

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:**

**“ Ανάλυση Τεχνολογιών βιο-αποκατάστασης  
περιβαλλοντικών συστημάτων. ”**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ (Α.Μ. 5270)**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ ΓΙΑΝΝΑΚΗΣ**

**ΠΑΤΡΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2019**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την πτυχιακή εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και έχει ως αντικείμενο την ανάλυση της βιοαποκατάστασης σαν μέσο καθαρισμού ρυπογόνων περιοχών.

Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η παρουσίαση των σημαντικότερων στοιχείων της μεθόδου και των πλεονεκτημάτων αλλά και των θεμάτων που αφορούν τη χρήση της σαν μια εναλλακτική μέθοδο καθαρισμού ρυπασμένων περιοχών. Θα αναλυθεί η μέθοδος της φυτοαποκατάστασης σαν η προτεινόμενη μέθοδος για την ελληνική πραγματικότητα.

Θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μας στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γιαννάκη Ιωάννη για την ανάθεση του θέματος καθώς και για τη συνεχή καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου προσέφερε.

Νικόλαος Λαμπρόπουλος

Σεπτέμβριος 2019

**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, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου, 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 έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής

Νικόλαος Λαμπρόπουλος

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εισαγωγή παρουσιάζεται το πρόβλημα της ρύπανσης και η αναγκαιότητα της βιο-αποκατάστασης των περιβαλλοντικών συστημάτων σαν η προσφορότερη λύση για την αντιμετώπιση της ρύπανσης.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η έννοια της ρύπανσης του περιβάλλοντος, οι συνήθεις πηγές και οι κατηγορίες των ρύπων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των μεθόδων για την αποκατάσταση των ρυπασμένων εδαφών.

Το τρίτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην προτεινόμενη μέθοδο για βιοαποκατάσταση στην Ελλάδα την φυτοεξυγίανση και τις διαφορετικές της μορφές.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιέχονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία.

**Λέξεις κλειδιά: βιοαποκατάσταση, bioremediation, phytoremediation**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b>	1
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	2
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b>	3
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	4
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: Ρύπανση του Περιβάλλοντος</b>	6
<b>1.1 Η Έννοια της Ρύπανσης</b>	6
<b>1.2 Πηγές Ρύπανσης Εδαφών και Υδάτων</b>	6
<b>1.3 Σημαντικότερες Κατηγορίες Ρύπων</b>	7
<b>1.3.1 Οργανικοί Ρύποι (Organic Pollutants)</b>	7
<b>1.3.2 Ανόργανοι Ρύποι (Inorganic Pollutants)</b>	10
<b>1.3.3 Βαρέα Μέταλλα (Heavy Metals)</b>	11
<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Αποκατάσταση Ρυπασμένων Εδαφών</b>	18
<b>2.1 Διάκριση Τεχνολογιών Αποκατάστασης</b>	18
<b>2.2 Βιολογικές Τεχνολογίες</b>	22
<b>2.2.1 Φυσική Εξασθένιση (Natural Attenuation, in situ)</b>	22
<b>2.2.2 Βιοαερισμός και Βιοδιασπορά (Bioventing and Biosparging, in situ)</b>	23
<b>2.2.3 Βιοαναρρόφηση (Bioslurping, in situ)</b>	24
<b>2.2.4 Βιοδιέγερση και Βιοενίσχυση (Biostimulation and Bioaugmentation, in situ)</b>	25
<b>2.2.5 Βιοαντιδραστήρες (Bioreactors, ex situ)</b>	26
<b>2.2.6 Αγροκαλλιέργεια (Landfarming, in situ or ex situ)</b>	27
<b>2.2.7 Επεξεργασία σε Σωρούς (Biopiles, ex situ)</b>	28
<b>2.2.8 Κομποστοποίηση (Composting, ex situ)</b>	29
<b>2.3 Αρχή της μεθόδου βιο-αποκατάστασης. Βασικός μικροβιακός μεταβολισμός</b>	30
<b>2.4 Εφαρμογή της μεθόδου-Κρίσιμοι παράγοντες λειτουργίας</b>	31
<b>2.5 Επιτόπιες μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας οργανικών ρύπων</b>	32
<b>2.6 Βιολογική επεξεργασία μετά από εκσκαφή</b>	38
<b>2.7 Παρακολούθηση της εφαρμογής και αποτελεσματικότητας της μεθόδου</b>	40
<b>2.8 Εφαρμογή της μεθόδου σε ρυπασμένα εδάφη στην Ελλάδα</b>	42
<b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Φυτοεξυγίανση</b>	45
<b>3.1 Πρόσληψη βαρέων μετάλλων από φυτά</b>	45
<b>3.2 Τεχνολογίες Φυτοεξυγίανσης</b>	53
<b>3.3 Αξιολόγηση Τεχνολογιών Φυτοεξυγίανσης</b>	58
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	62
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	64

