) και κατόπιν απελευθέρωση τους στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 4.3: Απεικόνιση λειτουργίας μηχανισμών φυτοεξυγίανσης με την εκμετάλλευση του ριζικού συστήματος (Πηγή: Krystofova et al., 2009)

Εξαγωγή ή φυτοεκχύλιση (phytoextraction): Η μέθοδος εφαρμόζεται για ανόργανους ρύπους σε όλα τα υποστρώματα του εδάφους. Τα φυτά με τη βοήθεια του ριζικού τους συστήματος απορροφούν τους ρύπους μεταφέροντας τους και συσσωρεύοντας τους σε μέρη όπως ο κορμός, τα φύλλα, οι καρποί κτλ. Η μέθοδος χρησιμοποιεί συγκεκριμένα φυτά που καλούνται υπερσυσσωρευτές (hyperaccumulators) τα οποία απορροφούν ασυνήθιστα μεγάλες ποσότητες μετάλλων συγκριτικά με άλλα φυτά. Τα συγκεκριμένα φυτά μπορεί να περιέχουν περισσότερο και από 1,000 milligrams ανά κιλό κοβαλτίου, χαλκού, χρωμίου, μολύβδου, νικελίου ή και 10,000 milligrams ανά κιλό (1%) μαγνησίου, ψευδαργύρου σε ξηρή ύλη (USDA, 2000). Έχουν παρατηρηθεί φυτά με ακόμη μεγαλύτερες δυνατότητες συλλογής μετάλλου. Τα φυτά αυτά μπορεί



Σχήμα 4.4: Οι μηχανισμοί αντιμετώπισης των φυτών σε περιπτώσεις ρύπανσης.

να χρησιμοποιηθούν ακόμη και ως ορυκτά για την παραγωγή μετάλλων στη βιομηχανία (USDA, 2000). Η φυτοεξαγωγή δυστυχώς δεν είναι ικανή να αντιμετωπίσει όλα τα μέταλλα με τον ίδιο τρόπο. Είναι ευκολότερη με μέταλλα όπως το νικέλιο, ο χαλκός και ο ψευδάργυρος καθώς τα συγκεκριμένα μέταλλα προτιμώνται από σχεδόν 400 φυτά με υπερσυσσωρευτικές δυνατότητες. Ο μολύβδος αποτελεί το συνηθέστερο ρύπο του εδάφους. Τα φυτά όμως δεν έχουν

τη δυνατότητα πρόσληψης του με φυσικό τρόπο. Η χρήση προσθέτων ώστε να γίνει βιοδιαθέσιμος είναι δυνατός (USDA, 2000). Ανάλογα πρόσθετα για την απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων από το έδαφος μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Εγείρονται όμως ερωτήσεις σχετικά με την δράση που έχουν τέτοια πρόσθετα στο περιβάλλον καθώς και στη δυνατότητα λήψης των υπόλοιπων ρύπων.

Φυτοσταθεροποίηση (phytostabilization): Σταθεροποίηση για οργανικούς και ανόργανους ρύπους σε όλα τα υποστρώματα η φυτοσταθεροποίηση είναι η χρήση φυτών που δεν συλλέγονται με σκοπό την σταθεροποίηση ή ακινητοποίηση των ρύπων στο έδαφος και τα υπόγεια ύδατα. Χρησιμοποιείται κυρίως στην αντιμετώπιση ρύπανσης οφειλόμενη σε βαρέα μέταλλα. Τα μέταλλα απορροφώνται και συλλέγονται από τις ρίζες. Φυτά με ανοχή στα μέταλλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σημεία όπου η φυσική βλάστηση δεν μπορεί να αντεπεξέλθει μειώνοντας το κίνδυνο διάβρωσης από το νερό και το έδαφος αλλά και το leaching. Διαφορετικός τρόπος λειτουργίας του μηχανισμού είναι η σταθεροποίηση του ρυπασμένου εδάφους από το ριζικό σύστημα. Αποτέλεσμα είναι η μείωση της κινητικότητας των ρύπων, καθώς περιορίζεται η κίνηση του ρύπου στο υπόγειο ύδωρ και τον αέρα καθώς και η βιοδιαθεσιμότητα για την τροφική αλυσίδα (Black, 1995) καθώς οι ρύποι παραμένουν στη ριζόσφαιρα είναι απαραίτητη η διατήρηση των φυτών για την αποφυγή μελλοντικής διαφυγής των ρύπων σε περίπτωση που τα φυτά για κάποιες αιτίες (θάνατος, καταστροφή). Η συντήρηση των φυτών περιλαμβάνει τη χρήση πρόσθετων του εδάφους (EPA, 2006). Μετά την πάροδο χρονικού διαστήματος απαιτούμενο για την ανάπτυξη του φυτού θερίζονται και οδηγούνται είτε σε καύση είτε σε κομποστοποίηση για την ανακύκλωση των μετάλλων. Αρκετοί κύκλοι ανάπτυξης και συλλογής απαιτούνται για την μείωση των επιπέδων ρύπανσης. Αν το συλλεγόμενο προϊόν καίγεται η στάχτη μπορεί να αποτεθεί σε ειδικό χώρο συλλογής απορριμάτων. Πλεονέκτημα αποτελεί σημαντικά μειωμένος όγκος του προϊόντος συγκριτικά με την εκσκαφή και απόθεση του εδάφους (Black, 1995). Μετά το τέλος ζωής των φυτών ή της δυνατότητας βιοσυσσώρευσης ρύπων, αυτά θα πρέπει πλέον να απομακρυνθούν από το πεδίο και να διαχειριστούν ως απόβλητα, ανάλογα πάντα με την περιεκτικότητά τους σε ρύπους, την τοξικότητά τους και γενικότερα την επικινδυνότητα, που παρουσιάζουν. Βάσει των εκάστοτε χαρακτηριστικών των «ρυπασμένων» φυτών (π.χ. όγκο, μάζα, περιεχόμενους ρύπους, κα.), μπορεί να επιλεγεί μια από τις ακόλουθες πρακτικές διαχείρισης:

- κομποστοποίηση,
- αποτέφρωση,

διάθεση σε ειδικούς χώρους (Γιδαράκος, 2008).

Πλεονεκτήματα: Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η εφαρμογή της σε μεγάλες επιφάνειες, δηλαδή σε τοποθεσίες όπου παρατηρείται μεγάλη διασπορά των ρύπων ή μεγάλος αριθμός μικρών θυσάνων. Ειδικότερα σε αστικές περιοχές με μεγάλης έκτασης «brownfields», οι οποίοι δεν μπορούν να αποκατασταθούν εξαιτίας του κόστους χρήσης άλλων μεθόδων, η φυτοεξυγίανση αποτελεί μια ρεαλιστική

προσέγγιση είτε αυτόνομα είτε σε συνεργασία με κάποια άλλη μέθοδο. Κατά τη διαδικασία οι «brownfields» μετατρέπονται σε αισθητικά όμορφους χώρους πρασίνου (Meuser, 2010).

Η αισθητική ευχαρίστηση που προσφέρει η μέθοδος κατά τη λειτουργία της αποτελεί επιπλέον πλεονέκτημα. Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί και η αποτελεσματικότητα της μεθόδου στην αντιμετώπιση μεγάλης ποικιλίας ρύπων. Η μέθοδος δύναται να ενισχυθεί μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο αποκατάστασης υιοθετώντας κοινές γεωπονικές πρακτικές όπως η χρήση θρεπτικών ουσιών και άρδευσης καθώς οι διαθέσιμες θρεπτικές ουσίες είναι δυνατό να εξαντληθούν ταχύτατα επειδή οι μικροβιολογικές κοινότητες επεξεργάζονται τους ρύπους. Επίσης η προετοιμασία με την παροχή κατάλληλων ενζύμων και χημικών ουσιών μπορεί να οδηγήσει στην ταχύτερη πρόσληψη και επεξεργασία των ρύπων μετατρέποντας τους από πολύπλοκες χημικές ενώσεις σε απλούστερες (NAS et al., 1997). Η φυτοεξυγίανση είναι περιβαλλοντικά φιλική μέθοδος, καθώς δεν παράγει σημαντικά απόβλητα (Γιδαράκος, 2008). Η μέθοδος αυτή έχει μακροχρόνια εφαρμογή και συνεπώς υφίσταται η σχετική εμπορική εμπειρία. Το κόστος εφαρμογής είναι χαμηλό και η εφαρμογή είναι σχετικά εύκολη καθώς δεν απαιτεί τη χρήση ειδικού εξοπλισμού ή την κατανάλωση ενέργειας (EPA, 2006).

Επιτρέπει την ανάκτηση ορισμένων ρύπων (π.χ. μετάλλων), μετά την απομάκρυνσή τους από το έδαφος. Η υιοθέτηση της μεθόδου θεωρείται ως προστατευτική για το έδαφος καθώς αποφεύγονται οι ανθρώπινες επιρροές. Επιτρέπει τη μετέπειτα χρήση του εξυγιασμένου εδάφους, δεδομένου ότι δεν μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά του (όπως π.χ. σταθεροποίηση – στερεοποίηση ή χημική έκπλυση). Αποτρέπει την εξάπλωση των υφιστάμενων ρύπων, προστατεύοντας παράλληλα το έδαφος από τον άνεμο, τη βροχή και γενικότερα τη διάβρωση. Συνεπώς η προσέγγιση γνωρίζει μεγάλα ποσοστά αποδοχής από το κοινό. Τέλος μπορεί να συνδυαστεί με άλλες τεχνολογίες εξυγίανσης.

Μειονεκτήματα: Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται οι σχετικά μικροί ρυθμοί συλλογής των ρύπων από τα φυτά (EPA, 2006). Δεν μπορεί να επιφέρει άμεσα αποτελέσματα εξυγίανσης, δεδομένου ότι απαιτείται η διέλευση ενός εύλογου χρονικού διαστήματος για την ανάπτυξη και την προσαρμογή των φυτών στο προς επεξεργασία πεδίο. Αν και έχουν αναφερθεί περιπτώσεις όπου η εξυγίανση τοποθεσίας πραγματοποιήθηκε σε δύο καλοκαίρια, η μέθοδος απαιτεί μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα συγκριτικά με άλλες μεθόδους εξυγίανσης του εδάφους. Συνήθως απαιτεί την πάροδο 1 έως 15 ετών εξαρτώμενη από διάφορους παράγοντες (είδος φυτού, εδαφικά χαρακτηριστικά, κλίμα κτλ.). Ένας ιδιώτης δεν έχει την οικονομική δυνατότητα αλλά και την υπομονή να περιμένει για τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα ώστε να μπορεί να εκμεταλλευτεί την ιδιοκτησία του. Δεν είναι δυνατή η εφαρμογή της σε εδάφη με υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων διότι είναι δυνατόν να έχουν τοξική επίδραση στα χρησιμοποιούμενα φυτά, και τους μικροοργανισμούς του εδάφους. Επιπλέον οι εποχικές διακυμάνσεις (χειμώννας) συμμετέχουν στην ανάπτυξη των φυτών δυσχεραίνοντας το ζήτημα του χρόνου αποκατάστασης. Γενικότερα υπάρχει εξάρτηση από τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής.

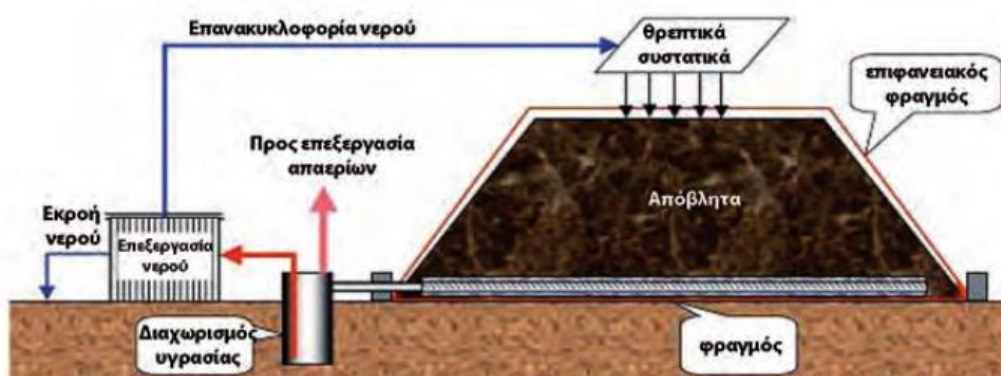
Υπάρχει ο κίνδυνος επιρροής της τροφικής αλυσίδας και της ανθρώπινης υγείας. Ο μεγαλύτερος για την υγεία υφίσταται στα εδώδιμα λαχανικά όπως το λάχανο και το σπανάκι που λαμβάνονται άμεσα. Έμμεσοι κίνδυνοι προέρχονται από τη λήψη των φυτών από κοπάδια της περιοχής (USDA, 2000). Συνέπειες από τη χρήση της μεθόδου

υπάρχουν και για τα τοπικά οικοσυστήματα στην περίπτωση λήψης των φυτών από την πανίδα της περιοχής. Η επίπτωση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία όσον αφορά τα μέταλλα καθώς έχουν το χαρακτηριστικό της συσσώρευσης (EPA, 2006).

Είναι δυνατόν να προκαλέσει μεταφορά ρύπων από ένα περιβαλλοντικό μέσο σε κάποιο άλλο περιβαλλοντικό μέσο (π.χ. από το έδαφος στον αέρα). Η προσθήκη εδαφοβελτιωτικών για την ανάπτυξη των φυτών, μπορεί να οδηγήσουν στην κινητικότητα των ρύπων και τη μεταφορά τους στα υπόγεια ύδατα (NAS et al., 1999), αλλά και σε αύξηση του κόστους. Το βάθος της ζώνης επεξεργασίας είναι περιορισμένο (ουσιαστικά ταυτίζεται με τη ζώνη εδαφικού ύδατος), με αποτέλεσμα η εφαρμογή της να είναι αποτελεσματική μόνο σε επιφανειακά ρυπασμένα εδάφη και ρηχούς υδροφορείς. Καθώς η επεξεργασία των ρύπων βασίζεται στην ύπαρξη του ριζικού συστήματος των φυτών το βάθος ικανό για αποκατάσταση δεν εκτείνεται παραπάνω από 1 ή 2 μέτρα. Το κόστος της είναι δυνατόν να αυξηθεί, λόγω της ανάγκης ειδικής επεξεργασίας και διάθεσης των χρησιμοποιούμενων φυτών (Γιδαράκος, 2008).

4.1.4 Επεξεργασία σε σωρούς

Η μέθοδος της επεξεργασίας σε σωρούς (biopiles)_βασίζεται στην βιολογική αποδόμηση των ρύπων. Απαιτείται η εκσκαφή του ρυπασμένου εδάφους. Στη συνέχεια, σωροί εδάφους σχηματίζονται είτε στην τοποθεσία είτε σε γειτονική, περικλείοντας σωλήνες αερισμού που χρησιμοποιούν αντλίες και με την προαιρετική προσθήκη θρεπτικών ώστε να ενισχυθεί η μικροβιολογική δραστηριότητα. Οι σωροί που σχηματίζονται καλύπτονται ή περιορίζονται με τη χρήση αδιαπέρατων υλικών/ γεωφασμάτων για την διαχείριση των απορροών είτε υγρών είτε αέριων. Ταυτόχρονα συντελούν στην αύξηση της θερμοκρασίας ώστε να επιτυγχάνονται ιδανικές συνθήκες για τους μικροοργανισμούς. Ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5. Η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως για την αποκατάσταση εδαφών όπου περιέχονται οργανικοί ρύποι.



Σχήμα 4.5: Απεικόνιση *ex-situ* βιοεξυγίανσης με τη μέθοδο της επεξεργασίας σε σωρούς (Πηγή: Φάμελλος, 2012).

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η απλότητα στο σχεδιασμό και την εφαρμογή όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6. Επιπλέον αποτελεί οικονομικά συμφέρουσα επιλογή. Ο χρόνος που απαιτείται είναι μικρός. Ταυτοχρόνως η απαιτούμενη επιφάνεια γης είναι μικρότερη συγκριτικά με άλλες ήπιες βιολογικές μεθόδους.



***Σχήμα 4.6:** Βιοεξυγίανση εδαφών ρυπασμένων με πετρελαιοειδή με τη μέθοδο επεξεργασίας με σωρούς εξοπλισμένοι με σύστημα απομάκρυνσης αερίων.*

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται πως η παρουσία βαρέων μετάλλων μπορεί να συντελέσει στον περιορισμό της βιολογικής δραστηριότητας. Είναι πολύ δύσκολο να πετύχει πλήρης αποκατάσταση, πάντα κάτι υπολείπεται. Η παραγωγή αερίων κατά την εφαρμογή είναι πιθανό να απαιτεί την περαιτέρω επεξεργασία τους πριν την αποδέσμευση τους στο περιβάλλον. Σημαντικό περιορισμό και αύξηση του κόστους αποτελεί το γεγονός πως απαιτείται η εκσκαφή του ρυπασμένου εδάφους με όλα τα μειονεκτήματα που συνοδεύουν την εκσκαφή. Για μικρές περιοχές ίσως να είναι οικονομικά προτιμότερη η μετακίνηση του ρυπασμένου εδάφους σε άλλες περιοχές με δυνατότητες αποκατάστασης. Η στασιμότητα του σωρού συνήθως έχει ως αποτέλεσμα την ανομοιότητα της διαδικασίας.

4.1.5 Βιοαντιδραστήρες

Μέθοδος η οποία εφαρμόζεται *ex situ*, συνήθως σε κατάλληλες εγκαταστάσεις με τον απαιτούμενο εξοπλισμό. Ο βιοαντιδραστήρας αποτελεί ένα γενικό όρο για την περιγραφή ενός μηχανικού συστήματος. Στην πραγματικότητα πρόκειται για δεξαμενές οι οποίες υποστηρίζουν βιολογικές διεργασίες σε ελεγχόμενες συνθήκες, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία των μικροοργανισμών. Οι αντιδραστήρες μπορεί να είναι κλειστοί ή σε μορφή λίμνης (βιολογικός καθαρισμός). Η μέθοδος εφαρμόζεται για την αποκατάσταση εδάφους ρυπασμένου με πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες,

οργανικούς διαλύτες, εντομοκτόνα, και άλλες οργανικές ενώσεις ενώ σπάνια εφαρμόζεται για την αντιμετώπιση ανόργανων ρύπων.

Χρησιμοποιείται συνήθως για την αποκατάσταση εδαφών που παρουσιάζουν ανομοιογένειες, χαρακτηρίζονται από μικρή περατότητα ή σε περιπτώσεις όπου ο χρόνος αποκατάστασης έχει μεγάλη σημασία. Πραγματοποιείται εκσκαφή του ρυπασμένου έδαφος το οποίο στη συνέχεια αναμειγνύεται με νερό και προστίθενται ουσίες. Στη συνέχεια το μείγμα τοποθετείται σε δοχείο. Μικροοργανισμοί που περιέχονται στο έδαφος ή διαφορετικοί μικροοργανισμοί, προσροφούν ή αποικοδομούν τους ρύπους. Το μείγμα διατηρείται σε ελεγχόμενες συνθήκες, με προτεραιότητα στην μεγιστοποίηση της βιολογικής δραστηριότητας, με την επιλογή της ιδανικής θερμοκρασίας, της συγκέντρωσης των ρύπων, το ποσοστό αερισμού και άλλους παράγοντες, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του συστήματος ωσότου επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Το σύστημα είναι δυνατό να λειτουργήσει σε αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες σύμφωνα με τους υπό απομάκρυνση ρύπους. Η αρχική αραίωση με νερό πραγματοποιείται ώστε να επιτευχθεί συγκέντρωση 10 έως 30% στερεών κατά βάρος. Ακολουθεί απομάκρυνση του νερού και το ληφθέν διάλυμα επαναχρησιμοποιείται, απορρίπτεται ή επεξεργάζεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του διαχειριστή. Οι οργανικές ενώσεις του μείγματος αποικοδομούνται μερικώς ή ολικώς ενώ οι ανόργανες απομακρύνονται με ιζηματοποίηση. Στην περίπτωση παρουσίας πτητικών ρύπων τότε η παρουσία συστημάτων συλλογής και επεξεργασίας είναι απαραίτητη. Το τελικό προϊόν, μετά από ξήρανση αποτελεί πλήρως λειτουργικό έδαφος (Φάμελλος, 2012).

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ο μειωμένος χρόνος αποκατάστασης συγκριτικά με άλλες βιολογικές μεθόδους. Το μεγάλο εύρος εφαρμογής της σε διαφορετικές παραμέτρους του εδάφους και η αποτελεσματικότητα της σε εδάφη όπου η εφαρμογή και η αποτελεσματικότητα άλλων μεθόδων εξαιτίας των χαρακτηριστικών του εδάφους είναι αμφίβολη όπως στην περίπτωση αργιλικών ιζημάτων. Η δυνατότητα απομάκρυνσης οργανικών και ανόργανων ρύπων. Τέλος η δυνατότητα επαναφοράς του εδάφους στην αρχική του θέση καθώς υπάρχει η δυνατότητα διατήρησης των χαρακτηριστικών του.

Στα μειονεκτήματα της μπορεί να αναφερθεί η πολυπλοκότητα που απαιτείται για τη δημιουργία κατάλληλων συνθηκών, όπως και η απαίτηση για ειδικές εγκαταστάσεις με συνέπεια την ανάλογη αύξηση του κόστους. Η εφαρμογή της σε περιπτώσεις υψηλών συγκεντρώσεων ρύπων είναι προβληματική καθώς οι συνθήκες μπορεί να είναι τοξικές για τους μικροοργανισμούς. Η μη δυνατότητα εφαρμογής της για την αποκατάσταση υπόγειων υδάτων καθώς συχνά η συγκέντρωση των θρεπτικών είναι μικρή συγκριτικά με τις απαιτήσεις της μεθόδου για την διατήρηση των μικροοργανισμών (Φάμελλος, 2012).

4.2 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

Ως φυσικοχημικές μέθοδοι αποκατάστασης εδαφών εννοούνται αυτές που επιφέρουν αλλαγές στις φυσικοχημικές ιδιότητες των ρυπαντών και του εδάφους που έχουν συσσωρευτεί στο έδαφος. Μπορεί να είναι από απλές μηχανικές μέθοδοι, όπως π.χ. εξαγωγή και ελεγχόμενη εναπόθεση – αποθήκευση του επιβαρυσμένου εδάφους, μέχρι πολυσύνθετες τεχνολογικές διεργασίες. Υπάρχουν διάφορες φυσικοχημικές μέθοδοι επεξεργασίας ρυπασμένων εδαφών, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν είτε επί τόπου στο χώρο (in situ), είτε μετά από εκσκαφή του εδάφους (ex situ). Οι φυσικοχημικές τεχνικές αναφέρονται συνήθως στις παρακάτω μεθόδους:

- In situ: - Αντληση εδαφικού αέρα (Soil Vapour Extraction)
- Έκπλυση εδάφους (Soil Flushing)
- Ηλεκτροκινητική απορρύπανση (Electrokinetics)
- Διαπερατά αντιδρώντα φράγματα ((Permeable Reactive Barriers)

- Ex situ: - Πλύση εδάφους (Soil washing)

- In situ / Ex situ: - Σταθεροποίηση -Λιθοποίηση (Stabilization–Solidification)
- Οξειδοαναγωγή

4.2.1 Μέθοδος άντλησης εδαφικού αέρα

Μέθοδος η οποία εφαρμόζεται in situ και βασίζεται στη τάση ατμών των ρύπων για την απομάκρυνση τους. Εφαρμόζεται για την απομάκρυνση πτητικών και ημι-πτητικών οργανικών ρύπων από την ακόρεστη ζώνη του εδάφους (EPA, 2004). Για να καταστεί αποδοτική η εφαρμογή της μεθόδου, οι προς απομάκρυνση ρύποι θα πρέπει να παρουσιάζουν ελάχιστη διαλυτότητα στο νερό και αμελητέα τάση προσρόφησης στα εδαφικά σωματίδια, ώστε να είναι δυνατή και σχετικά εύκολη η μεταφορά τους στην αέρια φάση. Ενώσεις που παρουσιάζουν τέτοιου είδους χαρακτηριστικά είναι οι ελαφριοί υδρογονάνθρακες και για το λόγο αυτό η τεχνολογία άντλησης εδαφικού αέρα έχει βρει ευρεία εφαρμογή στην αποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών από οργανικούς, κυρίως πετρελαϊκούς ρύπους.

Μετά από διαρροή όταν ο εδαφικός αέρας παραμένει ακίνητος, γίνεται κορεσμένος σε ατμούς του υφιστάμενου ρύπου, που προέρχονται από την υγρή φάση. Αυτοί οι κορεσμένοι σε ρύπο ατμοί είναι δυνατόν να απομακρυνθούν με άντληση του εδαφικού αέρα, μέσω κατάλληλων γεωτρήσεων. Καθώς ο εδαφικός αέρας ανανεώνεται, η συγκέντρωση του ρύπου στην αέρια φάση αρχίζει να μειώνεται, διαταράσσοντας την κατάσταση ισορροπίας μεταξύ της υγρής και της αέριας φάσης του ρύπου και ενισχύοντας παράλληλα την εξάτμιση μεγαλύτερων ποσοτήτων των ρύπων. Επομένως, η ανάπτυξη ροής και η απομάκρυνση του αέρα ρυπασμένων εδαφών ενισχύει την εξάτμιση των υφιστάμενων ρύπων και γενικότερα ενεργοποιεί βασικούς μηχανισμούς μεταφοράς μάζας (Φάμελλος, 2012). Για τη μέγιστη απόδοση της μεθόδου η εξαγωγή του αέρα δεν είναι συνεχής. Αιτία είναι η σχετικά αργή μεταφορά των ρύπων από το έδαφος στην αέρια φάση. Ο αέρας που συλλέγεται από το έδαφος

μπορεί να επεξεργαστεί ώστε να ανακτηθούν ή να καταστραφούν οι ενώσεις (https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf).

Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτούνται γεωτρήσεις για την άντληση αέρα από το έδαφος και γεωτρήσεις παρακολούθησης διανεμημένα κατά μήκος της ρυπασμένης περιοχής. Οι γεωτρήσεις άντλησης μπορούν να έχουν οριζόντια ή κάθετη διάταξη κατά μήκος της περιοχής, εξαρτώμενα από το βάθος των ρύπων και τη στάθμη των υπόγειων υδάτων (Γιδαράκος, 2008). Τα κριτήρια για την επιλογή κάθετης ή οριζόντιας διάταξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.

Η απόσταση μεταξύ των διαφορετικών γεωτρήσεων εξαρτάται από τη διαπερατότητα του εδάφους. Καθώς η διαπερατότητα του εδάφους μειώνεται, αναλόγως μειώνεται και η απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων. Τυπικές αποστάσεις είναι τα 10 έως 30 μέτρα, με τη μέγιστη απόσταση να μην υπερβαίνει τα 50 μέτρα ώστε να αποφεύγονται ασυνέχειες στη ροή του αέρα. Τέλος απαιτείται η εγκατάσταση ενός συστήματος για την επεξεργασία του αντλούμενου εδαφικού αέρα. Η συνηθέστερη τεχνολογία για το καθαρισμό του αντλούμενου αέρα από τους ρύπους του εδάφους είναι η χρήση ενεργού άνθρακα. Εναλλακτικές τεχνολογικές προσεγγίσεις αποτελούν οι θερμικές, οι βιολογικές και προσρόφησης. Ενδεικτική εφαρμογή της μεθόδου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.7.

Ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν σε μια προς εξυγίανση περιοχή, είναι δυνατόν να εξεταστεί η χρήση των ακόλουθων προαιρετικών επιπρόσθετων τμημάτων συστημάτων άντλησης εδαφικού αέρα:

Γεωτρήσεις εισαγωγής αέρα: για την επιτάχυνση της ροής του εδαφικού αέρα προς τη γεώτρηση άντλησης. Στην περίπτωση όπου η ρύπανση συναντάται σε μεγάλο βάθος και απομόνωση της ζώνης επεξεργασίας από την ατμόσφαιρα, λόγω της παρουσίας υπερκείμενου αδιαπέρατου εδαφικού στρώματος (Γιδαράκος, 2008).

Επιφανειακά καλύμματα: όπως τσιμέντο, ασφαλτος, γεωμεμβράνες ή άλλα υλικά χαμηλής διαπερατότητας, χρησιμοποιούνται σε περίπτωση που υπάρχει σχετικά επιφανειακή (ρηχή) ρύπανση για την αποφυγή άντλησης διηθούμενου βρόχινου νερού και/ατμοσφαιρικού αέρα, μέσω της επιφάνειας του εδάφους. Επιπλέον χρήση, αποτελεί η αύξηση της επιφάνειας επιρροής των γεωτρήσεων εξαγωγής (EPA, 2006, Γιδαράκος, 2008).

Υπόγειες αντλίες νερού: για τη μεταβολή του βάθους του υδροφόρου ορίζοντα, στην περίπτωση που αυτό είναι σχετικά μικρό (Γιδαράκος, 2008). Στην περίπτωση πτητικών ενώσεων που απαιτούν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ο Sims (1990) χρησιμοποίησε προσαρμογή της μεθόδου που πραγματοποιείται συνεργιστική δράση βιοαποικοδόμησης για την ενίσχυση των αποτελεσμάτων. Σε αυτή την περίπτωση αν και η εφαρμογή της μεθόδου αποτελεί ικανοποιητική πηγή οξυγόνου για την βιοαποκατάσταση, οι περιορισμοί σχετικά με τα εδάφη όπου είναι δυνατή η εφαρμογή της είχαν ως αποτέλεσμα την εφαρμογή περαιτέρω προσαρμογών. Αρχική προσαρμογή επέτρεψε στη μέθοδο την προσέγγιση της κορεσμένης ζώνης του υπεδάφους. Το αποτέλεσμα επιτεύχθηκε με την εφαρμογή υψηλού κενού για τη μετατροπή της κορεσμένης ζώνης σε ακόρεστη, με απομάκρυνση του νερού και ταυτοχρόνως επιτρέποντας τον αερισμό της. Διαφορετική προσαρμογή για την αντιμετώπιση της περιορισμένης

διαπερατότητας, οδήγησε στην εφαρμογή έγχυσης αέρα ή νερού υπό υψηλή πίεση για την διάνοιξη ικανού πορώδους στο έδαφος ώστε να επιτρέπεται η ελεύθερη κυκλοφορία του αέρα (NAS et al., 1997).

Η μέθοδος άντλησης εδαφικού αέρα έχει τα πλεονεκτήματα της in situ αντιμετώπισης και της αποκατάστασης χωρίς την πρόκληση όχλησης και εκσκαφής (Abioye, 2011). Είναι αποτελεσματική στην απομάκρυνση πτητικών οργανικών ρύπων από την ακόρεστη ζώνη. Η απόδοση της και η επιτυχία της στην εφαρμογή είναι αποδεδειγμένη (η τεχνολογία δεν βρίσκεται πλέον υπό μελέτη/αξιολόγηση). Τα απαιτούμενα συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν και να λειτουργήσουν πολύ γρήγορα και εύκολα. Μπορεί να εφαρμοστεί σε τμήματα του εδάφους, που βρίσκονται κάτω από κτίρια και σε περιοχές, όπου δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν εκσκαφές. Μπορεί να εφαρμοστεί με ελάχιστες παρεμβάσεις στην υπό εξυγίανση περιοχή. Μπορεί να επιτύχει σχετικά μικρούς χρόνους εξυγίανσης (συνήθως από 6 μήνες έως 2 έτη υπό βέλτιστες συνθήκες). Έχει τη δυνατότητα να επεξεργαστεί μεγάλους όγκους εδάφους με αποδεκτό κόστος (~14-36 €/tn ρυπασμένου εδάφους). Μπορεί να συνδυαστεί πολύ εύκολα και αποτελεσματικά με άλλες τεχνολογίες εξυγίανσης εδαφών και υπογείων υδάτων (π.χ. air sparging) (Γιδαράκος, 2008). Καθώς η διαδικασία περιλαμβάνει τη συνεχή κίνηση αέρα βοηθά στην βιολογική αποικοδόμηση μικρής πτητικότητας οργανικών ενώσεων που τυχάνει να είναι στην τοποθεσία (<http://waterandsoilbioremediation.com/index.php/in-situ-remediation-methods/soil-vapor-extraction-sve>).

Μειονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν η αδυναμία απομάκρυνσης ελαίων, μετάλλων, διοξινών και PCBs (Abioye, 2011). Ακόμη αδυνατεί να επιτύχει πολύ μικρές συγκεντρώσεις ρύπων. Περαιτέρω η απομάκρυνση των ρύπων σπανία υπερβαίνει το 90% της αρχικής συγκέντρωσης, όπως παρατηρείται και στο σχήμα 4.8, με πιθανότερη αιτία την εξοικονόμηση χρονικών και οικονομικών πόρων. Η παρουσία οργανικής ύλης επηρεάζει την απόδοση της μεθόδου, καθώς εμποδίζει την εξάτμιση των οργανικών ρύπων (https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf). Η δυνατότητα εφαρμογής και η απόδοση εξαρτώνται από τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του εδάφους, τα οποία δεν θα πρέπει να περιλαμβάνουν ετερογένεια ή χαμηλή διαπερατότητα. Εδάφη μικρής διαπερατότητας ή ανομοιογενή με υψηλό περιεχόμενο οργανικής ύλης είναι δυσκολότερο να εξυγιανθούν με τη μέθοδο και απαιτούν τη χρήση πρόσθετων ενεργειών όπως fracturing. Οι ανομοιογενείς περιοχές περιορίζουν τη ροή του αέρα με αποτέλεσμα να επεκτείνεται ο χρόνος που απαιτείται για την απορρύπανση. Συνεπώς είναι αποδοτικότερο η υιοθέτηση στρατηγικής όπου η άντληση των αερίων δεν είναι συνεχής αλλά παλμική, δηλαδή διακόπτεται ώστε οι ρύποι να διαχέονται σε διαπερατές περιοχές όπου η συγκέντρωση των ρύπων είναι σχεδόν μηδαμινή λόγω της εφαρμογής της μεθόδου (EPA, 2006; Γιδαράκος, 2008).

Η επεξεργασία των αντλούμενων αερίων είναι σχεδόν πάντα αναγκαία, εξαρτάται άμεσα από το είδος των ρύπων και το ρυθμό απομάκρυνσης του εδαφικού αέρα και αυξάνει σημαντικά το κόστος και την πολυπλοκότητα των απαιτούμενων συστημάτων. Ακόμη η μέθοδος περιορίζεται στην ακόρεστη ζώνη του υπεδάφους, η οποία δεν θα πρέπει να επηρεάζεται από την παρουσία των υπογείων υδάτων. Ο περιορισμός αυτός οφείλεται στην ύπαρξη μεγάλων ποσοστών υγρασίας, τα οποία δυσχεραίνουν την κίνηση του αέρα. Ταυτόχρονα απαιτούν πρόσθετο εξοπλισμό για το

διαχωρισμό αέρα και ύδατος. Ανάλογη είναι και η επιρροή από τις κλιματικές συνθήκες. Η απόδοση της μεθόδου εξαρτάται από την εποχή και μεγάλα χρονικά διαστήματα βροχόπτωσης επηρεάζουν τη δυνατότητα εφαρμογής και μέγιστης απόδοσης. Επιπλέον οι χαμηλές θερμοκρασίες του εδάφους και του διοχετευόμενου αέρα κατά τη χειμερινή περίοδο, δυσκολεύουν την απομάκρυνση οργανικών ρύπων εξαιτίας της μεταβολής στο ιξώδες (Meuser, 2010).

Πριν την εφαρμογή της μεθόδου θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν ο κίνδυνος ατυχήματος εξαιτίας εύφλεκτων ρύπων. Τέτοιοι ρύποι μπορεί να είναι το μεθάνιο, αν η συγκέντρωση του είναι μεταξύ 5 και 15% κατ' όγκο. Παρόμοιες ουσίες είναι η βενζίνη (1.2–8 vol%) και η αμμωνία (15–30 vol%). Περαιτέρω προβλήματα από την εφαρμογή της μεθόδου είναι η πιθανότητα ύπαρξης δυσάρεστων οσμών από τα σημεία των γεωτρήσεων και τα οποία είναι δυνατό να προκαλέσουν ενόχληση σε γειτονικές περιοχές. Τέλος η μακροχρόνια εφαρμογή της μεθόδου είναι πιθανό να προκαλέσει μεταβολές στη δομή του εδάφους προκαλώντας επιπτώσεις σε κοντινές κατασκευές όπως δρόμους και κτίρια (EPA, 2006).

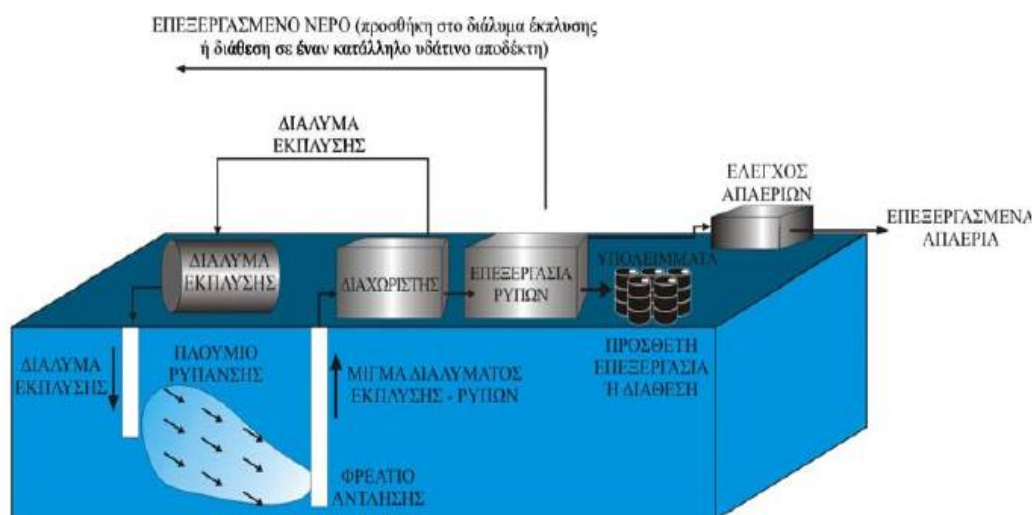
4.2.2 Μέθοδος έκπλυσης εδάφους

Η εδαφική έκπλυση (Soil Flushing) αποτελεί μια καινοτόμο τεχνολογία επεξεργασίας ρυπασμένων εδαφών και υπογείων υδάτων, η οποία περιλαμβάνει την εισαγωγή/διήθηση ενός υδατικού διαλύματος μέσα στην υφιστάμενη ζώνη ρύπανσης, με στόχο τη μεταφορά των εδαφικών ρύπων στο χρησιμοποιούμενο διάλυμα και τη μετέπειτα απομάκρυνσή τους με την άντληση του υπόγειου νερού και κατ' επέκταση του ρυπασμένου πλέον διαλύματος. Η μέθοδος εφαρμόζεται in-situ.

Το διάλυμα που χρησιμοποιείται διαφέρει σύμφωνα με το ρύπο που αντιμετωπίζεται. Στην απλούστερη περίπτωση είναι δυνατό να χρησιμοποιείται απλώς νερό στην περίπτωση υδατοδιαλυτών ρύπων. Πρόσθετα, όπως οξέα, βάσεις και τασιενεργές ουσίες χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση μετάλλων οργανικών και ελαιωδών ρύπων (https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf). Είναι πιθανή η χρήση διαφορετικών διαδοχικών διαλυμάτων για την αποκατάσταση εδαφών με διαφορετικούς ρύπους (https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf). Η μέθοδος εφαρμόζεται με τη διάθεση του διαλύματος στην επιφάνεια του εδάφους, με ψεκασμό ή με απευθείας εναπόθεση και κατ' επέκτασιν τη διήθηση του μέσω του εδάφους, με αποτέλεσμα τη δέσμευση και τη μεταφορά των ρύπων. Στην περίπτωση που οι ρύποι απαντώνται σε μεγάλο βάθος ή στα υπόγεια ύδατα η διοχέτευση του διαλύματος πραγματοποιείται μέσω γεώτρησης. Κατόπιν από επιλεγμένο σημείο των υπογείων υδάτων πραγματοποιείται άντληση με σκοπό την επεξεργασία και την απομάκρυνση των ρύπων και των προσθέτων του διαλύματος (Γιδαράκος, 2008, https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf). Τέλος όταν επιτευχθεί ο απαιτούμενος στόχος απομάκρυνσης των ρύπων απαιτείται ο καθαρισμός του πεδίου εφαρμογής από το διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε. Συνήθως χρησιμοποιείται απλώς νερό αντί του διαλύματος, ώστε να επιτευχθεί απομάκρυνση ή

τουλάχιστον μείωση των προσθέτων του διαλύματος που εφαρμόστηκε. Η εφαρμογή της μεθόδου απεικονίζεται παρακάτω στο σχήμα 4.9.