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ενεργειακό πρόβλημα αποτελεί το μείζον θέμα της ανθρωπότητας σήμερα. Τα αποθέματα του πετρελαίου λιγοστεύουν επικίνδυνα και η χρήση της πυρηνικής ενέργειας εγκυμονεί πολλούς κινδύνους. Οι ηπιότερες μορφές ενέργειας υπόσχονται γενικά καλύτερα αποτελέσματα, αλλά ακόμη δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικές και θα αργήσουν πολύ μέχρι να είναι σε θέση να αντικαταστήσουν το πετρέλαιο και τα παραπροϊόντα του. Παράλληλα, η παρατεταμένη και ολοένα αυξανόμενη χρήση του πετρελαίου εκτός από την επικείμενη ενεργειακή κρίση προκαλεί και σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα. Το πετρέλαιο όπως είναι γνωστό, εκτός από τη χρήση του ως καυσίμου χρησιμοποιείται για την παραγωγή μιας τεράστιας γκάμας προϊόντων, όπως πλαστικά, φάρμακα, φυτοφάρμακα, ασφαλτος, ζιζανιοκτόνα, απορρυπαντικά, χρώματα, υφάσματα κλπ. Έτσι, το σύνολο των δραστηριοτήτων μας βασίζεται στην εξόρυξη, επεξεργασία, αποθήκευση και χρήση του πετρελαίου και των παραγόμενων από αυτό προϊόντων. Η εκτεταμένη όμως και συχνά αλόγιστη χρήση αυτών των προϊόντων οδηγεί σε διαρροή ή ανεξέλεγκτη διάθεση επικίνδυνων για το περιβάλλον χημικών ενώσεων. Τα παραπροϊόντα της καύσης του πετρελαίου έχουν κατακλύσει την ατμόσφαιρα και καταστροφικά φαινόμενα όπως η τρύπα του όζοντος και το φαινόμενο του θερμοκηπίου έχουν μεταβάλει σημαντικά τις κλιματολογικές συνθήκες του πλανήτη μας. Η κατάσταση είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη και αν δεν ληφθούν άμεσα μέτρα κινδυνεύουμε να βιώσουμε σενάρια ταινιών επιστημονικής φαντασίας.

Εκτός όμως από την ατμόσφαιρα σοβαρά προβλήματα ρύπανσης αντιμετωπίζουν τόσο το έδαφος όσο και τα υπόγεια ύδατα. Οι δεξαμενές αποθήκευσης πετρελαίου, βενζίνης, άλλων υγρών καυσίμων αλλά και οργανικών ενώσεων, τείνουν να εξελιχθούν σε πραγματικό εφιάλη. Οι δεξαμενές αποθήκευσης των παραπάνω προϊόντων είναι συνήθως μεταλλικές. Με το πέρασμα του χρόνου οι δεξαμενές αυτές οξειδώνονται και παρουσιάζονται διαρροές. Τα υλικά που διαφεύγουν στο έδαφος ακολουθούν διαδρόμους ροής και τελικά καταλήγουν στον υδροφόρο ορίζοντα. Τα προϊόντα του πετρελαίου περιέχουν συνήθως πολυαρωματικές ενώσεις οι οποίες είναι ιδιαίτερα τοξικές και δύσκολα αποδομήσιμες. Κατά συνέπεια, πολύ μικρές ποσότητες αυτών των ουσιών είναι ικανές να προκαλέσουν ρύπανση σε τεράστιες ποσότητες νερού, κατεξοχήν πόσιμου. Το πρόβλημα που έχει δημιουργηθεί είναι τεράστιο αν αναλογιστεί κανείς τον πολύ μεγάλο αριθμό δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμων που βρίσκονται διασκορπισμένες παντού πάνω στον πλανήτη και ιδιαίτερα στις ανεπτυγμένες χώρες. Εκτός όμως από τις δεξαμενές, πλήθος ατυχημάτων αλλά και ιδιαίτερο η ανεξέλεγκτη διάθεση εντείνουν τη σοβαρότητα του προβλήματος. Οι σημαντικότεροι λόγοι που δεν είναι γνωστό το μέγεθος του προβλήματος, είναι αφενός ότι οι απαραίτητες μετρήσεις πραγματοποιούνται μόνο όταν υπάρχει κάποιο σημαντικό περιστατικό που να υποδηλώνει τη σοβαρότητα του προβλήματος και αφετέρου η δυνατότητα εναλλακτικών λύσεων. Η συνεχώς αυξανόμενη όμως, ζήτηση καθαρού νερού και η συνεχιζόμενη ρύπανση των μικρών διαθέσιμων αποθεμάτων, τείνουν να φέρουν στην επιφάνεια το μέγεθος του προβλήματος.

Στον Ελλαδικό χώρο, το πρόβλημα παραμένει ακόμη σε σημαντικό επίπεδο λόγω ελλειπούς ελέγχου των κρατικών μηχανισμών και της αδιαφορίας πολιτών και αρχών σε πολλές περιπτώσεις. Αυτό σε καμιά περίπτωση δε σημαίνει ότι το πρόβλημα δεν υφίσταται. Η έλλειψη έντονης βιομηχανικής δραστηριότητας στη χώρα συντελεί στον περιορισμό της ρύπανσης του εδάφους και του υδροφόρου ορίζοντα. Παρ' όλα αυτά, το πρόβλημα υπάρχει και λόγω της υψηλής τοξικότητας και άρα επικινδυνότητας των χημικών ενώσεων, κυρίως παραγώγων του πετρελαίου, πρέπει να ληφθούν μέτρα αφενός πρόληψης και αφετέρου αντιμετώπισης της ρύπανσης στο έδαφος και τον υδροφόρο ορίζοντα. Αυτή τη στιγμή όλες οι μέθοδοι αποκατάστασης ρυπασμένων εδαφών και υπογείων υδάτων που υπάρχουν

εφαρμόζονται κυρίως σε ερευνητικό ή πιλοτικό επίπεδο. Οι μέθοδοι αυτές είναι κυρίως ex situ μέθοδοι, δηλ. απαιτούν επεξεργασία του νερού ή του εδάφους μακριά από το φυσικό τους χώρο. Υπάρχουν όμως και in situ μέθοδοι που βασίζονται στην παροχή αέρα, ατμού ή και οξειδωτικών ενώσεων προκειμένου να επιτευχθεί η φυσικοχημική οξείδωση των ρύπων. Καμία όμως από αυτές τις μεθόδους δεν μπορεί να επιτύχει πλήρη απορρύπανση της περιοχής. Η βιοαποκατάσταση των ρυπασμένων περιοχών βασίζεται στην ενίσχυση και προώθηση φυσικών βιολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο έδαφος και τον υδροφόρο ορίζοντα. Στην βιοαποκατάσταση παρέχονται στο έδαφος ή τον υδροφόρο ορίζοντα θρεπτικά συστατικά απαραίτητα για την ανάπτυξη των βακτηρίων, οξυγόνο ή αέρας και μερικές φορές ακόμη εξειδικευμένα βακτήρια για την βιοαποδόμηση συγκεκριμένων ρύπων. Η βιολογική αποκατάσταση, όπως και κάθε βιολογική μέθοδος επεξεργασίας αποβλήτων και απορριμμάτων, είναι φιλική προς το περιβάλλον και οικονομικότερη σε σχέση με τις φυσικοχημικές μεθόδους αποκατάστασης.

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> : Ρύπανση του Περιβάλλοντος

## 1.1 Η Έννοια της Ρύπανσης

Η ρύπανση του περιβάλλοντος είναι από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα που καλείται να αντιμετωπίσει ολόκληρη η ανθρωπότητα σήμερα αλλά και μελλοντικά καθώς προσελκύει την προσοχή των περισσότερων ανθρώπων για τις πολύ σοβαρές μακροπρόθεσμες συνέπειες (βλάβες) που προκαλεί στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία. Η υποβάθμιση του περιβάλλοντος είναι ένα αρνητικό αποτέλεσμα της ρύπανσης, που τεκμηριώνεται από την εξαφάνιση ή και τη μετανάστευση διάφορων ειδών της χλωρίδας και της πανίδας, τη μείωση της παγκόσμιας βιοποικιλότητας και την εισαγωγή τοξικών χημικών ουσιών στον αέρα, στο έδαφος, στα ύδατα και στη τροφική αλυσίδα. Το συνεχή αυξανόμενο αριθμό περιβαλλοντικών καταστροφών και των αλλαγών του κλίματος τόσο σε περιφερειακό όσο και σε τοπικό επίπεδο (Jan, Rashid, Azooz, & Hossain, 2016; Prabhat K. Rai & Rai, 2016).

Η αιτία της ρύπανσης του περιβάλλοντος σήμερα όπως γίνεται αποδεκτό από ολόκληρη την επιστημονική κοινότητα είναι αποτέλεσμα κυρίως των ανθρώπινων παρεμβάσεων στη φύση, της βιομηχανικής και της τεχνολογικής επανάστασης, της ανεξέλεγκτης εκμετάλλευσης των φυσικών πόρων της γης, της συνεχούς αυξανόμενης ταχύτητας ανταλλαγής ύλης και ενέργειας και της αύξησης των αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων. Σύμφωνα με τους Muralikrisima & Manickam (2017) ως ρύπανση του περιβάλλοντος ορίζεται, η μόλυνση των φυσικών και βιολογικών συστατικών του συστήματος της γης και της ατμόσφαιρας σε τέτοιο βαθμό που επηρεάζονται αρνητικά οι φυσιολογικές διεργασίες του περιβάλλοντος. Ανάλογα τη φύση και την προέλευση των ρύπων, η ρύπανση μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως εξής (βλ. εικόνα 1-1).