Η μέθοδος εμφανίζει πλεονεκτήματα στο τομέα των οικονομικών πόρων καθώς έχει τη δυνατότητα εφαρμογής in-situ, χωρίς να απαιτεί την απομάκρυνση από το πεδίο και τη μεταφορά του ρυπασμένου μέσου σε ειδικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας, μειώνοντας σημαντικά το κόστος εφαρμογής της (EPA, 1991). Επιπλέον πλεονέκτημα της μεθόδου παρατηρείται, αν αναλογιστούμε την άμεση σχέση της ποιότητας του εδάφους με την ποιότητα των υπογείων υδάτων, αποτελεί η δυνατότητα ταυτόχρονης αντιμετώπισης και των δύο μέσων. Έχει τη δυνατότητα αντιμετώπισης διαφορετικών ρύπων όπως οργανικούς και μέταλλα. Επίσης παρατηρείται η δυνατότητα αντιμετώπισης ρύπων οι οποίοι είναι προσροφημένοι στο έδαφος. Η δυνατότητα συνεργασίας της με άλλες μεθόδους αποκατάστασης μπορεί να εφαρμοστεί ώστε να επιτευχθούν καλύτερα τελικά αποτελέσματα. Μπορεί να επιτύχει σχετικά μικρούς χρόνους εξυγίανσης, αν σχεδιαστεί και εφαρμοστεί κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Τέλος έχει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί σε πεδία, όπου οι δυνατότητες επέμβασης είναι περιορισμένες (π.χ. κάτω από κτίρια ή δεξαμενές) (Γιδαράκος, 2008, https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf).



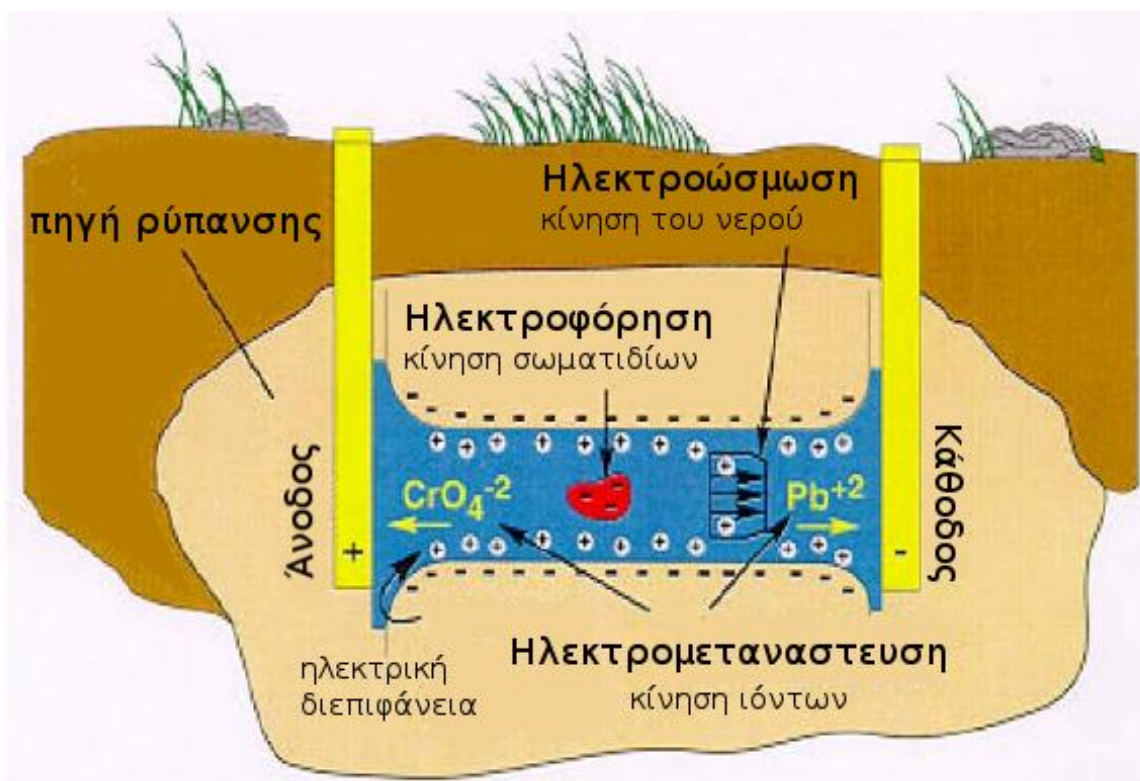
Σχήμα 4.9: Απεικόνιση μεθόδου απορρύπανσης εδάφους με έκπλυση του εδάφους (Πηγή: Φάμελλος, 2012).

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνεται η εξάρτηση της από τις γεωλογικές συνθήκες για τη δυνατότητα εφαρμογής της. Στην περίπτωση εδαφών χαμηλής διαπερατότητας, όπως τα αργιλικά δεν είναι δυνατή η εφαρμογή της. Ταυτόχρονα απαιτείται η πλήρης γνώση των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής και η διεξαγωγή εργαστηριακών και πιλοτικών δοκιμών για την επιλογή του βέλτιστου και πιο αποδοτικού διαλύματος έκπλυσης. Η παρουσία διαφορετικών ρύπων καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την εύρεση του κατάλληλου διαλύματος, μειώνοντας τις πιθανότητες επιτυχούς εφαρμογής. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας του εδάφους είναι δύσκολο να προβλεφθεί η απόδοση και ο αναγκαίος χρόνος εφαρμογής της. Είναι πιθανό να

παραμείνουν στο έδαφος ποσότητες από το διάλυμα έκπλυσης. Ακόμη η εισαγωγή του διαλύματος είναι πιθανό να επηρεάσει αρνητικά τις χημικές και φυσικές ιδιότητες του εδάφους καθώς και τα βιολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Δηλαδή, το έδαφος είναι πιθανό να υποστεί σημαντικές φυσικές, χημικές και βιολογικές αλλαγές όπως η μείωση του pH εξαιτίας της χρήσης πρόσθετων με όξινο χαρακτήρα ή το έδαφος να υποστεί συμπίεση εξαιτίας καθίζησης (EPA, 1990). Επιπλέον απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός για την εφαρμογή της μεθόδους διότι υπάρχει κίνδυνος διαφυγής ή εξάπλωσης των διαλυμένων ρύπων. Εξαιτίας της εισαγωγής χημικών ουσιών στο υπέδαφος η μέθοδος αντιμετωπίζει νομοθετικούς περιορισμούς. Τέλος, η επεξεργασία του συλλεχθέντος μίγματος διαλύματος έκπλυσης – ρύπων, μετατρέπει ουσιαστικά το πρόβλημα εξυγίανσης εδάφους σε πρόβλημα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, αποτελούν το σημαντικότερο παράγοντα οικονομικού κόστους (Γιδαράκος, 2008, https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf).

4.2.3 Μέθοδος ηλεκτροκινητικής απορρύπανσης

Η ηλεκτροκινητική αποκατάσταση των εδαφών είναι μια αναπτυσσόμενη φυσικοχημική τεχνολογία, η οποία έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον των επιστημόνων και στοχεύει στην απομάκρυνση ρύπων από χαμηλής διαπερατότητας ρυπασμένα εδάφη από την εφαρμογή συνεχούς ρεύματος. Η μέθοδος εκμεταλλεύεται την πολικότητα των ενώσεων, του ηλεκτρικού φορτίου των στοιχείων ακόμη και του νερού ώστε να συγκεντρώσει σε καθορισμένη περιοχή τους επιθυμητούς ρύπους. Στον όρο ηλεκτροκινητική απορρύπανση περιλαμβάνονται η ηλεκτροφόρηση, η ηλεκτροώσμωση και η ηλεκτρομετανάστευση (σχήμα 4.10). Κάθε αρχή χαρακτηρίζεται από διαφορετικό πεδίο εφαρμογής και διαφορετική επίδραση στο τρόπο μετακίνησης των ρύπων. Η ηλεκτροκινητική απορρύπανση έχει τις δυνατότητες σταθεροποίησης των ρύπων στην περιοχή γύρω από τα ηλεκτρόδια ή της απομάκρυνσης τους από το έδαφος και τις μετέπειτα επεξεργασίας τους καθώς μπορούν να αντληθούν χάρις στο σχεδιασμό των ηλεκτροδίων (EPA, 2006). Έχει τη δυνατότητα αντιμετώπισης ανόργανων ρύπων όπως είναι τα βαρέα μέταλλα και οργανικών ρύπων με ιοντική και πολική συμπεριφορά. Είναι δυνατή και η λήψη μη πολικών ουσιών, η οποία όμως εξαρτάται από τη κοκκομετρία του εδάφους, καθώς η μετακίνηση τους δεν οφείλεται στην εφαρμογή του ηλεκτρικού ρεύματος, αλλά μετακινούνται στη κάθοδο παρασυρόμενες έμμεσα από τις συνθήκες που δημιουργούν οι αντλίες των ηλεκτροδίων (Meuser, 2010). Δηλαδή σε εδάφη με μικρή διαπερατότητα δεν είναι δυνατή η μετακίνηση των μη πολικών ουσιών (EPA, 2006; https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf). Η μέθοδος είναι ανεξάρτητη του εύρους συγκέντρωσης των ρύπων. Μπορεί να εφαρμοστεί σε ακόρεστο και κορεσμένο υπέδαφος. Στην περίπτωση του ακόρεστου υπεδάφους ένα ελάχιστο ποσοστό υγρασίας θεωρείται απαραίτητο για την εφαρμογή. Είναι δυνατό να εφαρμοστεί ακόμη και κάτω από κτιριακές εγκαταστάσεις ή άλλες κατασκευές.



Σχήμα 4.10: Μηχανισμοί ηλεκτροκινητικής απορρύπανσης (ηλεκτροφόρηση, ηλεκτροώσμωση και ηλεκτρομετανάστευση) (Πηγή: https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf).

Ηλεκτροφόρηση καλείται η μεταφορά των φορτισμένων σωματιδίων ή κολλοειδών κάτω από την επίδραση ενός ηλεκτρικού φορτίου. Οι ρύποι συνδέονται με τα φορτισμένα σωματίδια, με αποτέλεσμα την έμμεση μεταφορά τους προς τα ηλεκτρόδια. Η ταχύτητα μετακίνησης είναι ανάλογη του φορτίου των σωματιδίων και αντιστρόφως ανάλογη του μεγέθους τους. Συνεπώς η αρχή βρίσκει απήχηση σε χονδρόκοκκους σχηματισμούς του εδάφους, εξαιτίας των συγκριτικά μεγαλύτερων πόρων που διαθέτουν.

Ηλεκτροώσμωση είναι η μετακίνηση της υγρασίας του εδάφους ή του υπόγειου νερού από την άνοδο στην κάθοδο του ηλεκτρολυτικού κελιού. Συμβαίνει όταν ένα υγρό κινείται μέσω ενός φορτισμένου μέσου υπό την επιρροή ηλεκτρικού πεδίου. Το φορτισμένο μέσο είναι συνήθως ιλύς, άργιλος, άμμος ή άλλα ορυκτά σωματίδια τα οποία χαρακτηρίζονται από αρνητικά φορτισμένες επιφάνειες (EPA, 1990). Η συλλογή των ρύπων πραγματοποιείται διότι εμπεριέχονται εντός του νερού που μετακινείται. Το φαινόμενο παρατηρείται κυρίως σε αργιλώδεις υδροφόρους ορίζοντες.

Ηλεκτρομετανάστευση παρατηρείται, όταν ηλεκτρική τάση εφαρμόζεται μέσω ηλεκτροδίων σε ρυπασμένο έδαφος, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται μετακίνηση φορτισμένων ιόντων. Η αρχή εμφανίζει μεγαλύτερη απόδοση σε χονδρόκοκκους σχηματισμούς. Η ταχύτητα κίνησης της ηλεκτρομετανάστευσης είναι 5-40 φορές μεγαλύτερη συγκριτικά με την ηλεκτροώσμωση. Ανεξάρτητα από την ηλεκτροκινητική αρχή η παρουσία ύδατος είναι απαραίτητη για την εφαρμογή της μεθόδου. Η ηλεκτρομετανάστευση και η ηλεκτροφόρηση βασίζονται στη μετακίνηση

μάζας και συνεπώς εξαρτώνται από σχετικά υψηλή συγκέντρωση ύδατος. Παρόμοιες είναι και οι απαιτήσεις για την εφαρμογή της ηλεκτροώσμωσης (https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf). Η ηλεκτρομετανάστευση και η ηλεκτροώσμωση είναι οι κύριοι μηχανισμοί της ηλεκτροκινητικής μεθόδου.

Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται η τοποθέτηση ηλεκτροδίων σε κατάλληλο βάθος και απόσταση. Τα ηλεκτρόδια είναι κατασκευασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να εμπεριέχουν νερό και να είναι δυνατή η προσαρμογή αντλίας. Το εξωτερικό μέρος είναι κατασκευασμένο από πορώδες κεραμικό που επιτρέπει την κίνηση ηλεκτρικού ρεύματος και νερού. Το νερό συγκρατείται υπό πίεση ώστε να μην συμβάλει στον υπερκορεσμό του εδάφους γύρω από το ηλεκτρόδιο. Σύμφωνα με το ρύπο προς αντιμετώπιση μπορεί να διοχετευθεί κατάλληλο υγρό ώστε να επισπεύδεται η διαδικασία και να συλλέγεται ο επιλεγμένος ρύπος (https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf). Στις περισσότερες περιπτώσεις η διάταξη των ηλεκτροδίων αποτελείται από ένα κεντρικό ηλεκτρόδιο που αποτελεί τη κάθοδο και περιβάλλεται από αριθμό ηλεκτροδίων που χρησιμεύουν ως άνοδος, σχηματίζοντας με αυτό το τρόπο τριγωνικές, τετράγωνες και εξαγώνες διατάξεις. Η μέγιστη απόσταση τοποθέτησης μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι τα 10 m. Με την εφαρμογή συνεχούς ρεύματος πραγματοποιείται η μετακίνηση των ρύπων προς τις περιοχές των ηλεκτροδίων (Sims, 1990; https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf). Συνήθως, ακολουθεί η άντληση των ρύπων μέσω των ηλεκτροδίων ώστε να απομακρυνθούν από το έδαφος.

Η εφαρμογή της μεθόδου παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα της εύκολης εγκατάστασης και λειτουργίας με σχετικά χαμηλό κόστος. Έχει τη δυνατότητα αντιμετώπισης πληθώρας ρύπων με σημαντικότερη συμβολή στην απομάκρυνση βαρέων μετάλλων. Είναι δυνατή η ταυτόχρονη απομάκρυνση διαφορετικών ρύπων. Μπορεί να εφαρμοστεί σε κορεσμένο και ακόρεστο υπέδαφος. Παρουσιάζει μεγαλύτερη απόδοση σε εδάφη που χαρακτηρίζονται ως αργιλικά καθώς τα σωματίδια αργίλου είναι αρνητικά φορτισμένα (https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf). Επιπλέον είναι αποδοτική σε εδάφη μικρής διαπερατότητας ενώ συγκριτικά με άλλες μεθόδους έχει μικρές ενεργειακές απαιτήσεις. Τέλος έχει τη δυνατότητα συνεργασίας με άλλες μεθόδους.

Η μέθοδος όμως παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα. Η εφαρμογή της συνήθως έχει ως συνέπεια την οξίνιση του εδάφους. Τιμές pH 2-4 είναι τυπικές μετά την εφαρμογή. Αντιδράσεις οξειδοαναγωγής που μπορεί να λάβουν μέρος είναι πιθανό να έχουν ως αποτέλεσμα μη επιθυμητά προϊόντα (https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf). Το έδαφος εμφανίζει απώλειες ύδατος με συνέπεια τη ξήρανση του. Η συνέπεια αυτή οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους εξαιτίας της εφαρμογής του ηλεκτρικού ρεύματος, η οποία μπορεί να φτάσει ακόμη και τους 60°C. Σε συνδυασμό με τη μεταβολή των τιμών pH καθίσταται κατανοητό πως η επίδραση της μεθόδου στους μικροοργανισμούς του εδάφους και τη βιοποικιλότητα είναι καταστρεπτική. Η χρήση μεταλλικών ηλεκτροδίων μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή στο έδαφος διαβρωτικών προϊόντων. Η απόδοση μειώνεται σημαντικά σε περίπτωση που η υγρασία είναι μικρότερη του 10% (https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf).

content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf). Εξαιτίας της περιορισμένης εφαρμογής δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για το κόστος εφαρμογής. Επιπλέον το κόστος διαφέρει σημαντικά εξαρτώμενο από τη συγκέντρωση των ρύπων, τη παρουσία άλλων στοιχείων, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και το ποσοστό υγρασίας (EPA, 2006). Εφαρμόζεται κυρίως για την αντιμετώπιση μετάλλων καθώς αν και είναι δυνατή η αντιμετώπιση οργανικών ρύπων απαιτούνται πρόσθετες ενέργειες για την αύξηση αποδοτικότητας της μεθόδου συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση του κόστους. Επιπλέον η κατανάλωση ρεύματος μπορεί να καταστεί υπερβολική συμβάλλοντας με αυτό το τρόπο σε αύξηση του κόστους λειτουργίας (EPA, 1990).

4.2.4 Μέθοδος διαπερατών αντιδρώντων φραγμάτων

Η μέθοδος εκμεταλλεύεται τη φυσική υπόγεια ροή των υδάτων και της μεταφοράς των ρύπων. Πρόκειται για κάθετες κατασκευές που επιτρέπουν τη διέλευση των υδάτων και στο εσωτερικό τους περιέχουν διάφορα υλικά με σκοπό τη συγκράτηση και το μετασχηματισμό των ρύπων, καθώς και την πρόληψη εξάπλωσης της ρύπανσης στα υπόγεια ύδατα και τις γειτονικές περιοχές, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11 (USDA, 2000). Η δυνατότητα επιλογής κατάλληλου υλικού ανάλογα με το ρύπο προς αντιμετώπιση, καθιστά τη μέθοδο ικανή να αντιμετωπίσει ανόργανους και οργανικούς ρύπους.

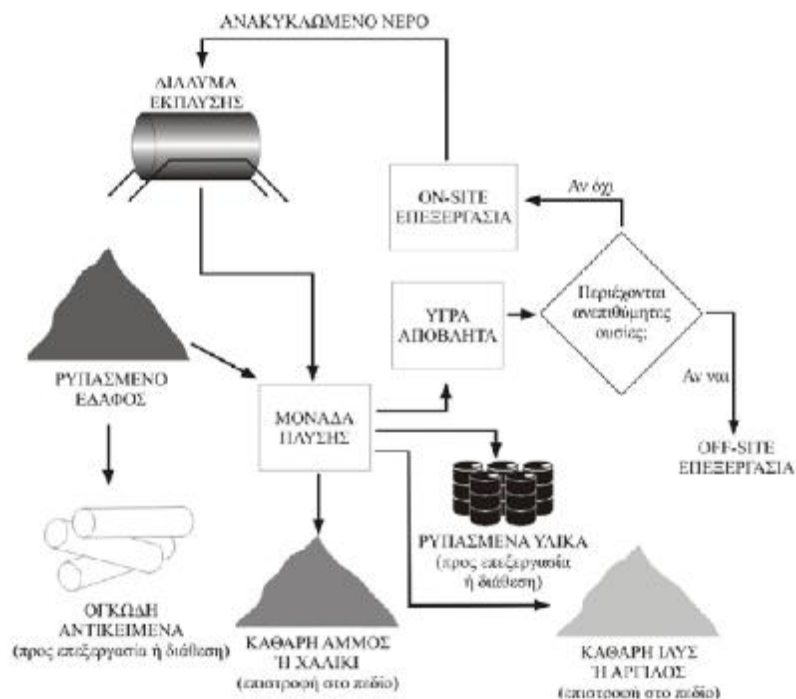
Η μέθοδος απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό για το καθορισμό της ροής των υδάτων, τον προσδιορισμό των υφιστάμενων ρύπων και της γεωχημείας του ύδατος. Τα παραπάνω κρίνονται απαραίτητα για την επιλογή της τοποθεσίας κατασκευής και της επιλογής του κατάλληλου υλικού που θα εμπεριέχει. Τα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται είναι σίδηρος, ενεργός άνθρακας, ζεόλιθος, ασβεστολιθικά πετρώματα, οργανική ύλη κτλ (σχήμα 4.12). Σύμφωνα με τις επικρατούσες συνθήκες είναι δυνατή ακόμη και η βιολογική απορρύπανση, με τη προσθήκη μικροοργανισμών και θρεπτικών ουσιών (<http://www.itrcweb.org/GuidanceDocuments/PRB-4ExSum.pdf>).