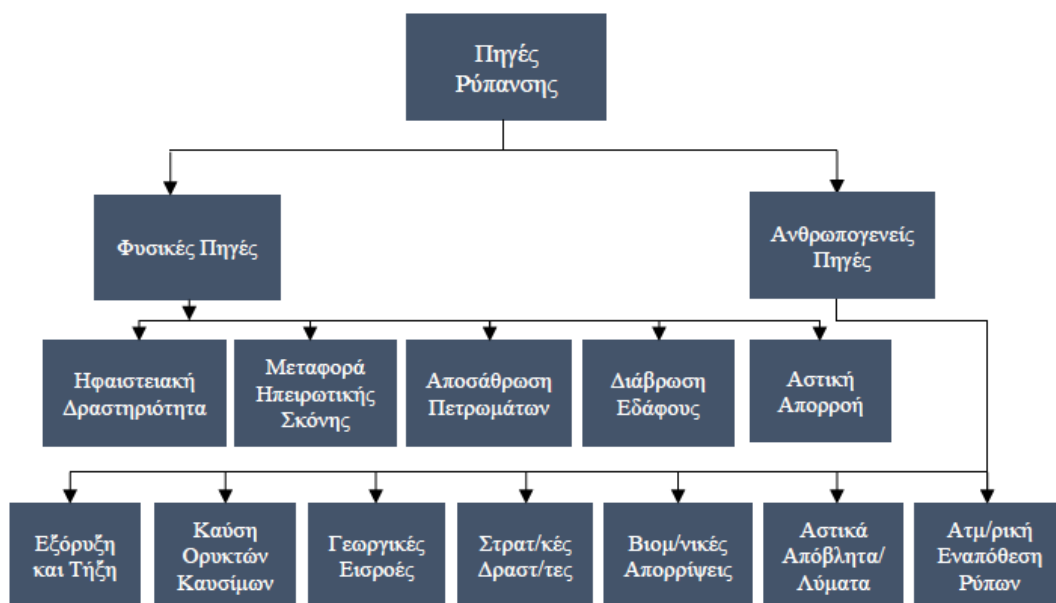


Εικόνα 1-1: Τύποι ρύπανσης περιβάλλοντος. Πηγή: (Muralikrishna & Manickam, 2017)

## 1.2 Πηγές Ρύπανσης Εδαφών και Υδάτων

Η ρύπανση του περιβάλλοντος (αέρας, έδαφος, ύδατα) προέρχεται τόσο από φυσικές πηγές όπως για παράδειγμα από τη δραστηριότητα των ηφαιστειών, τις δασικές πυρκαγιές, τη φυσική αποσάθρωση και διάβρωση των πετρωμάτων του φλοιού της γης, τη διάβρωση του εδάφους από το νερό ή του αέρα, από τις γεωτεκτονικές διαταράξεις (σεισμούς) είτε από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (F. N. Crawford, 2008). Τεράστιες ποσότητες οργανικών και ανόργανων χημικών

τοξικών ουσιών εισάγονται στο περιβάλλον μέσω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, οι οποίες σχετίζονται συνήθως με δραστηριότητες που έχουν να κάνουν με την παραγωγή ενέργειας, την εξόρυξη και την καύση των ορυκτών καυσίμων. Πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες προερχόμενοι από την εξόρυξή τους ή από ατυχήματα ή τυχαίες διαρροές των πετρελαϊκών προϊόντων αποτελούν μια άλλη σημαντική πηγή ρύπανσης του περιβάλλοντος. Ανθρωπογενείς δραστηριότητες σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές αποτελούν επίσης μια άλλη σημαντική πηγή. Αγροτικές πρακτικές που στοχεύουν στη μεγιστοποίηση της παραγωγής των αγροτικών προϊόντων (π.χ. λιπάσματα, ζιζανιοκτόνα, φυτοφάρμακα, εντομοκτόνα κτλ) συμπράττουν σε μεγάλο βαθμό στην εκδήλωση εμφάνισης της ρύπανσης, η οποία με τη σειρά της μπορεί να διακόψει και να μειώσει τις φυσικές λειτουργίες του εδάφους και να προκληθεί δευτερογενή ρύπανση στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα (Aqeel, Jamil, & Yusoff, 2014; Christopher et al., 2016).



Εικόνα 1-2: Πηγές ρύπανσης εδαφών και υδάτων.  
Πηγή: (Christopher et al., 2016)

### 1.3 Σημαντικότερες Κατηγορίες Ρύπων

Με βάση τη φύση και δομή τους οι ρύποι στο περιβάλλον μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες: i) τους οργανικούς και ii) τους ανόργανους ρύπους.