4.2.5 Μέθοδος πλύσης εδάφους

Η μέθοδος βασίζεται στο διαχωρισμό των εδαφικών σωματιδίων μικρής διαμέτρου στα οποία οι ρύποι εμφανίζουν τη τάση να ροφούνται. Χαρακτηριστικοί εκπρόσωποι αυτών των εδαφικών σωματιδίων αποτελούν η ιλύς, η άργιλος και η οργανική ύλη του εδάφους. Τα σωματίδια αυτά με τη σειρά τους προσδένονται, φυσικά ή χημικά, σε μεγαλύτερα εδαφικά σωματίδια άμμου ή χαλικιών. Με την απομάκρυνση των παραπάνω σωματιδίων είναι δυνατή σημαντική μείωση της ποσότητας των ρύπων του εδάφους.

Η μέθοδος έχει τη δυνατότητα εφαρμογής σε μεγάλο εύρος ανόργανων και οργανικών ρύπων που περιλαμβάνουν βαρέα μέταλλα, ραδιονουκλίδια, κυανιούχα, αρωματικές ενώσεις, φυτοφάρμακα και πολυχλωριωμένες φαινόλες (PCBs). Για την

εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται η εκσκαφή του ρυπασμένου εδάφους και στη συνέχεια η μετακίνηση του σε εγκαταστάσεις με σκοπό το διαχωρισμό των διαφορετικών μεγέθους σωματιδίων. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι το κοσκίνισμα για να απομακρυνθούν μεγάλα κομμάτια ξύλου, ρίζες, πέτρες, κ.λπ. Στη συνέχεια ακολουθεί η εντατική ανάμιξη του ρυπασμένου εδάφους με κατάλληλο διάλυμα για την απομάκρυνση των ρύπων. Η χρήση του διαλύματος αποσκοπεί στην εκρόφηση, ιζηματοποίηση των ρύπων αλλά και για το διαχωρισμό των εδαφικών σωματιδίων. Το διάλυμα προσαρμόζεται στους προς αντιμετώπιση ρύπου και είναι δυνατό να περιλαμβάνει οξέα, τασιενεργές ενώσεις και άλλα πρόσθετα. Έπειτα ακολουθεί ο διαχωρισμός των καθαρών σωματιδίων του εδάφους και τέλος η επεξεργασία του υγρού που προκύπτει. Καθώς η μεταφορά του ρυπασμένου εδάφους συνοδεύεται από το αντίστοιχο κόστος είναι δυνατή η επεξεργασία του ρυπασμένου εδάφους στη τοποθεσία (Φάμελλος, 2012; Γιδαράκος, 2008). Στο σχήμα 4.13 παρουσιάζεται η διαδικασία.



Σχήμα 4.13: Απεικόνιση διαδικασίας απορρύπανσης με τη μέθοδο πλύσης του εδάφους (Πηγή: EPA, 2006).

Η μέθοδος παρουσιάζει πλεονεκτήματα και θεωρείται ελκυστική καθώς έχει τη δυνατότητα αντιμετώπισης ανόργανων και οργανικών ρύπων με την επιλογή του κατάλληλου διαλύματος. Επιπλέον καθίσταται δυνατή η απορρύπανση τοποθεσιών που περιέχουν ανόργανους και οργανικούς ρύπους, στοχεύοντας στη διαδοχική αντιμετώπιση τους. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η εμπορική καθιέρωση της προσφέροντας έμμεσα αξιοπιστία προς το τελικό αποτέλεσμα και το κόστος εφαρμογής της. Αν υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής στη τοποθεσία χωρίς να απαιτείται η μετακίνηση του ρυπασμένου εδάφους, τότε συντελεί στη μείωση του

κόστους. Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί σε συνεργασία με άλλες μεθόδους για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος και της μείωσης του συνολικού κόστους αποκατάστασης (Γιδαράκος, 2008).

Στα μειονεκτήματα περιλαμβάνεται η δυσκολία εύρεσης κατάλληλου διαλύματος για την επιτυχή αντιμετώπιση περίπλοκων μιγμάτων εδαφικών ρύπων με τη χρήση ενός και μοναδικού διαλύματος. Επιπλέον εξαρτάται από τη κοκκομετρική σύσταση του εδάφους και της περιεχόμενης οργανικής ύλης. Συγκεκριμένα αν στο προς αποκατάσταση έδαφος περιέχονται υψηλά ποσοστά ιλύος, αργίλου (>50%) ή οργανικής ύλης μειώνεται σημαντικά η αποδοτικότητα της μεθόδου. Η μέθοδος έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική στην επεξεργασία εδαφών με μεγάλο ποσοστό άμμου (50-70%) και μεσαίο ποσοστό ιλύος και αργίλου (30-50%). Ακόμη στο ζήτημα της αντιμετώπισης των ρύπων δεν επιφέρει τη καταστροφή τους απλά μεταφέρει τους ρύπους από το έδαφος σε ένα διάλυμα μετατρέποντας το πρόβλημα εξυγίανσης του εδάφους σε πρόβλημα διαχείρισης υγρών αποβλήτων. Περαιτέρω τα υγρά απόβλητα που προκύπτουν από τη πλύση του εδάφους απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία ώστε να απομακρυνθούν τα πολύ μικρά εδαφικά σωματίδια. Στην περίπτωση τοποθέτησης του απαραίτητου εξοπλισμού στη τοποθεσία, προκαλούνται αισθητικές επιπτώσεις και ηχητική όχληση. Τέλος η μέθοδος παρουσιάζει υψηλό κόστος όταν το ρυπασμένο έδαφος χαρακτηρίζεται από μικρές συγκεντρώσεις ρύπων ή οι ποσότητες του εδάφους που απαιτούν επεξεργασία είναι μικρότερες από 5000 τόνους (Φάμελλος, 2012, Γιδαράκος, 2008, https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf).

4.2.6 Μέθοδος σταθεροποίησης - λιθοποίησης

Σκοπός της μεθόδου είναι η μετατροπή των ρύπων σε αδιάλυτες ενώσεις ώστε να μειωθεί δραστικά ο ρυθμός μεταφοράς τους στο περιβάλλον (χημική σταθεροποίηση), η μείωση της τοξικότητας των υφιστάμενων ρύπων, η μείωση της βιοδιαθεσιμότητας των ρύπων, η βελτίωση των φυσικών χαρακτηριστικών των ρυπασμένων εδαφών, η μείωση της ελεύθερης επιφάνειας των κόκκων του εδάφους, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διάλυση και η μεταφορά των ρύπων. Η σταθεροποίηση και η λιθοποίηση διαφέρουν στις ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούν και στα διαφορετικά τελικά προϊόντα που παράγουν. Επειδή όμως τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως προκαλούν ταυτόχρονη σταθεροποίηση των ρύπων και λιθοποίηση των ρυπασμένων εδαφών δεν γίνεται διαχωρισμός στη διεθνή βιβλιογραφία. Οι μέθοδοι σταθεροποίησης στοχεύουν στη μείωση της διαλυτότητας και στη χημική αδράνεια των ρύπων αλλάζοντας τη χημική κατάσταση ή με τη φυσική τους παγίδευση (microencapsulation). Η σταθεροποίηση συνήθως εκμεταλλεύεται μια χημική αντίδραση με σκοπό την δέσμευση του ρύπου στο υπόστρωμα ή για την παραγωγή προϊόντων με περιορισμένη κινητικότητα. Το προϊόν δεν είναι απαραίτητα σε στερεή φάση, απλώς είναι σε σταθερότερη χημική κατάσταση. Συνήθως η παρουσία των υλικών που προστίθεται δεν επηρεάζει την αισθητική του εδάφους. Για την σταθεροποίηση χρησιμοποιούνται υλικά με ροφητικές ιδιότητες όπως ο ενεργός άνθρακας, άργιλοι, ζεόλιθος, οργανική ύλη.

Οι μέθοδοι λιθοποίησης αποσκοπούν στη δημιουργία ενός στερεού προϊόντος το οποίο δεσμεύει τους ρύπους μέσα σε υλικά αυξημένης αντοχής, μειωμένης συμπιεστότητας, μειωμένης διαπερατότητας και απορροφητικότητας αντί της απομάκρυνσης τους με χημικές ή φυσικές μεθόδους. Η μέθοδος στηρίζεται στην αντίληψη, πως απομονώνοντας την επιφάνεια των ρύπων που αλληλεπιδρά με το περιβάλλον είναι δυνατή η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (EPA, 1986). Δεν περιλαμβάνει απαραίτητα και τη χημική αντίδραση μεταξύ των ρύπων και των αντιδραστηρίων λιθοποίησης. Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως είναι τσιμέντο, θερμοπλαστικά υλικά, άσφαλτος, οξείδιο και υδροξείδιο του ασβεστίου, μείγματα ασβεστίου με φυσικές και τεχνητές ποζολάνες όπως η στάχτη υψικαμίνων, κονιορτοποιημένα κεραμίδια και τούβλα (https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf). Το στερεό υλικό που προκύπτει και καλείται συχνά «μονόλιθος», παρουσιάζει συνήθως αυξημένη αντοχή και μειωμένη διαπερατότητα. Συνήθως δημιουργούνται κατασκευές τετράγωνου σχήματος. Το μέγεθος του μονόλιθου ποικίλει από μερικά χιλιοστά έως δεκάδες εκατοστά. Στην περίπτωση όμως που η μέθοδος εφαρμόζεται in situ ο μονόλιθος είναι δυνατό να εμφανίζεται άμορφος.

Η ύπαρξη εναλλακτικών υλικών με διαφορετικά χαρακτηριστικά, προσδίδει στη μέθοδο ευελιξία για την αντιμετώπιση των ρύπων του εδάφους, με αποτέλεσμα να μπορεί να ανταποκριθεί στην αντιμετώπιση της πλειονότητας των ανόργανων και οργανικών ρύπων. Παρά τις δυνατότητες αντιμετώπισης οργανικών ρύπων, συνήθως χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση ανόργανων ρύπων και πιο συγκεκριμένα βαρέων μετάλλων. Η τάση προς την αντιμετώπιση των βαρέων μετάλλων οφείλεται στην αποτελεσματικότητα των υλικών με χαμηλό κόστος. Υλικά όπως το τσιμέντο και τα οξείδια του ασβεστίου είναι λιγότερο αποτελεσματικά στη δέσμευση οργανικών ρύπων, ειδικά αν συναντώνται σε υψηλές συγκεντρώσεις. Η αποτελεσματικότητα της είναι μεγαλύτερη στην αντιμετώπιση ανόργανων ρύπων. Ακόμη, η μέθοδος έχει τη δυνατότητα αντιμετώπισης ρυπασμένου εδάφους το οποίο περιέχει υψηλό ποσοστό ύδατος (EPA, 1986).

Η μέθοδος μπορεί να πραγματοποιηθεί in situ στην περίπτωση όπου η ρυπασμένη περιοχή είναι συγκεντρωμένη κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Διαφορετικά απαιτείται η διαμόρφωση του χώρου με τέτοιο τρόπο ώστε να μετακινηθεί το ρυπασμένο υλικό με σκοπό είτε τη τοποθέτηση του για ανάμιξη είτε ως χώρος εναπόθεσης των αναμεμιγμένων υλικών. Εναλλακτικά απαιτείται η ex situ αντιμετώπιση (EPA, 1986).

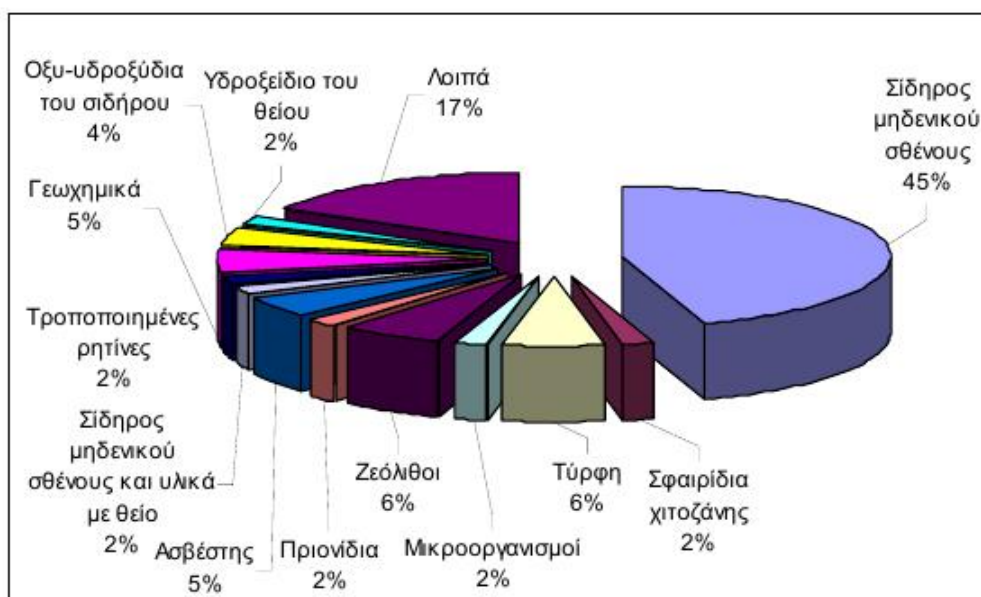
Πίνακας 4.2: Αποτελεσματικότητα σταθεροποίησης – λιθοποίησης για διάφορα είδη ρύπων σε εδάφη και ιλύς (Πηγή: Γιδαράκος, 2008).

	Ομάδα ρύπων	Αποτελεσματικότητα σε έδαφος/ ιλύς
Οργανικοί ρύποι	Αλογονωμένα πτητικά	□
	Μη αλογονωμένα πτητικά	□
	Αλογονωμένα ημι-πτητικά	■
	Μη αλογονωμένα ημι-πτητικά και μη πτητικά	■
	PCBs	▼
	Παρασιτοκτόνα	▼
	Διοξίνες/ φουράνια	▼
	Οργανικά κυανίδια	▼
	Οργανικά διαβρωτικά	▼
Ανόργανοι ρύποι	Πτητικά μέταλλα	■
	Μη πτητικά μέταλλα	■
	Αμίαντος	■
	Ραδιενεργά υλικά	■
	Ανόργανα διαβρωτικά	■
	Ανόργανα κυανίδια	■
Αντιδρώντες ρύποι	Οξειδωτικά	■
	Αναγωγικά	■

- Αποδεδειγμένη αποτελεσματικότητα: επιτυχής επεξεργασία σε ικανο-ποιοτικό βαθμό
- ▼ Πιθανή αποτελεσματικότητα: οι ειδικοί πιστεύουν ότι θα είναι αποτελεσματική
- Μη αναμενόμενη αποτελεσματικότητα: οι ειδικοί πιστεύουν ότι δε θα είναι αποτελεσματική

Η ανάμειξη του ρυπασμένου εδάφους με τα παραπάνω υλικά είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί με ή χωρίς εκσκαφή. Στην περίπτωση που δεν πραγματοποιείται εκσκαφή τα υλικά λιθοποίησης διοχετεύονται στο έδαφος. Η μορφή του προϊόντος τότε είναι μονολιθική.

Οι περισσότερες μέθοδοι αυτής της κατηγορίας έχουν αναπτυχθεί για την ex situ εφαρμογή εδαφών που έχουν βαρέα μέταλλα ως ρύπους (σχήμα 4.14) αν και έχουν πραγματοποιηθεί ελάχιστες εφαρμογές για in situ σε μικρά βάθη. Οι μέθοδοι αυτές γενικά δεν είναι κατάλληλες για ρύπους σε μεγάλο βάθος, για ρύπους με μεγάλη διαλυτότητα και πτητικότητα.



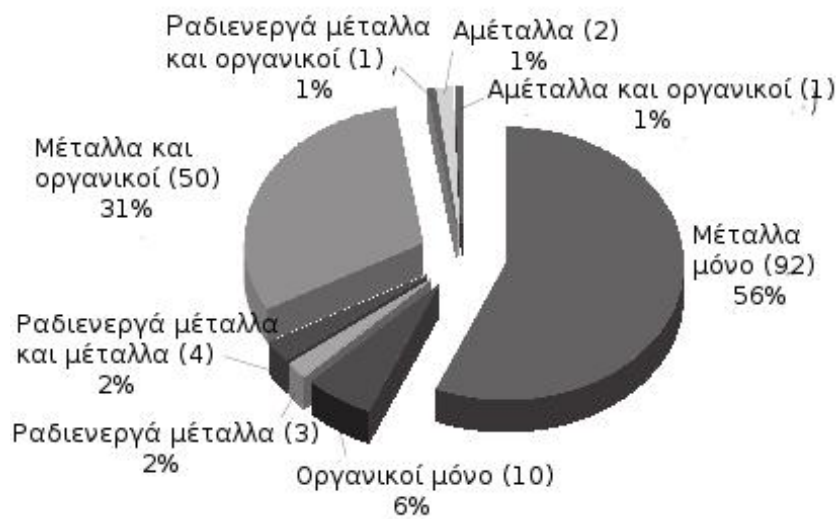
Σχήμα 4.12: Ποσοστά χρήσης διαφορετικών υλικών πλήρωσης διαπερατών αντιδρώντων φραγμάτων σε διάφορες εφαρμογές παγκοσμίως (Πηγή : Γιδάρακος, 2008).

Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνεται η δυνατότητα αντιμετώπισης των ρύπων *in situ*. Η εμπορική διαθεσιμότητα της, σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος συντήρησης και λειτουργίας καθώς δεν υπάρχουν ενεργειακές απαιτήσεις για τη συντήρηση του συστήματος συντελούν θετικά στην υιοθέτηση της μεθόδου. Στο μικρό κόστος συντήρησης και λειτουργίας συμβάλλει η δυνατότητα χρήσης άμεσα διαθέσιμων υλικών και ταυτόχρονα χαμηλού κόστους (EPA, 1990). Το μικρό χρονικό διάστημα που απαιτείται για την εφαρμογή της μεθόδου συντελεί στην υιοθέτησης της για τον άμεσο περιορισμό της ρύπανσης. Η δυνατότητα συνεργασίας της με άλλες μεθόδους για την επίτευξη των επιθυμητών στόχων, όταν η αποκλειστική χρήση της μίας μεθόδου δεν μπορεί να τους επιτύχει (https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf). Οι δυνατότητες κατασκευής σε σχετικά μεγάλα βάθη (μεγαλύτερα από 16 m) μπορεί να επιτευχθεί σε συνεργασία με τεχνικές όπως η διάνοιξη υδραυλικών ρωγμών. Με τη χρήση της ίδιας τεχνικής ερευνάται η κατασκευή διαπερατών αντιδρώντων φραγμάτων τα οποία θα είναι παράλληλα στην επιφάνεια του εδάφους. Η εφαρμογή της μεθόδου δεν επιφέρει αισθητική και ηχητική όχληση διότι η επέμβαση στην επιφάνεια του εδάφους πρακτικά δεν παρατηρείται, επιτρέποντας την περαιτέρω χρήση της τοποθεσίας. Από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η δυνατότητα αντιμετώπισης οργανικών και ανόργανων ρύπων.

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνονται η απαίτηση για λεπτομερή και ακριβή χαρακτηρισμό του κορεσμένου εδάφους καθώς θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν ακόμη και οι εποχικές διακυμάνσεις. Οι διακυμάνσεις αυτές κατέχουν σημαντικό ρόλο στην εύρυθμη λειτουργία του φράγματος, καθώς μειώνεται η

αποδοτικότητα του όταν επικρατούν πολύ χαμηλές ή πολύ υψηλές ταχύτητες ροής των υπόγειων υδάτων. Στις απαιτούμενες συνθήκες για την εφαρμογή των διαπερατών αντιδρώντων φραγμάτων ο υδροφορέας δεν πρέπει να είναι λεπτός ή ασυνεχής. Ακόμη η ταχύτητα ροής του υπογείου νερού δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλη (π.χ. > 1m /day) καθώς ο χρόνος παραμονής του ρυπασμένου ύδατος εντός των αντιδρώντων δεν είναι αρκετός για την επεξεργασία των ρύπων. Με τις υφιστάμενες τεχνολογικές συνθήκες η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις όπου το πλούμιο ρύπανσης είναι πολύ μεγάλο ή βαθύ (π.χ. >16m). Στη μη εφαρμογή της μεθόδου συντελεί και το οικονομικό κόστος καθώς είναι ανάλογο του βάθους και του πλάτους του υδροφορέα. Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτούνται εργασίες εκσκαφής με τις αρνητικές επιπτώσεις που συνοδεύουν τη συγκεκριμένη εργασία (https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf). Επιπλέον απαιτείται και επεξεργασία του ρυπασμένου εδάφους που θα προκύψει από τις εργασίες αυτές. Τέλος παρά την εμπορική καθιέρωση της μεθόδου, η ηλικία της και η μη δυνατότητα πρόβλεψης της απόδοσης της μακροπρόθεσμα ίσως να δημιουργεί ανησυχία. Σε αυτό συνεισφέρει και η αβεβαιότητα για τη διάρκεια απόδοσης των ενδιάμεσων υλικών. Σχετικά με τα υλικά, θα πρέπει να προσδιοριστεί ο κίνδυνος φράξης και μείωσης της απόδοσης του φράγματος, εξαιτίας στοιχείων που περιέχονται στα υπόγεια ύδατα και επηρεάζουν το ενδιάμεσο υλικό όπως και η πιθανότητα ανάπτυξης μικροβιολογικής δραστηριότητας όταν αυτή δεν είναι επιθυμητή. Άλλο μειονέκτημα σχετικά με τη χρήση των υλικών είναι η ανάγκη επεξεργασίας τους στο τέλος της διάρκειας ζωής τους. Τέλος από τη στιγμή της εγκατάστασης οι δυνατότητες μεταβολής των υλικών και συνεπώς των χαρακτηριστικών του εμποδίου είναι πολύ δύσκολο να προσαρμοστούν συγκριτικά με άλλες μεθόδους. Οι μέθοδοι για ex situ αντιμετώπιση είναι εμπορικά ώριμες. Η εφαρμογή τους in situ είναι λιγότερο αναπτυγμένες εξαιτίας της δυσκολίας διαβεβαίωσης ικανοποιητικής μίξης.

Ολικός αριθμός έργων=163



Σχήμα 4.14: Κατηγορίες ρύπων στις οποίες έχει εφαρμοστεί η μέθοδος στα πλαίσια του προγράμματος αποκατάστασης ρυπασμένων εδαφών των ΗΠΑ (Πηγή: EPA, 2000).

Η μέθοδος χαρακτηρίζεται από σημαντικά πλεονεκτήματα στα κριτήρια του κόστους και της εφαρμογής. Μπορεί να εφαρμοστεί in-situ, ex-situ και on-site, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες. Ακόμη είναι δυνατή η εφαρμογή της σε σχεδόν όλα τα εδάφη. Αρκετά από τα υποψήφια υλικά είναι άμεσα διαθέσιμα και σε λογικό κόστος. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι μικρό συγκριτικά με τις υπάρχουσες μεθόδους και σε σχέση με τις δυνατότητες αντιμετώπισης ρύπων. Η ευκολία στην εφαρμογή της μεθόδου αποτελεί πρόσθετο πλεονέκτημα για τις οικονομικές απαιτήσεις. Στο καθορισμό του μειωμένου συνολικού κόστους συμβάλλει και το γεγονός πως δεν υπάρχουν απαιτήσεις ως προς την εξειδίκευση του απαραίτητου προσωπικού. Τα υψηλά ποσοστά επιτυχίας της μεθόδου συμβάλλουν περαιτέρω προς την εφαρμογή της. Όπως άλλωστε και ο απαιτούμενος χρόνος εξυγίανσης ο οποίος είναι σχετικά μικρός. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποκλειστική μέθοδος για την αντιμετώπιση της αποκατάστασης του εδάφους ή σε συνεργασία με άλλες μεθόδους. Η προσθήκη υλικών όπως το τσιμέντο και το οξείδιο του ασβεστίου παρουσιάζουν έμμεσα πλεονεκτήματα όπως η αύξηση της θερμοκρασίας του μείγματος με συνέπεια και της πτητικότητας των οργανικών ρύπων (EPA, 2006).

Η μέθοδος εφαρμόζεται περισσότερο με σκοπό την λιθοποίηση του ρυπασμένου εδάφους και λιγότερο με σταθεροποιητικά υλικά όπως ο ενεργός άνθρακας. Ίσως το σημαντικότερο μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός πως οι ρύποι ούτε απομακρύνονται ούτε μειώνεται η τοξικότητά τους, απλώς μειώνεται η κινητικότητα και η διαθεσιμότητά τους. Το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί περιοριστικό παράγοντα

για την υιοθέτηση της, εξαιτίας της μη αποδοχής των τοπικών κοινωνιών. Σε αρκετές χώρες όπως η Γαλλία, η Αγγλία οι τοπικές κοινωνίες συμμετέχουν ενεργά στη λήψη αποφάσεων για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου. Η μέθοδος είναι δυνατό να παρουσιάζει περιορισμούς στην εφαρμογή της εξαιτίας κάποιων παραμέτρων της προς απορρύπανση τοποθεσίας. Οι παράμετροι που συντελούν στις δυσκολίες εφαρμογής της είναι κυρίως η υψηλή συγκέντρωση οργανικών ρύπων, η υψηλή περιεκτικότητα του εδάφους σε άργιλο, οργανική ύλη και νερό. Η ύπαρξη των παραμέτρων έχει ως συνέπεια να επηρεάζεται η ποιότητα ανάμειξης και κατ' επέκτασιν το τελικό προϊόν. Ο περιορισμός αυτός αφορά περισσότερο τη λιθοποίηση και λιγότερο τα υλικά σταθεροποίησης. Ο όγκος της τελικής μάζας είναι μεγαλύτερος συγκριτικά με τον αρχικό όγκο του προς αποκατάσταση εδάφους. Το γεγονός συνδέεται άμεσα με την επιλογή της μετακίνησης του τελικού προϊόντος σε κάποιο χώρο αποθήκευσης, καθώς αυξάνεται το κόστος μεταφοράς συγκριτικά με την μεταφορά του αρχικού όγκου του ρυπασμένου υλικού σε κάποιο άλλο χώρο για επεξεργασία. Το προϊόν που προκύπτει απαιτεί περαιτέρω παρακολούθηση αλλά και αντιμετώπιση καθώς διαθέτει το χαρακτηρισμό «επικίνδυνα απορρίμματα» και νομικά θα πρέπει να ληφθεί η αντίστοιχη αντιμετώπιση. Ίσως ένα από τα σημαντικά μειονεκτήματα της μεθόδου, αποτελεί η αδυναμία της να αντιμετωπίσει ρύπους σε σχετικά μεγάλα βάθη. Η περίπτωση εκσκαφής για την ανάμειξη του ρυπασμένου εδάφους συντελεί στην αύξηση του κόστους. Επιπλέον αρκετές φορές απαιτείται η μετακίνηση του τελικού προϊόντος σε άλλες τοποθεσίες συνδράμοντας με αυτό το τρόπο σε περαιτέρω αύξηση του κόστους (EPA, 1986).

Όταν η μέθοδος εφαρμόζεται in situ πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν η μακροπρόθεσμη επίδραση στο περιβάλλον. Στην περίπτωση των μονόλιθων η εποχιακή μεταβολή της υγρασίας που λαμβάνει σε συνεργασία με τις χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να προκαλέσει τη φθορά του, με συνέπεια την επανέσοδο των ρύπων στο έδαφος. Σε in-situ εφαρμογές το σταθεροποιημένο – λιθοποιημένο έδαφος ίσως αποτρέψει οποιαδήποτε μελλοντική χρήση της εξυγιασμένης περιοχής. Επιπλέον είναι πιθανός ο περιορισμός της χλωρίδας που μπορεί να αναπτυχθεί, ειδικότερα για φυτά των οποίων οι ρίζες αναπτύσσονται σε μεγάλα εδάφη. Εξαιτίας της αδιαπερατότητας του υλικού θα πρέπει να ληφθούν μέτρα για τη διαχείριση της επιφανειακής απορροή των υδάτων αν κριθεί αναγκαίο (https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf). Τέλος, δεν μπορεί να αντιμετωπίσει τοποθεσίες όπου η ρύπανση εκτείνεται σε μεγάλη επιφάνεια. Η εφαρμογή της περιορίζεται στην αντιμετώπιση hot spots.

4.2.7 Μέθοδος Οξειδοαναγωγής

Η μέθοδος περιλαμβάνει αντιδράσεις οξειδοαναγωγής οι οποίες μετατρέπουν χημικώς ρύπους σε ακίνδυνες ή λιγότερο τοξικές μορφές οι οποίες είναι σταθερότερες, λιγότερο κινητικές ή αδρανείς. Οι οξειδωτικοί παράγοντες που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των ρύπων στο έδαφος περιλαμβάνουν όζον, υπεροξείδιο του υδρογόνου, υποχλωριώδη, υπερμαγγανικό κάλιο, το αντιδραστήριο Fenton (υπεροξείδιο του υδρογόνου και σίδηρος) (σχήμα 4.15), χλώριο και διοξείδιο του χλωρίου. Η επιλογή του αντιδραστήριου καθορίζεται από τους ρύπους που καλείται να

αντιμετωπισθούν. Η χρήση κάθε αντιδραστηρίου συνοδεύεται από πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Παρά τη δυνατότητα χρήσης τους για την αντιμετώπιση της ρύπανσης του εδάφους η συνήθης χρήση τους είναι για την αποκατάσταση των υπογείων υδάτων. Για την εφαρμογή της μεθόδου θα πρέπει να ληφθούν αποφάσεις όπως ο τρόπος με τον οποίο θα εισαχθούν τα αντιδραστήρια στην προς αποκατάσταση περιοχή, ο οποίος εξαρτάται από το επιθυμητό βάθος, η φάση του αντιδραστηρίου (αέριο, υγρό, στερεό).

Ο συνήθης τρόπος διοχέτευσης στο υπέδαφος είναι με τη βοήθεια γεωτρήσεων όπου ανάλογα με τη φάση στην οποία διοχετεύεται το αντιδραστήριο πραγματοποιείται είτε με τη βοήθεια της βαρύτητας είτε με τη χρήση αντλιών για να διοχετευθεί υπό πίεση. Για το ακόρεστο υπέδαφος η εισαγωγή με τη βοήθεια της βαρύτητας έχει το μειονέκτημα της μικρής ακτίνας επιρροής συγκριτικά με την έγχυση υπό πίεση. Για την προσθήκη στερεών αντιδραστηρίων σε σχετικά μεγάλα βάθη χρησιμοποιείται η τεχνολογία της υδραυλικής διάνοιξης ρωγμών. Αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί *in situ* ή *ex situ* σε ακόρεστα και κορεσμένα εδάφη. Η χημική επεξεργασία μπορεί επίσης να περιλαμβάνει τη χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) (Φάμελλος, 2012).

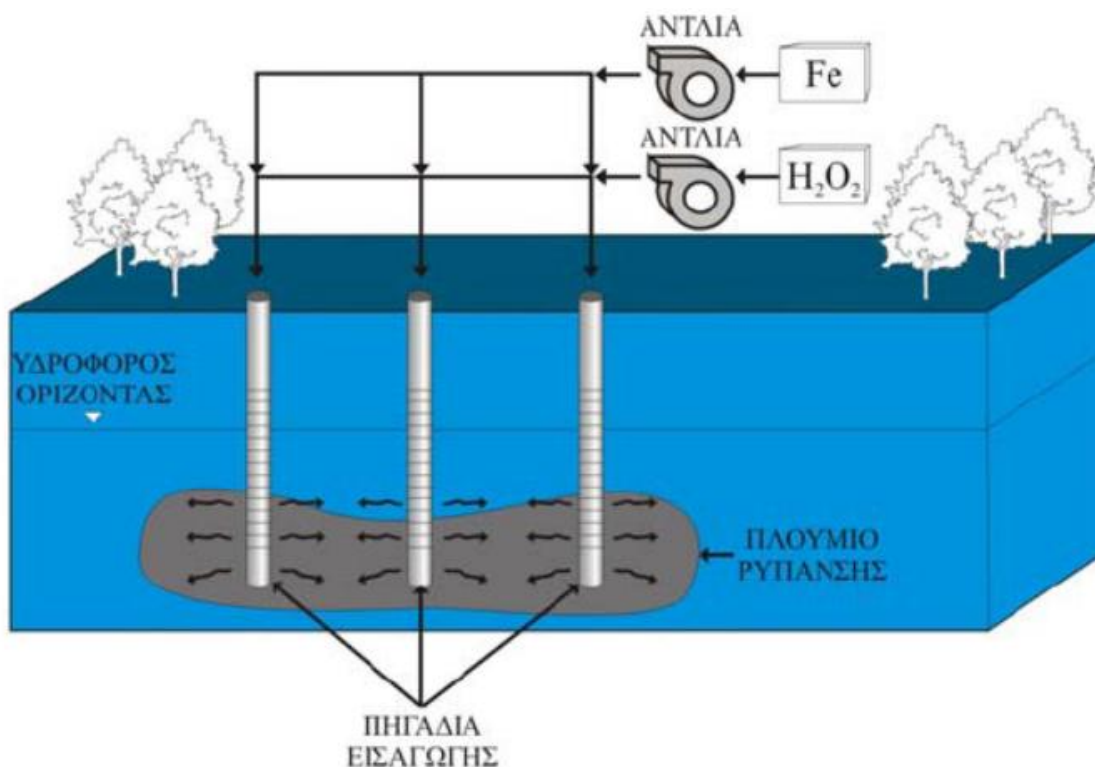
4.3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

Σε αυτή τη κατηγορία ανήκουν μέθοδοι οι οποίες έχουν τη δυνατότητα εφαρμογής *in situ*. Συγκεκριμένα, υαλοποίηση, η θέρμανση του εδάφους με χρήση ηλεκτρικών αντιστάσεων και άλλων μηχανισμών, η έγχυση ατμού και άντληση, η πυρόλυση και η αποτέφρωση (καύση). Με την εξαίρεση της υαλοποίησης οι υπόλοιπες μέθοδοι βασίζονται στην αρχή της αύξησης της θερμοκρασίας του εδάφους για την αύξηση της αποδοτικότητας απομάκρυνσης οργανικών ρύπων μέσω πτητικότητας. Σε αυτές τις θερμοκρασίες οι οργανικοί ρύποι πρακτικά εξατμίζονται ή διασπώνται. Τα αέρια που προκύπτουν συλλέγονται και επεξεργάζονται περαιτέρω από κατάλληλες διατάξεις,

4.3.1 Υαλοποίηση

Η μέθοδος της υαλοποίησης βασίζεται στην θέρμανση του εδάφους σε υψηλές θερμοκρασίες (1.400 – 2.000°C), με στόχο την τήξη του εδάφους και την καταστροφή των υφιστάμενων ρύπων ή τουλάχιστον την παγίδευση και κατά συνέπεια τον περιορισμό τους εντός του τηκόμενου υλικού. Η μέθοδος έχει τη δυνατότητα αντιμετώπισης οργανικών και ανόργανων ρύπων. Οι οργανικοί ρύποι είτε καταστρέφονται είτε εξαερώνονται από τις υψηλές θερμοκρασίες που προκαλούνται για την εφαρμογή της μεθόδου. Η αντιμετώπιση των ανόργανων ρύπων όπως είναι τα βαρέα μέταλλα πραγματοποιείται με διαφορετικό μηχανισμό. Εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που εφαρμόζονται και της συνεπακόλουθης τήξης του εδάφους, τα βαρέα μέταλλα περικλείονται εντός του ρευστοποιημένου εδάφους με αποτέλεσμα την παγίδευση, ακινητοποίηση τους μετά από την ψύξη και στερεοποίηση του (EPA, 2006, https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf).

Η διαδικασία μπορεί να λάβει χώρα είτε στην προς εξυγίανση τοποθεσία είτε σε κατάλληλες εγκαταστάσεις κατόπιν εκσκαφής και μεταφοράς τους. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ηλεκτρισμό για την παραγωγή θερμότητας ώστε να επιτευχθεί τήξη του ρυπασμένου εδάφους με το προϊόν να αποτελεί μια μορφή υάλου ύστερα από την φυσική του πήξη. Παράδειγμα της μορφής του τελικού προϊόντος παρουσιάζεται στο σχήμα 4.16. Η εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιείται με την εισαγωγή ηλεκτροδίων γραφίτη στην ρυπασμένη περιοχή και με την εφαρμογή ηλεκτρικής αντίστασης επιτυγχάνονται θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 1700 °C με αποτέλεσμα την τήξη του εδάφους σε συνδυασμό με πρόσθετα απαραίτητα για την δημιουργία υαλωδών επιφανειών. Οι ατμοί



Σχήμα 4.15: In-Situ εφαρμογή για την εξυγίανση υπογείων υδάτων με χρήση αντιδραστηρίου Fenton (Πηγή: Φάμελλος, 2012).

Ο συνήθης τρόπος διοχέτευσης στο υπέδαφος είναι με τη βοήθεια γεωτρήσεων όπου ανάλογα με τη φάση στην οποία διοχετεύεται το αντιδραστήριο πραγματοποιείται είτε με τη βοήθεια της βαρύτητας είτε με τη χρήση αντλιών για να διοχετευθεί υπό πίεση. Για το ακόρεστο υπέδαφος η εισαγωγή με τη βοήθεια της βαρύτητας έχει το μειονέκτημα της μικρής ακτίνας επιρροής συγκριτικά με την έγχυση υπό πίεση. Για την προσθήκη στερεών αντιδραστηρίων σε σχετικά μεγάλα βάθη χρησιμοποιείται η τεχνολογία της υδραυλικής διάνοιξης ρωγμών. Αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί in situ ή ex situ σε ακόρεστα και κορεσμένα εδάφη. Η χημική επεξεργασία μπορεί επίσης να περιλαμβάνει τη χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) που παράγονται και τα παραπροϊόντα της καύσης συλλέγονται μέσω κατάλληλου συστήματος το οποίο απαιτείται να μειώσει τη θερμοκρασία των συλλεγόμενων αερίων ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία τους η οποία πραγματοποιείται συνήθως με τη χρήση

ενεργού άνθρακα. Το πυρολυμένο προϊόν μετά την ψύξη του εμφανίζει υαλώδης μορφή και περικλείει τα βαρέα μέταλλα προκαλώντας την ακινητοποίηση τους. Έχει αναφερθεί πως το τελικό προϊόν διαθέτει 10 φορές μεγαλύτερη ακαμψία από του τσιμέντου.



Σχήμα 4.16: Προϊόντα εφαρμογής της μεθόδου υαλοποίησης (Πηγή: <http://www.containment.fsu.edu/cd/content/pdf/132.pdf>)

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η δυνατότητα της ταυτόχρονης αντιμετώπισης περιπτώσεων ρύπανσης όπου περιέχονται οργανικοί και ανόργανοι ρύποι, πρακτικά η μέθοδος διαθέτει τις προϋποθέσεις αντιμετώπισης οποιουδήποτε ρύπου. Χαρακτηρίζεται από υψηλή αποτελεσματικότητα. Δεν παρουσιάζει προβλήματα εφαρμογής στην περίπτωση τοποθεσιών με ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων. Για αυτό το λόγο η μέθοδος εφαρμόζεται για την αντιμετώπιση ρυπασμένων περιοχών που αποτελούν χώρους εναπόθεσης απορριμμάτων με υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων.

Επιπλέον παρέχεται η επιλογή για την εφαρμογή της in situ με συνέπεια να μην είναι απαραίτητη η εκσκαφή και μετακίνηση των ρύπων στην επιφάνεια του εδάφους αποφεύγοντας τις επιπτώσεις που τις συνοδεύουν. Το υαλώδες προϊόν που προκύπτει χαρακτηρίζεται από μηδενική διαλυτότητα και μακροπρόθεσμη σταθερότητα. Χαρακτηριστικά το προϊόν που προκύπτει είναι αρκετά σταθερό ώστε να είναι δυνατή η ανέγερση κατασκευών.

Η μέθοδος μειονεκτεί από οικονομική σκοπιά καθώς οι απαιτήσεις για εξειδικευμένο εξοπλισμό και προσωπικό σε συνδυασμό με τις μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις και την ανάγκη επεξεργασίας των αερίων που παράγονται έχουν ως αποτέλεσμα το υψηλό οικονομικό κόστος. Στα σημαντικά μειονεκτήματα της αναγνωρίζεται το γεγονός πως αποτελεί μια καταστροφική διαδικασία. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου οποιαδήποτε βιολογική δραστηριότητα εντός της περιοχής επεξεργασίας καταστρέφεται. Επιπλέον οι ιδιότητες του τελικού προϊόντος της μεθόδου (αδιαπέρατο) έχουν ως συνέπεια την απώλεια ανάπτυξης και συντήρησης χλωρίδας εκτός και αν καλυφθεί με καινούριο εδαφικό υλικό το οποίο όμως θα περιορίζεται από την παρουσία του προϊόντος (EPA, 1990). Θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα για τη

διαχείριση της επιφανειακής απορροής των υδάτων. Τα αέρια που παράγονται πρέπει να ληφθεί μέριμνα για την αντιμετώπιση τους.