#### 1.3.1 Οργανικοί Ρύποι (Organic Pollutants)

Οι οργανικοί ρύποι (organic pollutants, OPs) αποτελούνται από οργανικές ενώσεις ατόμων άνθρακα, πρωτεϊνών, υδατανθράκων και οξέων. Απελευθερώνονται στον αέρα, στα εδάφη και στα ύδατα μέσω φυσικών και ανθρώπινων δραστηριοτήτων (Duarte, Matos, & Senesi, 2018). Οι οργανικοί ρύποι που προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες, για παράδειγμα από την οικιακή χρήση νερού, τη βιομηχανία, τη γεωργία και την κτηνοτροφία, αν και είναι συνήθως βιοαποικοδομήσιμες χημικές ενώσεις ορισμένες από αυτές είναι επικίνδυνες για το περιβάλλον και για την ανθρώπινη υγεία λόγω της αντοχής τους στο περιβάλλον και της βιοσυσσώρευσης στους ιστούς των ζωντανών οργανισμών (Alharbi, Basheer, Khattab, & Ali, 2018). Από τους πιο σημαντικούς οργανικούς ρύπους που συναντάμε στο περιβάλλον αποτελούν:

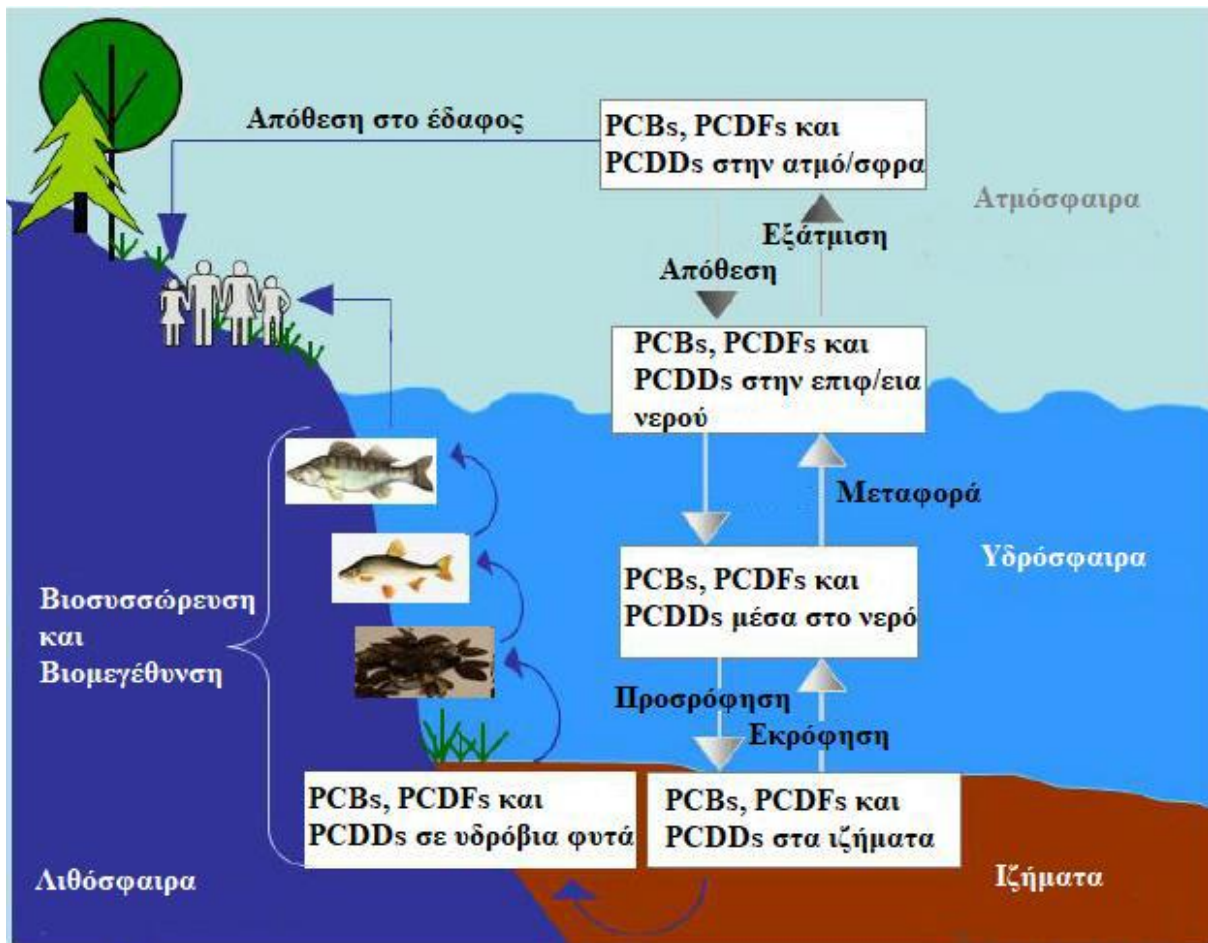


- τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs)
- τα πολυχλωριωμένα διβενζοφουράνια (PCDFs)
- οι πολυχλωριωμένες διβενζοδιοξίνες (PCDDs)
- οι πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs)
- οι πολυβρωμιωμένοι διφαινυλαιθέρες (PBDEs)
- τα οργανοχλωριούχα παρασιτοκτόνα (OCPs)
- τα οργανοφωσφορικά και τα καρβαμικά εντομοκτόνα
- καθώς και τα καύσιμα (βενζίνη, πετρέλαιο κτλ) (M. A. Ashraf, Maah, & Yusoff, 2014; Burgess, 2013; Gaur, Narasimhulu, & Y, 2018; Y. Kim et al., 2019).

### **Πολυχλωριωμένα Διφαινύλια, Διβενζοφουράνια, Διβενζοδιοξίνες (PCBs, PDDFs, PCDDs)**

Τα PCBs, PDDFs και PCDDs είναι οργανοχλωρικές ενώσεις οι οποίες αποτελούνται από χημικές ενώσεις άνθρακα, υδρογόνου και χλωρίου. Αυτές οι ουσίες λόγω των φυσικοχημικών ιδιοτήτων που έχουν (όπως είναι η μονωτική ικανότητα, η θερμική σταθερότητα, η αντοχή σε οξεία, οξειδωση, υδρόλυση και στη