Το βάθος των ρύπων αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την αποδοτική εφαρμογή της μεθόδου. Το παρόν τεχνολογικό επίπεδο επιτρέπει την εφαρμογή της μεθόδου σε μέγιστο βάθος 6-10 m. Είναι πιθανή η αύξηση του όγκου του εδάφους. Η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση όπου το οργανικό περιεχόμενο του εδάφους είναι μεγαλύτερο από 10% αποτέλεσμα είναι η αύξηση του χρόνου εφαρμογής της μεθόδου. Στην αύξηση του χρόνου εφαρμογής συντελεί και η παρουσία υψηλού ποσοστού υγρασίας. Υπάρχει η πιθανότητα μετακίνησης και διαφυγής των αερίων ρύπων σε γειτονικές περιοχές αντί για την αναμενόμενη επιφάνεια του εδάφους (EPA, 1990). Επιπλέον για την εφαρμογή της μεθόδου το έδαφος απαιτεί να περιέχει αγώγιμα κατιόντα όπως νάτριο, λίθιο, μαγνήσιο κτλ.. Επιπλέον θα πρέπει να περιέχει στοιχεία ικανά για το σχηματισμό υάλου όπως πυρίτιο και αλουμίνα αν και αυτό σπανίως αποτελεί περιορισμό (EPA, 2006).

4.3.2 Θέρμανση με ηλεκτρική αντίσταση

Ο πιο κοινός τρόπος θέρμανσης εδαφών είναι η διοχέτευση ηλεκτρικού ρεύματος, η οποία λόγω της ηλεκτρικής αντίστασης, που παρουσιάζει το έδαφος (ιδιαίτερα όταν έχει χαμηλή διαπερατότητα), έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας. Η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία αφενός ξηραίνει το έδαφος, δημιουργώντας ρωγμές και αυξάνοντας το πορώδες και τη διαπερατότητα του και αφετέρου ενισχύει την εξάτμιση των υφιστάμενων ρύπων, οι οποίοι μεταφέρονται στην αέρια φάση. Για την εφαρμογή της απαιτείται η διάνοιξη γεωτρήσεων για τη τοποθέτηση ηλεκτροδίων με σκοπό τη διανομή του ηλεκτρικού ρεύματος σε επιλεγμένα βάθη. Οι γεωτρήσεις αυτές έχουν διττό ρόλο καθώς είναι δυνατή μέσω αυτών και η συλλογή των αερίων που προκύπτουν από τη θέρμανση του εδάφους. Μετά τη συλλογή των αερίων απαιτείται η επεξεργασία τους σε εγκαταστάσεις στην επιφάνεια του εδάφους. Οι πιθανοί τρόποι για την αύξηση της θερμοκρασίας είναι η χρήση ηλεκτρικών αντιστάσεων, ραδιοκύματα, ηλεκτρομαγνητισμός για την αύξηση του ρυθμού πτητικότητας ημι-πτητικών ρύπων με σκοπό την ευκολότερη εξαγωγή τους. Τελικώς η μέθοδος ακολουθεί ένα συνδυασμό μηχανισμών θέρμανσης του εδάφους για την αποτελεσματικότερη εξαγωγή ατμών από το έδαφος (https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf). Η χρήση της μεθόδου περιορίζεται στην αντιμετώπιση οργανικών ρύπων και εφαρμόζεται in situ στην περιοχή προς αποκατάσταση.

Για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου έχει σημασία το ποσοστό υγρασίας του εδάφους. Συνεπώς στην περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου στην ακόρεστη ζώνη ίσως να είναι αναγκαία η εισαγωγή ύδατος ιδιαίτερα μετά από μακροχρόνια λειτουργία των ηλεκτροδίων. Μια τυπική διάταξη της μεθόδου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.17 και αποτελείται από τρεις σειρές ηλεκτροδίων τοποθετημένες σε συγκεκριμένο βάθος. Ηλεκτρική ενέργεια εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια τα οποία αρχίζουν να ανεβάζουν τη θερμοκρασία του εδάφους απομακρύνοντας την υγρασία του. Περιοριστικοί παράγοντες για την εφαρμογή της μεθόδου αποτελούν η πτητικότητα του ρύπου, η

έλλειψη αέρα σε κορεσμένα περιβάλλοντα και η διαπερατότητα του εδάφους στη ροή των εισερχόμενων αερίων.

4.3.3 Πυρόλυση

Η πυρόλυση είναι μια διαδεδομένη μέθοδος θερμικής επεξεργασίας αποβλήτων και ρυπασμένων εδαφών. Στηρίζεται στην αύξηση της θερμοκρασίας για την επίτευξη της θερμικής αποδόμησης των ρύπων απουσία οξυγόνου ή άλλων αντιδρώντων αερίων. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση οργανικών ρύπων. Η πυρόλυση λαμβάνει χώρα υπό πίεση και σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες οι οποίες είναι μεγαλύτερες από 400 °C αλλά μικρότερες από 800 °C. Τα τελικά προϊόντα της περιλαμβάνουν καύσιμα αέρια συστατικά (π.χ. CO, CH₄, H₂, κα.), μικρές ποσότητες υγρών και ένα στερεό υπόλειμμα, που περιέχει άνθρακα και τέφρα.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι το μικρό χρονικό διάστημα αποκατάστασης του εδάφους και το μικρότερο κόστος εφαρμογής συγκριτικά με τη μέθοδο της αποτέφρωσης. Ακόμη ο απαιτούμενος εξοπλισμός είναι άμεσα διαθέσιμος καθώς η χρήση θερμικών μεθόδων στο κλάδο της βιομηχανίας είναι διαδεδομένος. Η μέθοδος είναι δυνατό να εφαρμοστεί στην τοποθεσία όπου απαιτείται η απορρύπανση. Είναι δυνατό να ανταποκριθεί σε ρυπασμένα εδάφη με υψηλές συγκεντρώσεις οργανικών ρύπων. Οι αντιδράσεις, που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκειά εφαρμογής της μεθόδου, είναι ενδόθερμες με αποτέλεσμα να είναι δυνατός ο έλεγχος της θερμοκρασίας επεξεργασίας. Οι σχετικά μικρές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται βοηθούν στη συγκράτηση του κόστους συγκριτικά με άλλες θερμικές μεθόδους. Το παραγόμενο ανθρακικό στερεό υπόλειμμα (κωκ) είναι κατάλληλο για απευθείας διάθεση σε κατάλληλο χώρο οι οποίοι συνήθως είναι χώροι διάθεσης απορριμμάτων. Επιπλέον είναι δυνατή η χρήση του ανάλογα με την περιεκτικότητα του σε βαρέα μέταλλα για γεωργική χρήση ή στην παραγωγή τσιμέντου. Η παρουσία του κωκ σε στερεό υπόλειμμα συντελεί στην απομάκρυνση ποσοτήτων άνθρακα από την ατμόσφαιρα συμβάλλοντας με αυτό το τρόπο στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής (Γιδαράκος, 2008, https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf).

Τα μειονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τη μέθοδο είναι κυρίως οι απαιτήσεις της για συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τροφοδοσίας (π.χ. μέγεθος σωματιδίων, υγρασία, κα.), αυξάνοντας σημαντικά τις απαιτήσεις προεπεξεργασίας του προς εξυγίανση εδάφους, με άμεση συνέπεια την αύξηση του κόστους εφαρμογής της. Ίδια δράση στο κόστος εφαρμογής αντιμετωπίζεται στην περίπτωση που στο προς επεξεργασία έδαφος περιέχονται βαρέα μέταλλα τα οποία θα καταλήξουν στη τέφρα που προκύπτει μετά από την εφαρμογή της μεθόδου. Η συνήθης αντιμετώπιση είναι η στερεοποίηση τους με υλικά όπως το τσιμέντο. Επιπλέον για την εφαρμογή της απαιτείται η εκσκαφή του ρυπασμένου εδάφους. Έπεται η εισαγωγή του σε ειδικούς αντιδραστήρες πυρόλυσης, οι οποίοι συνήθως είναι αποτεφρωτές οι οποίοι απλώς λειτουργούν σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Τα απαέρια από τη διαδικασία της πυρόλυσης συχνά απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία πριν την απελευθέρωση τους στην ατμόσφαιρα. Είναι δυνατό να απαιτηθεί

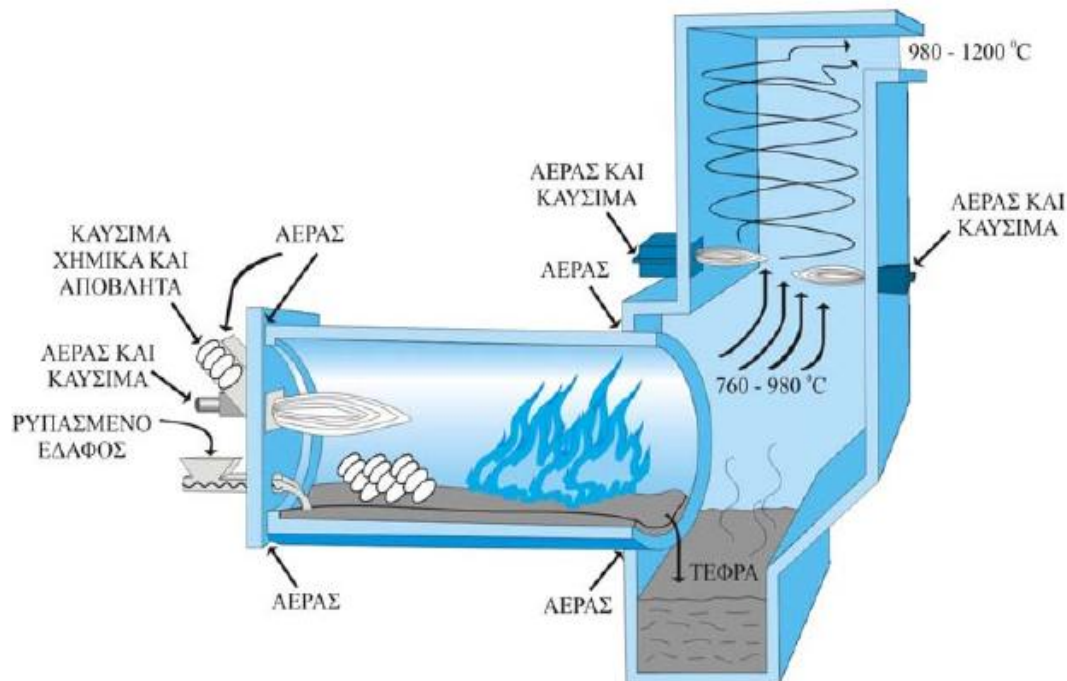
και επεξεργασία της τέφρας που προκύπτει ιδιαίτερα εάν παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση βαρέων μετάλλων.

4.3.4 Αποτέφρωση ή καύση

Αποτέφρωση είναι η καύση των πτητικών συστατικών σε υψηλές θερμοκρασίες (1100 - 1400°C) και μετατροπή τους σε CO₂ και H₂O.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι η αποτέφρωση μπορεί να αντιμετωπίσει «δύσκολους» επικίνδυνους και τοξικούς ρύπους, που άλλες τεχνολογίες εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών δεν μπορούν. Υπάρχουν σημαντικά κέρδη σχετικά με το χρόνο που απαιτεί για την εξυγίανση του εδάφους. Επιπλέον δεν υπάρχει η απαίτηση για ιδιαίτερη μελέτη και γνώση των χαρακτηριστικών της τοποθεσίας προς εξυγίανση εξοικονομώντας με αυτό το τρόπο χρόνο και χρήματα. Έχει τη δυνατότητα εφαρμογής στη τοποθεσία αποφεύγοντας την ανάγκη μεταφοράς του εδάφους σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Στο σχήμα 4.18 παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη καύσης. Η αποτέφρωση, όπως και όλες οι θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας, προτιμάται σε ειδικές μόνο περιπτώσεις, λόγω του αυξημένου κόστους εφαρμογής τους, όπου άλλες διαθέσιμες τεχνολογίες δεν μπορούν να εφαρμοστούν, είτε λόγω των χαρακτηριστικών του προς επεξεργασία πεδίου, είτε λόγω των ιδιαίτερων ιδιοτήτων και της επικινδυνότητας των υφιστάμενων ρύπων.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνουν υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας. Αποτελεί ex-situ διεργασία, η οποία απαιτεί την εκσκαφή του ρυπασμένου εδάφους και τη μεταφορά του σε κατάλληλες εγκαταστάσεις, αυξάνοντας ακόμη περισσότερο το απαιτούμενο κόστος εξυγίανσης, απαιτεί πολύ καλή προεπεξεργασία του προς εξυγίανση εδάφους, ώστε να πληροί τα συγκεκριμένα κριτήρια τροφοδοσίας της χρησιμοποιούμενης μονάδας, η παρουσία βαρέων μετάλλων στο προς εξυγίανση έδαφος δημιουργεί στάχτη, η οποία απαιτεί κατάλληλη επεξεργασία (π.χ. σταθεροποίηση – στερεοποίηση) πριν την τελική της διάθεση, η παρουσία πτητικών μετάλλων (π.χ. μολύβδου, καδμίου, υδράργυρου και αρσενικού) στο προς επεξεργασία έδαφος επιβάλλει την επεξεργασία των παραγόμενων αερίων, τα οποία αναμένεται να είναι πλούσια σε αυτά τα συστατικά, διάφορα μέταλλα, που είναι δυνατόν να υπάρχουν στο προς επεξεργασία έδαφος, ίσως αντιδράσουν με άλλα παρόντα στοιχεία (π.χ. χλώριο και θείο), σχηματίζοντας πιο πτητικούς ή τοξικούς ρύπους από εκείνους που υπήρχαν αρχικά. Η απαιτούμενη επεξεργασία των παραγόμενων αποβλήτων, πριν την τελική τους διάθεση σε κάποιο κατάλληλο χώρο, αποτελεί μειονέκτημα της μεθόδου.



Σχήμα 4.18: Εξυγίανση εδαφικού υλικού με τη μέθοδο της αποτέφρωσης

4.3.5 Έγχυση ατμού και άντληση

Η μέθοδος αυτή αποτελεί βελτιωμένη εκδοχή της μεθόδου άντλησης αέρα (SVE), προβάλλοντας τους ίδιους περιορισμούς ως προς τους ρύπους που μπορεί να αντιμετωπίσει. Η μέθοδος ακολουθεί την ίδια τεχνική με την *in situ* αναρρόφηση αέρα με τη διαφοροποίηση της έγχυσης ζεστού αέρα ή ατμού ώστε να επιτευχθεί μείωση του χρόνου εκτέλεσης της εργασίας. Στη συγκεκριμένη μέθοδο η θερμοκρασία ατμού πλησιάζει τη θερμοκρασία των 200⁰ C και του πεπιεσμένου αέρα στους 135⁰. Ο ατμός και το μείγμα αέρα και ρύπων από το υπέδαφος συλλέγονται από πηγάδια που έχουν διανοιχτεί (Abioye, 2011).

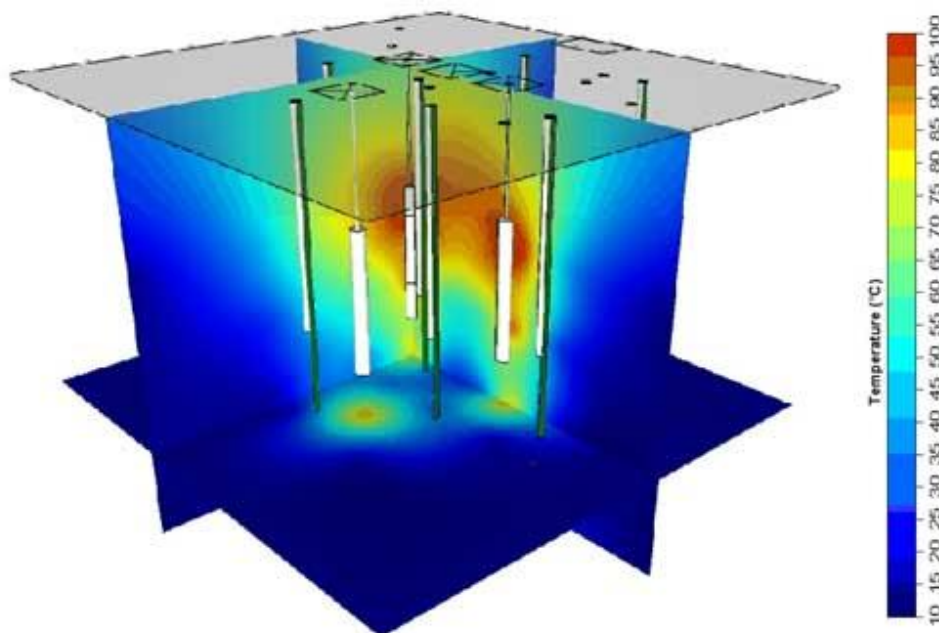
Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για την απομάκρυνση πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs), ειδικότερα καυσίμων. Εφαρμόζεται συχνά σε περιοχές αποκατάστασης όπου το έδαφος χαρακτηρίζεται από υψηλά ποσοστά υγρασίας, τα οποία αποτελούν φραγμό για την εφαρμογή της τυπικής μεθόδου SVE.

Οι περιορισμοί της μεθόδου έχουν να κάνουν με την εξάρτηση της απόδοσης από τις ιδιότητες του εδάφους. Εδάφη με μεταβλητή περατότητα μπορεί να καταλήξουν σε ανομοιόμορφη κατανομή της ροής του αερίου μέσου στο υπέδαφος της υπό αποκατάστασης περιοχής. Η απόδοση στην εξαγωγή ορισμένων ρύπων εξαρτάται από τη μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να επιτευχθεί από τη μέθοδο. Απαιτείται η

εγκατάσταση συστήματος επεξεργασίας των ρυπασμένων ατμών που συλλέγονται από το υπέδαφος. Η εισαγωγή ζεστού αέρα κατέχεται από περιορισμούς εξαιτίας την χαμηλής θερμοχωρητικότητας του αέρα. Όσο μικρότερη η περατότητα του εδάφους και μεγαλύτερο το ποσοστό υγρασίας τόσο μεγαλύτερες οι ενεργειακές απαιτήσεις καθώς απαιτείται αυξημένο κενό και θερμότητα (https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.-Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf).

Η μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματα της in situ αντιμετώπισης και της αποκατάστασης χωρίς την πρόκληση όχλησης και εκσκαφής (Abioye, 2011). Ακόμη παρατηρείται διαθεσιμότητα του απαραίτητου εξοπλισμού. Στην εφαρμογή της μεθόδου δημιουργούνται συνθήκες υποπίεσης στο έδαφος ώστε να επιτευχθεί έλεγχος της κυκλοφορίας αέρα για την απομάκρυνση των πτητικών και ημι-πτητικών ενώσεων από το έδαφος. Εξαιτίας του κενού που εφαρμόζεται μειώνεται η πιθανότητα διαφυγής ρύπων στην ατμόσφαιρα. Ο αέρας που συλλέγεται από το έδαφος μπορεί να επεξεργαστεί ώστε να ανακτηθούν ή να καταστραφούν οι ενώσεις (Abioye, 2011). Καθώς η διαδικασία περιλαμβάνει τη συνεχή κίνηση αέρα βοηθά στην βιολογική αποικοδόμηση μικρής πτητικότητας οργανικών ενώσεων που τυγχάνει να είναι στην τοποθεσία και σε απόσταση επιρροής όπως φαίνεται στο σχήμα. Στο σχήμα 4.19 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο διανέμεται η θερμότητα στο έδαφος (Abioye, 2011, <http://waterandsoilbioremediation.com/index.php/in-situ-remediation-methods/soil-vapor-extraction-sve>).

Μειονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν η αδυναμία απομάκρυνσης ελαίων, μετάλλων, διοξινών και PCBs (Abioye, 2011).