θερμότητα), έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως από το 1930 σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές όπως σε πλαστικοποιητές, χρώματα, επικαλύψεις επιφανειών, επιβραδυντικά φλόγας, στεγανοποιητικά υλικά, μελάνια, κόλλες, φυτοφάρμακα, προϊόντα από καουτσούκ κτλ (Dai, Min, & Weng, 2016; Fry & Power, 2017; R. Jing, Fusi, & Kjellerup, 2018; O'Hara & Rice, 1996). Λόγω της χημικής σταθερότητας και των μονωτικών ιδιοτήτων τους στον ηλεκτρισμό χρησιμοποιήθηκαν, σε πυκνωτές, μετασχηματιστές και σε συστήματα ψύξης των ηλεκτρικών συσκευών (R. Jing et al., 2018; Pinson, Bourguignon, & Parent, 2016; Μπαρμπούνης, 2015).

Παρόλο που έχει απαγορευτεί η χρήση τους από τη δεκαετία του 1970 λόγω των αρνητικών επιδράσεων στο περιβάλλον και τη συσχέτισή τους με την εμφάνιση προβλημάτων υγείας στον άνθρωπο απαντώνται ακόμη και σήμερα σε εδάφη, ιζήματα, ύδατα και στον αέρα λόγω της φυσικής ικανότητάς τους να αντέχουν και να παραμένουν για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα στην ατμόσφαιρα και να μεταφέρονται μέσω των συστημάτων της γης. Συσσωρεύονται στους λιπώδεις ζωικούς και φυτικούς ιστούς των ζωντανών οργανισμών και μέσω τροφικής αλυσίδας καταλήγουν στον άνθρωπο. Η μακροπρόθεσμη έκθεση του ανθρώπου σ' αυτές τις ουσίες τους καθιστά μια σημαντική τοξικολογική απειλή (Bell, 2014; Darbre, 2018; Helou, Harmouche-Karakí, Karake, & Narbonne, 2019; Nandipati & Litvan, 2016). Επί του παρόντος πάρα πολλές χώρες παγκοσμίως επιβάλλουν αυστηρούς ελέγχους στη χρήση και την απελευθέρωσή τους. Η κύρια πηγή απελευθέρωσης των παραπάνω ουσιών στο περιβάλλον σήμερα, είναι η απόρριψη και η αποτέφρωση βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων ή προϊόντων που κατασκευάστηκαν κατά το παρελθόν που περιέχουν αυτές τις ουσίες (Urbaniak, 2013).