Σχήμα 4.19: Απεικόνιση αύξησης της θερμοκρασίας στο υπέδαφος με τη χρήση έκχυσης ζεστού ατμού και τρόπος διάχυσης της θερμότητας (Πηγή: <http://www.ecologia-environmental.com/index.php/remediation/in-situ-remediation/in-situ-soil-radio-frequency-heating/>).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5- ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ

Το θεσμικό πλαίσιο των ΗΠΑ είναι η πιο διεξοδική νομοθεσία για θέματα ρύπανσης και αποκατάστασης του εδάφους, ενώ η Ευρώπη με πρωτοπόρο την Ολλανδία, το 1976 αποφάσισε να εντάξει την προστασία του εδάφους στην εθνική περιβαλλοντική πολιτική της. Από τότε, η Ευρωπαϊκή πρακτική ακολούθησε αντίστοιχη ανάπτυξη με την Αμερικάνικη, όσον αφορά στην επιβολή νομοθετικών περιορισμών στα επί μέρους θέματα προστασίας του περιβάλλοντος από τη ρύπανση, με τη θέσπιση πληθώρας Οδηγιών (Council Directives) που ισχύουν στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι νόμοι καθορίζουν τη διαδικασία καταγραφής, χαρακτηρισμού και αξιολόγησης των πιθανά ρυπασμένων τοποθεσιών, καθώς επίσης δίνουν και κατευθυντήριες γραμμές για την επιλογή και εφαρμογή μέτρων αποκατάστασης, όπου αυτά κριθούν απαραίτητα.

Παρά τη κοινή πολιτική δεν έχει θεσπιστεί συγκεκριμένο νομικό πλαίσιο για την περιγραφή της κατάστασης του εδάφους. Μολονότι η αξία του εδάφους τυγχάνει αναγνώρισης, η νομοθεσία για το χαρακτηρισμό, την προστασία και αποκατάσταση του δεν τυγχάνει της ίδιας νομικής εξασφάλισης όπως άλλοι φυσικοί πόροι. Συγκεκριμένα αν και υπάρχει νομοθεσία για την προστασία και το χαρακτηρισμό φυσικών πόρων όπως ο αέρας και τα ύδατα, δεν υπάρχει αντίστοιχη νομοθεσία η οποία να προσδιορίζει και να αντιμετωπίζει το ζήτημα της ρύπανσης του εδάφους (96/61/EK). Η υπάρχουσα πολιτική σε ευρωπαϊκό επίπεδο είναι η αντιμετώπιση της ρύπανσης του εδάφους έμμεσα στην προσπάθεια διαφύλαξης άλλων φυσικών πόρων, όπως τα υπόγεια ύδατα.

Οι ενέργειες αποκατάστασης έχουν στόχο την προστασία και διατήρηση του εδάφους. Συνεπώς οποιαδήποτε νομοθεσία σχετίζεται με την προστασία του εδάφους θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν. Εντούτοις, διατάξεις που αποβλέπουν στην προστασία του εδάφους βρίσκονται κατακερματισμένες σε πολλά θεματικά πεδία και, καθώς συχνά αποσκοπούν στη διαφύλαξη άλλων περιβαλλοντικών μέσων ή στην προώθηση άλλων στόχων, δεν συνιστούν μια συνεκτική πολιτική για την προστασία του εδάφους. Αυτό σημαίνει ότι, ακόμη και αν αξιοποιηθούν πλήρως, οι υπάρχουσες πολιτικές απέχουν από το να καλύπτουν όλα τα εδάφη και όλους τους μέχρι στιγμής εξακριβωμένους κινδύνους που τα απειλούν. Συνεπώς, η υποβάθμιση του εδάφους συνεχίζεται (EEK, 2006) και δεν υπάρχει έγγραφο πολιτικής το οποίο να απευθύνεται στα θέματα που συνοδεύουν τις ρυπασμένες τοποθεσίες. Υπάρχει όμως μια σειρά εγγράφων της ΕΕ τα οποία έμμεσα απευθύνονται στο πρόβλημα των ρυπασμένων τοποθεσιών. Οι χώρες μέλη έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν σύμφωνα με την εθνική πολιτική ή ακόμη και τοπικές υποχρεώσεις. Ελάχιστες είναι οι χώρες οι οποίες απευθύνονται στο πρόβλημα της ρύπανσης των τοποθεσιών με συγκεκριμένη νομοθεσία. Στις περισσότερες χώρες το ζήτημα αντιμετωπίζεται από νόμους σχετικούς με το περιβάλλον ή με νόμους για τα απορρίμματα και τα υπόγεια ύδατα (ΕΕΑ, 1999).

Ακόμη όμως και χώρες που διαθέτουν νομοθεσία για την προστασία και τη ρύπανση του εδάφους είναι στοιχειώδης και δεν περιλαμβάνει όλο το φάσμα των γνωστών ρύπων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Ελβετία η οποία πάρα το γεγονός πως διαθέτει νομοθεσία σχετική με το έδαφος οι ρύποι στους οποίους απευθύνεται είναι συγκεκριμένη. Η προσέγγιση στην αποκατάσταση εδαφών είναι αρχικά ο προσδιορισμός τους. Ακόμη και τώρα δεν είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός του αριθμού τοποθεσιών που απαιτούν αποκατάσταση. Το υψηλό κόστος της αποκατάστασης σε συνδυασμό με το μεγάλο αριθμό τοποθεσιών έχουν

οδηγήσει στην ανάγκη θέσπισης προτεραιοτήτων για την επιλογή των τοποθεσιών που θα εφαρμοστεί. Η αρχική προσέγγιση στην απορρύπανση του εδάφους ήταν η προσπάθεια πλήρους απομάκρυνσης των ρύπων. Ο συγκεκριμένος στόχος αποδείχθηκε ουτοπικός εξαιτίας του υψηλού κόστους και των δυνατοτήτων των μεθόδων που εφαρμόστηκαν. Αποτέλεσμα ήταν ο επαναπροσδιορισμός των στόχων απορρύπανσης. Πλέον ο στόχος σχετικά με τη συγκέντρωση των ρύπων καθορίζεται από τη μελλοντική χρήση της περιοχής.

Πίνακας 5.1: Νομοθεσίες που αφορά την διαχείριση των ρυπασμένων τοποθεσιών ανά χώρα..

	AT	BE ¹	CH	DE ²	DK	ES	FI	FR	GR	IC	IE	IT	LU	NL	NO	PT	SE	UK
Environmental Protection	•							•	•	•	•			•		•	•	•
Waste legislation						•	•	•			•	•	•					
Groundwater legislation	•							•										
Soil protection				•	•	•								•	•			
Soil clean-up		•	•	•	•										•			

1) the Flemish Region

2) at the Länder level.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο η προστασία του εδάφους προσεγγίζεται μέσω των παρακάτω οδηγιών πραγματοποιώντας χρήση της νομοθεσίας που σχετίζεται με τη διαχείριση των στερεών απορριμμάτων.

- Ø Η οδηγία 91/676/ΕΟΚ σχετικά με την προστασία των υδάτων από τη νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης περιλαμβάνει διατάξεις για την προστασία και τη διαχείριση του εδάφους.
- Ø Η οδηγία 94/923/ΕΚ περί θεσπίσεως οικολογικών κριτηρίων για την απονομή του κοινοτικού οικολογικού σήματος σε βελτιωτικά εδάφους. Για την αποφυγή υποβάθμισης του εδάφους και των υδάτων καθορίζει τις μέγιστες επιτρεπτές τιμές συγκεκριμένων στοιχείων. Ενδιαφέρον αποτελεί το γεγονός πως το οικολογικό σήμα αναφέρεται για προϊόντα που η οργανική ύλη τους προέρχεται από την επεξεργασία ή και την επαναχρησιμοποίηση αποβλήτων (όπως ορίζονται στην οδηγία 75/442/ΕΟΚ περί στερεών αποβλήτων και στο παράρτημα της εν λόγω οδηγίας).
- Ø Η οδηγία 96/61/ΕΚ σχετικά με την ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχο της ρύπανσης. Αναφέρεται στην έλλειψη νομοθεσίας για την πρόληψη και προστασίας του εδάφους “μολονότι υπάρχει κοινοτική νομοθεσία για την καταπολέμηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και για την πρόληψη ή την ελαχιστοποίηση των απορρίψεων επικίνδυνων ουσιών στο νερό, δεν υπάρχει συγκρίσιμη κοινοτική νομοθεσία για την πρόληψη ή τη μείωση των εκπομπών στο έδαφος”. “Η οδηγία προβλέπει μέτρα αποφυγής και, όταν αυτό δεν είναι δυνατόν, μείωσης των εκπομπών από τις ανωτέρω δραστηριότητες στην ατμόσφαιρα, το νερό και το έδαφος, και μέτρα για τα απόβλητα, ώστε να επιτευχθεί υψηλό επίπεδο προστασίας του περιβάλλοντος στο σύνολο του”.
- Ø Η Οδηγία 98/83/ΕΚ σχετικά με την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης

καθορίζει τις μέγιστες επιτρεπτές τιμές για μια σειρά από μικροβιολογικές και χημικές παραμέτρους.

- Ø Η οδηγία 200/60/EK για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων, αποτελεί παράδειγμα έμμεσης προστασίας του εδάφους στην προσπάθεια εξασφάλισης καλής κατάστασης των υπογείων υδάτων. “Η εξασφάλιση καλής κατάστασης των υπογείων υδάτων επιβάλλει έγκαιρη δράση και σταθερό μακροπρόθεσμο σχεδιασμό μέτρων προστασίας”. “Η ρύπανση που προκαλείται από την απόρριψη, τις εκπομπές ή τις διαρροές επικίνδυνων ουσιών προτεραιότητας πρέπει να παύσει ή να εξαλειφθεί σταδιακά”.
- Ø Η οδηγία 2004/35/EK σχετικά με την περιβαλλοντική ευθύνη όσον αφορά την πρόληψη και την αποκατάσταση περιβαλλοντικής ζημίας. Στην οδηγία συμπεριλαμβάνεται το έδαφος ως φυσικός πόρος που πρέπει να αποκατασταθεί σε περίπτωση ρύπανσης. “Ζημία του εδάφους, ήτοι οιαδήποτε ρύπανση του εδάφους η οποία δημιουργεί σοβαρό κίνδυνο δυσμενών συνεπειών για την ανθρώπινη υγεία, ως αποτέλεσμα της άμεσης ή έμμεσης εισαγωγής εντός του εδάφους, επί του εδάφους ή στο υπέδαφος, ουσιών, παρασκευασμάτων, οργανισμών ή μικροοργανισμών” ενώ στο παράρτημα II δίνονται κατευθυντήριες οδηγίες για την αποκατάσταση της ρύπανσης του εδάφους χωρίς όμως να θεσπίζονται οριακές τιμές για τους διάφορους ρύπους.
- Ø Η οδηγία 2006/12/EE περί στερεών αποβλήτων η οποία περιγράφει τις επιλογές για τη διαχείριση στερεών αποβλήτων ώστε “τα απόβλητα πρέπει να διατίθενται με τρόπο που να μη θέτει σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία και χωρίς να χρησιμοποιούνται διαδικασίες ή μέθοδοι που μπορούν να βλάψουν το περιβάλλον”.
- Ø Η οδηγία 2010/75/EE περί βιομηχανικών εκπομπών επιπλέον αναφέρεται στην ανάγκη πρόληψης και προστασίας του εδάφους από συγκεκριμένες ανθρωπογενείς δραστηριότητες προτάσσοντας σχετικά μέτρα π.χ. αδειοδότηση και ανάγκη πρόληψης. Επιπλέον περιλαμβάνει το έδαφος ως φυσικό πόρο που χρήζει προστασίας. Προτάσσει μέτρα για την πρόληψη του εδάφους.
- Ø Η οδηγία 2012/18/EE για την πρόληψη μεγάλων ατυχημάτων σχετίζεται επίσης τόσο με την προσπάθεια πρόληψης και προστασίας του εδάφους άλλα και προσφέρει και σημαντικές πληροφορίες υποβάθρου στην περίπτωση που κριθεί απαραίτητη η αποκατάσταση του εδάφους από επικίνδυνες ουσίες. Η παρούσα οδηγία θεσπίζει κανόνες για την πρόληψη μεγάλων ατυχημάτων σχετιζόμενων με επικίνδυνες ουσίες και τον περιορισμό των συνεπειών τους στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον, με στόχο να διασφαλιστεί υψηλό επίπεδο προστασίας σε όλη την Ένωση με συνεπή και αποτελεσματικό τρόπο. επιπλέον οδηγία θέτει υπεύθυνο για την να προβαίνουν στις ενδεδειγμένες ενέργειες, ώστε να εξασφαλίζουν ότι ο φορέας εκμετάλλευσης λαμβάνει τα απαιτούμενα μέτρα αποκατάστασης.

Επιπλέον παρέχεται η δυνατότητα νομικής προστασίας του εδάφους μέσω της οδηγίας 2004/35/EK από τις οδηγίες που αφορούν τη ρύπανση της ατμόσφαιρας καθώς αναφέρεται πως “Η περιβαλλοντική ζημία περιλαμβάνει επίσης τη ζημία που προκαλείται από αεροφερόμενα στοιχεία, εφόσον η ζημία αφορά στα ύδατα, στο έδαφος ή σε προστατευόμενα είδη ή φυσικούς οικοτόπους”

Άμεση συνέπεια αποτελεί η δυνατότητα να διευρυνθεί σημαντικά το πλαίσιο έμμεσης νομικής προστασίας του εδάφους περιλαμβάνοντας οδηγίες σχετικές με την ατμόσφαιρα και τους ρύπους. Χαρακτηριστικές οδηγίες αποτελούν:

- Ø η οδηγία 86/278/ΕΟΚ σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος και ιδίως του εδάφους κατά τη χρησιμοποίηση της ιλύος καθαρισμού λυμάτων στη γεωργία, όπου γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στη σημασία των βαρέων μετάλλων στη ρύπανση του εδάφους
- Ø η οδηγία 91/271/ΕΟΚ για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων
- Ø η οδηγία 96/62/ΕΚ για την εκτίμηση και τη διαχείριση της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος
- Ø η οδηγία 1999/30/ΕΟΚ σχετικά με τις οριακές τιμές διοξειδίου του θείου, διοξειδίου του αζώτου και οξειδίων του αζώτου, σωματιδίων και μολύβδου στον ατμοσφαιρικό αέρα
- Ø η οδηγία 2000/69/ΕΚ για οριακές τιμές βενζολίου και μονοξειδίου του άνθρακα στον αέρα του περιβάλλοντος
- Ø η οδηγία 2000/76/ ΕΚ για την αποτέφρωση των αποβλήτων με σκοπό την μείωση των επιπτώσεων και συνέπεια την προστασία του περιβάλλοντος και του εδάφους
- Ø η οδηγία 2001/42/ΕΚ για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όπου ανάμεσα στους φυσικούς πόρους οι οποίοι είναι δυνατό να αποτελέσουν δέκτες επιπτώσεων είναι και το έδαφος.
- Ø η οδηγία 2001/81/ΕΚ σχετικά με εθνικά ανώτατα όρια για ορισμένους ατμοσφαιρικούς ρύπους

Πίνακας 5.: Όρια βαρέων μετάλλων για Ευρωπαϊκά πρότυπα στο έδαφος (ORBIT/ECN 2016)

Χώρα	Κανονισμός	Τύπος προτύπου	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	As
Βέλγιο	Βασιλικό Διάταγμα 07.01.1998	Νομοθετικό διάταγμα	1.5	70	90	1	20	120	300	-
Βουλγαρία	Κανένας κανονισμός									
Κύπρος	Κανένας κανονισμός									
Εσθονία	Υπουργείο Περιβάλλοντος Re (2002.30.12; m° 87) Κανονισμός λάσπης	Νομοθετημένο	-	1000	1000	16	300	750	2500	-
Ελλάδα	ΚΥΑ 114218, ΦΕΚ,1016/Β/17-11-97[Πλαίσιο προδιαγραφών και γενικά προγράμματα για τη διαχείριση	Νομοθετικό διάταγμα	10	510	500	5	200	500	2000	15

	στερεών αποβλήτων]									
--	-----------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

5.1 Η ΕΘΝΙΚΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΠΕΡΙ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ

Η προστασία του εδάφους σε εθνικό επίπεδο επιτυγχάνεται κυρίως μέσω του νόμου 1650/98, χωρίς όμως αυτό να αποκλείει τη χρήση άλλων νομοθετημάτων. Νόμος 1650/1986 για την Προστασία του Περιβάλλοντος. Στο άρθρο 10 του νόμου αναφέρεται ότι με Κοινή Υπουργική Απόφαση καθορίζονται τα εξής:

- Ø τα μέτρα και οι τρόποι προστασίας των εδαφών από τις φυσικές ζημιές και ιδίως από διάβρωση, έλλειψη αερισμού, αποξήρανση, υπεργήρανση, καταστροφή δομής, αλάτωση, αποκάλυψη δυσμενών οριζόντων, χημική εξάντληση, υπερλίπανση ή ακατάλληλη λίπανση, προσθήκη τοξικών ουσιών από τη χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, για τη διατήρηση και αύξηση της παραγωγικότητάς τους.
- Ø οι χώροι όπου επιτρέπεται η τελική διάθεση τοξικών και επικίνδυνων αποβλήτων και ιλύος. Με απόφαση του οικείου νομάρχη, ύστερα από γνώμη των Ο.Τ.Α., καθορίζονται κατά περίπτωση οι χώροι όπου επιτρέπεται η τελική διάθεση στερεών αποβλήτων.
- Ø περιορισμοί ή απαγορεύσεις στην παραγωγή, εισαγωγή και εμπορία φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων που δημιουργούν κίνδυνο ρύπανσης. Με όμοια απόφαση είναι δυνατό να καθορίζονται μέθοδοι, όροι και περιορισμοί για τη διάθεση στη γεωργία της ιλύος που προέρχεται από επεξεργασία αποβλήτων.
- Ø ΚΥΑ 26857/553/88 ΦΕΚ 196B « Μέτρα και περιορισμοί για την προστασία των υπόγειων νερών από απορρίψεις ορισμένων επικίνδυνων ουσιών
- Ø ΚΥΑ 69728/824/96: Μέτρα και όροι για τη διαχείριση στερεών αποβλήτων
- Ø Σύμφωνα με το άρθρο 8 απαιτείται κατάρτιση πλαισίου τεχνικών προδιαγραφών από την αρμόδια επιτροπή, τη σύσταση της οποίας προβλέπει το άρθρο, για μέτρα που περιλαμβάνουν ανάμεσα σε άλλα και την αποκατάσταση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας και των χώρων διάθεσης απορριμμάτων μετά από την παύση της λειτουργίας τους, όπως και των ανεξέλεγκτων χώρων διάθεσης και αξιοποίησης απορριμμάτων. Το άρθρο 12 καθορίζει ότι οι φορείς διαχείρισης στερεών αποβλήτων που κατά την τελευταία 10ετία λειτουργούν χωρίς άδεια με ανεξέλεγκτο χώρο διάθεσης ή αξιοποίησης αποβλήτων, τους οποίους και έχουν εγκαταλείψει, υποχρεούνται μέσα σε 8 μήνες από την έναρξη ισχύος της ΚΥΑ να υποβάλλουν αίτηση στην αρμόδια Υπηρεσία Περιβάλλοντος της Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης για την χορήγηση άδειας αποκατάστασης των προαναφερθέντων χώρων. Οι φορείς θα πρέπει να συμμορφωθούν πλήρως με τους όρους της άδειας μέσα σε 6 χρόνια από την έκδοσή της.
- Ø ΚΥΑ 113944/97: Εθνικός Σχεδιασμός διαχείρισης στερεών αποβλήτων
- Ø Ο Εθνικός Σχεδιασμός περιλαμβάνει στους στόχους του την αποκατάσταση περιβαλλοντικών βλαβών, η οποία συνίσταται σε παύση λειτουργίας των ανεξέλεγκτων χώρων διάθεσης, σταδιακή αναβάθμιση του βλαβέντος τοπίου και λήψη μέτρων για τον ουσιαστικό περιορισμό ως εξάλειψη της προκαλούμενης ρύπανσης

- Ø ΚΥΑ 19396/1546/97: Μέτρα και όροι για τη Διαχείριση Επικίνδυνων Αποβλήτων
- Ø Και για τα ειδικά απόβλητα προβλέφθηκε η σύσταση επιτροπής καθορισμού τεχνικών προδιαγραφών για μέτρα διαχείρισης επικίνδυνων αποβλήτων, στα οποία περιλαμβάνονται και η αποκατάσταση και εξυγίανση ρυπασμένων χώρων από επικίνδυνα απόβλητα. Το άρθρο 12 καθορίζει επίσης ότι η κάλυψη των απαιτούμενων δαπανών θα πραγματοποιείται:
- Ø Α. Από το φυσικό ή νομικό πρόσωπο που διαχειρίστηκε ή διαχειρίζεται τα επικίνδυνα απόβλητα και έχει προκαλέσει τη ρύπανση.
- Ø Β. Από τον κρατικό προϋπολογισμό για τις περιπτώσεις εγκαταλελειμμένων χώρων διάθεσης ή επεξεργασίας επικίνδυνων αποβλήτων και εφ' όσον δεν είναι δυνατόν να διαπιστωθεί η ταυτότητα του παραγωγού ή του κατόχου των επικίνδυνων αποβλήτων.
- Ø Π.Δ/τος 148/2009 εξηγεί ποιος είναι υπεύθυνος για την απορρύπανση
- Ø Κ.Υ.Α. 13588/725 «Μέτρα όροι και περιορισμοί για τη διαχείριση επικινδύνων αποβλήτων»

5.2 Η ΕΘΝΙΚΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ – ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΥΠΑΣΜΕΝΩΝ ΧΩΡΩΝ

Για τις εργασίες εξυγίανσης – αποκατάστασης ρυπασμένων χώρων από επικίνδυνα απόβλητα απαιτείται έγκριση περιβαλλοντικών όρων σύμφωνα με την κοινή υπουργική απόφαση Κ.Υ.Α. 13588/725 «Μέτρα όροι και περιορισμοί για τη διαχείριση επικινδύνων αποβλήτων» (Β' 383). Τα μέτρα, οι όροι και οι περιορισμοί για την εξυγίανση ή/και αποκατάσταση του χώρου, την οριστική παύση λειτουργίας των εγκαταστάσεων ή των χώρων διαχείρισης επικινδύνων αποβλήτων, καθώς και για τις εργασίες της μετέπειτα φροντίδας επιβάλλονται με τις αποφάσεις έγκρισης περιβαλλοντικών όρων για τις αντίστοιχες εγκαταστάσεις, ώστε να προστατεύεται το φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον. Ο φορέας διαχείρισης των επικινδύνων αποβλήτων μετά την παύση λειτουργίας της εγκατάστασης ή/και του χώρου διάθεσης ή αξιοποίησης υποχρεούται πριν την οριστική παύση της λειτουργίας της (του) να εξυγιάνει και να αποκαταστήσει το χώρο, σύμφωνα με τους ειδικότερους όρους και περιορισμούς που προβλέπονται στην απόφαση έγκρισης περιβαλλοντικών όρων.