Εικόνα 1-3: Κύκλος των PCBs, PCDFs, PCDDs στο περιβάλλον. Πηγή: (Urbaniak, 2013)

### Πολυαρωματικοί Υδρογονάνθρακες (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)

Οι πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες είναι μια ομάδα χημικών οργανικών ενώσεων που αποτελούνται μόνο από άτομα άνθρακα και υδρογόνου. Πάνω από 100 διαφορετικοί PAHs σχηματίζονται κατά την ατελής καύση οργανικών προϊόντων που περιέχουν ενώσεις άνθρακα (π.χ. πετρέλαιο, βενζίνη και ξύλο κτλ) (Abdel-Shafy & Mansour, 2016). Η παρουσία τους στο περιβάλλον οφείλεται κυρίως σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες και φυσικές πηγές όπως είναι η καύση ορυκτών καυσίμων σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, από ναυτιλιακές δραστηριότητες, την καύση αποβλήτων, από τις δασικές πυρκαγιές και την δραστηριότητα των ηφαιστειών, αντίστοιχα. Ορισμένοι PAHs (π.χ. όπως ακεναφθένιο, ανθρακένιο, φθορανθάνη, φθορένιο, φαινανθρένιο, πυρένιο) χρησιμοποιούνται ευρέως για παραγωγή πλαστικών υλικών, φυτοφαρμάκων, χρωμάτων, λιπαντικών, φωτογραφικών προϊόντων και σε άλλες βιομηχανικές εφαρμογές (C. B. Crawford, Quinn, Crawford, & Quinn, 2017).

Η σύνθεσή τους ποικίλλει ανάλογα με την πηγή προέλευσής τους. Συχνότερα απαντώνται στα γλυκά ύδατα, στα θαλάσσια ιζήματα, στην ατμόσφαιρα και στον πάγο και είναι ιδιαίτερα λιπόφιλοι και διαλυτοί. Παρουσιάζουν ορισμένες ιδιότητες όπως είναι η ευαισθησία στο φως, η αντοχή σε θερμότητα, αγωγιμότητα, διασπορά και ανθεκτικότητα σε διάβρωση. Διαθέτουν χαρακτηριστικά φάσματα απορρόφησης υπεριώδους ακτινοβολίας (UV). Κάθε δακτυλιοειδής δομή έχει ένα μοναδικό υπεριώδες φάσμα απορρόφησης υπεριωδών ακτίνων, χαρακτηριστικό που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην ταυτοποίηση των PAHs. Λόγω της μεγάλης διασποράς τους στο περιβάλλον η περιβαλλοντική ρύπανση που οφείλεται στους PAHs προκαλεί παγκόσμια ανησυχία. Πολλοί PAHs καθώς και τα υποοξειδιά τους είναι τοξικά και καρκινογόνα για τους οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπου (Rengarajan et al., 2015).

### **Πολυβρωμιωμένοι Διφαινυλαιθέρες (PBDEs)**

Οι πολυβρωμιωμένοι διφαινυλαιθέρες είναι οργανικές χημικές ενώσεις οργανοβρωμίνης οι οποίες έχουν εφαρμοστεί ευρέως από τις αρχές του 1960 ως πρόσθετα επιβραδυντικά φλόγας (BFRs) σε διάφορα προϊόντα, όπως δομικά υλικά, πλαστικά, έπιπλα, υφάσματα, ηλεκτρονικό εξοπλισμό, αυτοκίνητα και σε αεροπλάνα. Έχουν παρόμοια δομή με τους πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs) αλλά με διαφορά ότι περιέχουν ένα άτομο οξυγόνου ανάμεσα στους αρωματικούς δακτυλίους. Σχετίζονται με σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, ιδιαίτερα στα παιδιά λόγω της τοξικότητά τους. Τα PBDEs είναι υδρόφοβα και βιοσυσσωρεύσιμα και μεταφέρονται σε πολύ απομακρυσμένες περιοχές μέσω των ατμοσφαιρικών συστημάτων και να εναποτίθενται σε εδάφη, ιζήματα και σε ύδατα (Genuis, Birkholz, & Genuis, 2017; Y. Zhang et al., 2016; Μπέσης, 2014).