Η αναγνώριση και αποτίμηση (αξιολόγηση) της ρύπανσης σε χώρους ή εγκαταστάσεις, ή τον ευρύτερο χώρο, όπου έχουν διενεργηθεί εργασίες διαχείρισης ή απόρριψης επικινδύνων αποβλήτων, και η διακρίβωση του φορέα διαχείρισης ή του κατόχου των επικινδύνων αποβλήτων πραγματοποιούνται από την αρμόδια Υπηρεσία Περιβάλλοντος της οικείας Περιφέρειας. Με απόφαση του Γενικού Γραμματέα Περιφέρειας καθορίζονται οι εργασίες και τα έργα επιτόπιας εξυγίανσης ή/και αποκατάστασης του περιβάλλοντος στους ως άνω χώρους ή εγκαταστάσεις, με στόχο την άρση ή την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της ρύπανσης.

Ως φορέας εκτέλεσης των εργασιών εξυγίανσης – αποκατάστασης του χώρου καθορίζεται:

- ο φορέας διαχείρισης ή ο κάτοχος των επικινδύνων αποβλήτων, ο οποίος καταβάλλει και τις δαπάνες για την εκτέλεση των ως άνω έργων και εργασιών.

- η Περιφέρεια, για τις περιπτώσεις εγκαταλελειμμένων χώρων ή εγκαταστάσεων διαχείρισης επικινδύνων αποβλήτων και μέχρις ότου διαπιστωθεί η ταυτότητα του παραγωγού ή κατόχου των επικινδύνων αποβλήτων, καθώς και για την περίπτωση που δεν διαπιστωθεί, η ταυτότητα του φορέα διαχείρισης ή του κατόχου των επικινδύνων αποβλήτων. Στην περίπτωση διαπίστωσης της ταυτότητας του παραγωγού ή του κατόχου των επικινδύνων αποβλήτων, η δαπάνη καταλογίζεται σ' αυτόν.

Σε περίπτωση ρύπανσης ενός χώρου με επικίνδυνα απόβλητα συνεπεία ατυχήματος, λαμβάνονται όλα τα αναγκαία μέτρα για την αντιμετώπιση του ατυχήματος και την προστασία του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος με απόφαση ή εντολή του Γενικού Γραμματέα της οικείας Περιφέρειας, ο οποίος και ενημερώνει σχετικά τη Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας του ΥΠΕΣΔΔΑ (Υπουργείο Εσωτερικών Δημόσιας Διοίκησης και Αποκέντρωσης). Οι αστυνομικές αρχές και κάθε άλλη δημόσια αρχή ή αρχή Τοπικής Αυτοδιοίκησης υποχρεούνται να παράσχουν κάθε αναγκαία συνδρομή για την εφαρμογή των αποφάσεων και των εντολών.

Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών εξυγίανσης – αποκατάστασης ακολουθεί η διαδικασία της οριστικής παύσης της λειτουργίας της εγκατάστασης ή/και του χώρου διάθεσης ή αξιοποίησης. Προς τούτο ο φορέας διαχείρισης υποβάλλει σχετική αίτηση στην αρμόδια υπηρεσία Περιβάλλοντος της οικείας Περιφέρειας, η οποία συνοδεύεται από στοιχεία και εκθέσεις που τεκμηριώνουν ότι πληρούνται οι προϋποθέσεις τερματισμού της εξυγίανσης και αποκατάστασης, σύμφωνα με τους εγκεκριμένους περιβαλλοντικούς όρους. Με απόφαση του Γενικού Γραμματέα της οικείας Περιφέρειας μετά από εισήγηση της ως άνω Υπηρεσίας εγκρίνεται ο τερματισμός των εργασιών εξυγίανσης ή/και αποκατάστασης και η οριστική παύση λειτουργίας της εγκατάστασης ή του χώρου αξιοποίησης ή και διάθεσης των επικινδύνων αποβλήτων, καθώς και η έναρξη των εργασιών της μετέπειτα φροντίδας. Η απόφαση αυτή σε καμιά περίπτωση δεν περιορίζει την ευθύνη του φορέα διαχείρισης ως προς την τήρηση των όρων της άδειας διαχείρισης και της απόφασης έγκρισης περιβαλλοντικών όρων.

Μετά την έκδοση της απόφασης, ο φορέας διαχείρισης είναι υπεύθυνος για την μετέπειτα φροντίδα του εν λόγω χώρου. Η χρονική διάρκεια της μετέπειτα φροντίδας καθορίζεται στην απόφαση έγκρισης περιβαλλοντικών όρων, λαμβάνοντας υπόψη:

- το είδος και την επικινδυνότητα της εγκατάστασης ή του χώρου
- το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η εν λόγω εγκατάσταση ή ο χώρος μπορεί να παρουσιάζει κινδύνους για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία.

Η χρονική διάρκεια της μετέπειτα φροντίδας δεν μπορεί να είναι μικρότερη α) των τριάντα (30) ετών για χώρους ή εγκαταστάσεις διάθεσης, β) των δέκα (10) ετών για εγκαταστάσεις αξιοποίησης επικινδύνων αποβλήτων και γ) των πέντε (5) ετών για εγκαταστάσεις αποθήκευσης.

Σε περίπτωση κατά την οποία κατά την διάρκεια της μετέπειτα φροντίδας διαπιστωθούν δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον και τη δημόσια υγεία, ο φορέας διαχείρισης το γνωστοποιεί αμέσως α) στην αρμόδια αρχή για την έκδοση της απόφασης έγκρισης περιβαλλοντικών όρων, β) στις αρμόδιες υπηρεσίες της οικείας Περιφέρειας και γ) στις αρμόδιες υπηρεσίες Περιβάλλοντος και Υγιεινής της οικείας Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης. Με απόφαση του οργάνου που εξέδωσε την απόφαση

έγκρισης περιβαλλοντικών όρων, καθορίζονται τα απαιτούμενα συμπληρωματικά επανορθωτικά μέτρα και το χρονοδιάγραμμα εφαρμογής τους (Γιδαράκος, 2008).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της μελέτης και της βιβλιογραφικής ανασκόπησης για την εξυγίανση του εδάφους από βαρέα μέταλλα οδήγησε σε κάποια γενικά συμπεράσματα και παρατηρήσεις.

Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί ότι οι υπάρχουσες μέθοδοι για την αποκατάσταση του εδάφους απαιτούν σχετικά μεγάλους χρόνους αποκατάστασης, υψηλό οικονομικό κόστος και περιορισμούς που αφορούν το έδαφος, τους ρύπους προς αντιμετώπιση και τη δυνατότητα εφαρμογής.

Όσον αφορά την νομικό πλαίσιο η απουσία ευρωπαϊκής νομοθεσίας για την προστασία και αποκατάσταση του εδάφους έχει ως συνέπεια τον περιορισμό της εξέλιξης των μεθόδων αλλά και τη δημιουργία ασαφούς οικονομικού τοπίου σχετιζόμενο με το κόστος αποκατάστασης. Ο κατακερματισμός της προστασίας του εδάφους μέσω προστασίας άλλων φυσικών πόρων δυσχεραίνει σημαντικά τις προσπάθειες προστασίας του. Ακόμη και η θέσπιση οριακών τιμών για τους υπόλοιπους φυσικούς πόρους δεν κάνει δυνατή την προστασία του εδάφους, καθώς θα πρέπει να γίνει αντιληπτό πως το έδαφος αποτελεί αποδέκτη πολλαπλών και διαφορετικής φύσης πιέσεων με το αποτέλεσμα που προκύπτει να είναι συσσωρευτικό.

Η μεγάλη χρονική διάρκεια αποκατάστασης του συντελεί στην διόγκωση του ζητήματος. Επιπλέον η δυνατότητα αντιμετώπισης του προβλήματος της ρύπανσης του εδάφους σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κάθε κράτους δημιουργεί συνθήκες οικονομικών ανισοτήτων μεταξύ των διάφορων κρατών μελών της ευρωπαϊκής ένωσης. Η ύπαρξη διαφορετικών νομικών προσεγγίσεων (ανάλυση κινδύνου (risk assessment), οριακές τιμές). Η ένταξη της προστασίας του εδάφους σε γενικότερο πλαίσιο προστασίας του περιβάλλοντος, στη νομοθεσία απορριμμάτων και οι διαφορετικές αρμόδιες αρχές δυσχεραίνουν την ανάπτυξη των μεθόδων αποκατάστασης.

Από την μελέτη των μεθόδων αποκατάστασης των ρυπασμένων εδαφών από βαρέα μέταλλα διαπιστώθηκε ότι η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου απορρύπανσης εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, με πιο σημαντικές να είναι η έκταση της υφιστάμενης ρύπανσης, τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτης περιοχής, οι οικονομοτεχνικές συνθήκες, οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εφαρμογή της μεθόδου και άλλες.

Επίσης οφείλεται να σημειωθεί ότι η αποκατάσταση και η εξυγίανση ενός ρυπασμένου εδάφους αποτελεί ένα καίριο ζήτημα της εποχής μας λόγω της αναπτυσσόμενης βιομηχανικής δραστηριότητας με αποτέλεσμα πολλοί ερευνητές να ασχολούνται με την ανάπτυξη νέων μεθόδων και τεχνολογιών για την απορρύπανση του εδάφους. Συνεπώς είναι απαραίτητη η συνεχής ενημέρωση σχετικά με τις νέες αναπτυσσόμενες μεθόδους στον τομέα αυτό, ώστε να γίνει η κατάλληλη επιλογή απορρύπανσης της περιοχής. Αν και συμπερασματικά η πρόληψη παραμένει η φθηνότερη και καλύτερη μέθοδος για την αποκατάσταση της ρύπανσης εδάφους.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ü Asrari E., (2014), “Heavy metal contamination of water and soil: Analysis, Assasment, and Remediation Straegies”, Apple Academic Press, CRC Press, Canada.
- ü Abioye O. P., (2011), “Biological Remediation of Hydrocarbon and Heavy Metals Contaminated Soil”, Soil Contamination, InTech, Croatia. ISBN: 978-953-307-647-8.
- ü Black H., (1995), “Absorbing Possibilities: Phytoremediation”, *Environmental Health Perspectives*, **103** (12): 1106-1108.
- ü Chibuike G.U., Obiora S.C., (2014), “Heavy Metal Polluted Soils: Effect on Plants and Bioremediation Methods”, Applied and Environmental Soil Science, ID 752708: 1-12.
- ü Dixit R., Wasiullah, Malaviya D., Pandiyan K., Singh U.B., Sahu A., Shukla R., Singh B.P., Rai J.P., Sharma P.K., Lade H., Paul D., (2015), “Bioremediation of Heavy Metals from Soil and Aquatic Environment: An Overview of Principles and Criteria of Fundamental Processes”, *Sustainability*, 7: 2189-2212.
- ü E.C. (European Commission), (2007), “Environment fact sheet: soil protection — a new policy for the EU”, European Commission, Brussels, Belgium.
- ü EEA (European Environment Agency), (1999), “Management of contaminated sites in Western Europe”, European Environment Agency, Denmark.
- ü EEA (European Environment Agency), (2014), “Progress in management of contaminated sites (CSI 015/LSI 003)”, European Environment Agency, Denmark.
- ü EPA (Environmental Protection Agency), (1986), “Handbook For Stabilization/ Solidification Of Hazardous Waste”, United States Environmental Protection Agency, USA.
- ü EPA (Environmental Protection Agency), (1992), “Ground Water Issue - Behavior of Metals in Soils”, United States Environmental Protection Agency, USA.
- ü EPA (Environmental Protection Agency), (1992), “Guide to site and soil description for hazardous waste site characterization volume 1: Metals”, United States Environmental Protection Agency, USA.
- ü EPA (Environmental Protection Agency), (2004), “How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites - A Guide for

- Corrective Action Plan Reviewers”, United States Environmental Protection Agency, USA.
- ü EPA (Environmental Protection Agency), (2006), “Engineering Forum Issue Paper: In Situ Treatment Technologies for Contaminated Soil”, United States Environmental Protection Agency, USA.
 - ü EPA (Environmental Protection Agency), (2011), “Evaluation of Urban Soils: Suitability for Green Infrastructure or Urban Agriculture”, United States Environmental Protection Agency, USA.
 - ü Krystofova O., Shestivska V., Galiova M., Novotny K., Kaiser J., Zehnalek J., Babula P., Opatrilova R., Adam V., and Kizek R., (2009), “Sunflower Plants as Bioindicators of Environmental Pollution with Lead (II) Ions”, *Sensors*, **9**: 5040-5058; doi:10.3390/s90705040.
 - ü Meuser H., (2010), “Soil Remediation and Rehabilitation – Treatment of Contaminated and Disturbed Land”, *Environmental Pollution* 23, Springer, Dordrecht Heidelberg New York London.
 - ü Hu Y., Liu X., Bai J., Shih K., Zeng Y.E., Cheng H., (2013), “Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization”, *Environmental Science Pollution Research*, 20:6150–6159.
 - ü NAS (National Academy of Sciences), NAE (National Academy of Engineering), and Institute of Medicine, (1997) “Innovations in Ground Water and Soil Cleanup: From Concept to Commercialization”, National Academy Press, Washington DC, USA.
 - ü NAS (National Academy of Sciences), NAE (National Academy of Engineering), and Institute of Medicine, (1999), “Groundwater and Soil Cleanup: Improving Management of Persistent Contaminants”, National Academy Press, Washington DC, USA.
 - ü ORBIT/ECN, (2016), “Circular Economy and Organic Waste Management”, Organic Resources and Biological Waste Treatment, Heraklion, Crete on 25th to 28th May 2016.
 - ü SEPA (Scottish Environmental Protection Agency), (2010), “Land remediation and waste management guidelines”, SEPA, Scotland.
 - ü Sims R. C., (1990), “Soil Remediation Techniques at Uncontrolled Hazardous Waste Sites”, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 40 (5): 704-732. doi:10.1080/10473289.1990.10466716.
 - ü Singh J., Kalamdhad A.S., (2011), “Effects of Heavy Metals on Soil, Plants, Human Health and Aquatic Life”, *International Journal of Research in Chemistry and Environment*, 1:15-21.

- Û Tchounwou P.B., Yedjou C.G., Patiolla A.K., Sutton D.J., (2014), “Heavy Metals Toxicity and the Environment”, NIH Public Access, 101: 133–164. doi:10.1007/978-3-7643-8340-4_6.
- Û USDA (United States Department of Agriculture), and NRCS (Natural Resources Conservation Service), (2000), “Heavy Metal Soil Contamination”, *Soil Quality - Urban Technical Note*, **3**: 1-7.
- Û Wuana R., and Okieimen F.E., (2011), “Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation”, International Scholarly Research Network, ISRN Ecology, 2011: 402647:1-20.
- Û Βαλαβανίδης Β.Α., (2007), «ΟΙΚΟΤΟΞΙΚΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΤΟΞΙΚΟΛΟΓΙΑ - Ερευνητική μεθοδολογία για την εκτίμηση οικολογικού κινδύνου από επικίνδυνες χημικές ουσίες», Εκδόσεις Τμήματος Χημείας Πανεπιστημίου Αθηνών, Αθήνα, Ελλάδα.
- Û Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., Γιαννής Α., Δημήτριος Κ., (2008), “ Μελέτη για τη διερεύνηση, αξιολόγηση και αποκατάσταση ανεξέλεγκτων ρυπασμένων χώρων / εγκαταστάσεων από βιομηχανικά και επικινδυνά απόβλητα στην Ελλάδα”, Παραδοτέα έκθεση Επιχειρηματικού Προγράμματος «Περιβάλλον», Πολυτεχνείο Κρήτης Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά, Ελλάδα.
- Û Ε.Ε. (Ευρωπαϊκή Επιτροπή), (2012), “ΕΓΓΡΑΦΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ- Κατευθυντήριες γραμμές για τις βέλτιστες πρακτικές περιορισμού, μετριάσμου ή αντιστάθμισης της σφράγισης του εδάφους”, Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Βρυξέλλες.
- Û Ε.Ε.Κ (Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων), (2006), Ανακοίνωση της Επιτροπής προς το Συμβούλιο, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, την Ευρωπαϊκή Οικονομική και Κοινωνική Επιτροπή και την Επιτροπή Περιφερειών - Θεματική στρατηγική για την προστασία του εδάφους, Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, Βρυξέλλες, Βέλγιο.
- Û Ίσαρη Ε.Χ., (2015), «Ανάπτυξη και αξιολόγηση συνθέτων υλικών ενεργού άνθρακα και οξειδίων σιδηρού για την ρόφηση υδράργυρου και φαινανθρενίου», Μεταπτυχιακή Διπλώματος Ειδίκευσης Τμήματος Χημείας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ελλάδα.
- Û ΣΥΓΑΠΕΖ (Συντονιστικό Γραφείο Αντιμετώπισης Περιβαλλοντικών Ζημιών), (2003), «Έκθεση για την εφαρμογή της Οδηγίας 2004/35/ΕΚ στην Ελλάδα», ΥΠΕΚΑ (Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής), Αθήνα, Ελλάδα.
- Û Τζόβολου Δ. Ν., (2011), «Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων απορρύπανσης της ακόρεστης ζώνης εδάφους μολυσμένου με κηροζίνη», Διδακτορική Διατριβή, Τμήματος Χημείας, Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα.

- Û Φάμελλος Σ., (2012), “Αειφορική διαχείριση εδάφους την Υδρολογική λεκάνη του Ανθεμούντα με βάση την Ευρωπαϊκή Θεματική στρατηγική για το έδαφος” LIFE07ENV/GR/000278 – Soil Sustainability (So.S.), Θεσσαλονίκη, Ελλάδα.

Διαδίκτυο

- Û <http://water.epa.gov/scitech/methods/cwa/pollutants.cfm>;
- Û <http://www.eea.europa.eu/el/articles/edafos>
- Û <http://www.epa.gov/superfund/accomp/news/phyto.htm>;
- Û <http://www.epa.gov/oust/pubs/tums.htm>
- Û <http://www.intergeo.hgr/page.asp?pid=51&gr=1>
- Û <http://www.intergeo.hgr/page.asp?pid=51&gr=1>
- Û <http://www.intergeo.hgr/page.asp?pid=51&gr=1>
- Û <http://www.intergeo.hgr/page.asp?pid=51&gr=1>
- Û <http://www.intergeo.hgr/page.asp?pid=51&gr=1>
- Û <http://www.itrcweb.org/GuidanceDocuments/PRB-4ExSum.pdf>
- Û https://institute.unido.org/wp-content/uploads/2014/11/17.Survey_of_Soil_Remediation_Technology.pdf
- Û <https://www.agric.wa.gov.au/soil-acidity/causes-soil-acidity?page=0%2C1>