### **Οργανοχλωριούχα Παρασιτοκτόνα (OCPs)**

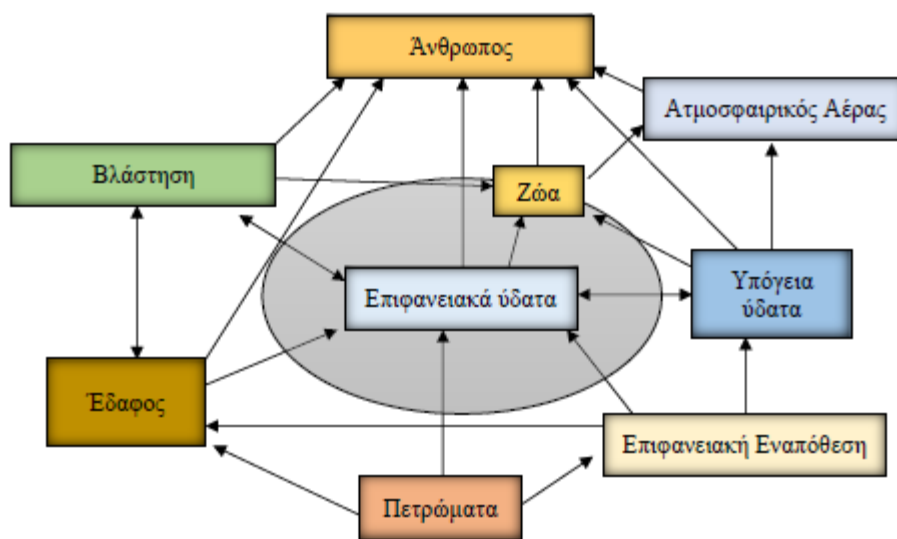
Τα οργανοχλωριούχα παρασιτοκτόνα είναι μια ομάδα συνθετικών χλωριωμένων ενώσεων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία και στη γεωργία. Αυτές οι ενώσεις είναι γνωστές για την εμφάνιση της υψηλής τους τοξικότητας, την αργή αποικοδόμηση και τη βιοσυσσώρευση στους ιστούς οργανισμών. Οι συγκεκριμένες ουσίες χρησιμοποιήθηκαν για πολλά χρόνια από πολλές χώρες μετά τον 2ο Παγκόσμιο Πόλεμο για την καταπολέμηση της ελονοσίας και του τύφου (Jayaraj, Megha, & Sreedev, 2016). Στις αρχές της δεκαετίας του 1970 μετά από έρευνες ανακαλύφθηκαν οι τοξικές επιδράσεις που προκαλούσαν σε πτηνά και ψάρια και ο κίνδυνος μεταφοράς των τοξικών αυτών ουσιών στην τροφική αλυσίδα και στον άνθρωπο ήταν ένας ορατός πλέον μεγάλος κίνδυνος. Μετά από αυτό, τα περισσότερα OCPs απαγορεύτηκαν πρώτα στις Η.Π.Α και στη συνέχεια στην Ευρώπη και σε άλλες αναπτυσσόμενες χώρες διεθνώς. Παρά την αποδεδειγμένη επικινδυνότητά τους σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες κυρίως της Ασίας χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα. Η παρουσία των OCPs σε εδάφη, ιζήματα, ύδατα και στα τρόφιμα (π.χ. γαλακτοκομικά προϊόντα, ψάρια) αναφέρονται σε πολλές μελέτες ακόμα και σήμερα, πράγμα που προξενεί μεγάλη ανησυχία (Helou et al., 2019; Nuro, 2018).

Οι παραπάνω οργανικοί ρύποι, γνωστοί και ως έμμονοι οργανικοί ρύποι (Persistent Organic Pollutants, POPs) έχουν την ικανότητα να μεταφέρονται φυσικά σε μεγάλες αποστάσεις μέσω ατμοσφαιρικών και υδάτινων συστημάτων. Λόγω της μεγάλης διασποράς τους, η έκθεση του ανθρώπου στις παραπάνω ρυπογόνες ουσίες είναι παντού παρούσα και δεν περιορίζεται μόνο σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές αλλά και σε απομακρυσμένες περιοχές μακριά από την πηγή τους. Οι συγκεκριμένοι ρύποι είναι ιδιαίτερα λιπόφιλοι και συσσωρεύονται στους ιστούς των ζωντανών οργανισμών. Συσσωρεύονται στα τρόφιμα (π.χ. ψάρια, ζώα, λαχανικά, φρούτα) και μέσω της τροφικής αλυσίδας, της εισπνοής του αέρα ή της επαφής με το δέρμα εισάγονται στον άνθρωπο (Islam et al., 2018). Οι ουσίες αυτές σχετίζονται με την εμφάνιση προβλημάτων υγείας όπως γενετικές αλλαγές του DNA, με ενδοκρινικές διαταραχές, την εμφάνιση διάφορων τύπων καρκίνου, το διαβήτη, καρδιαγγειακές παθήσεις, την παχυσαρκία και άλλες ασθένειες (Alharbi et al., 2018; Islam et al., 2018; Langenbach, 2013; Ockenden et al., 2003; Schæbel, Bonefeld-Jørgensen, Vestergaard, & Andersen, 2017; Teng, Xu, Luo, & Reverchon, 2012). Για την προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος η διεθνής κοινότητα θέσπισε τη το 2001 τη λεγόμενη Σύμβαση της Στοκχόλμης, η οποία τέθηκε σε ισχύ τον Μάιο του 2004 και επικυρώθηκε από περισσότερες από 170 χώρες. Η Σύμβαση της Στοκχόλμης για τους POPs στοχεύει στη μείωση και πρόληψη της έκθεσης σε αυτές τις ουσίες, μειώνοντας την παρουσία τους στο περιβάλλον (Brajnović, Karačonić, & Jurić, 2018; van den Berg et al., 2017).

### **1.3.2 Ανόργανοι Ρύποι (Inorganic Pollutants)**

Οι ανόργανοι ρύποι (inorganics pollutants) εμφανίζονται ως φυσικά στοιχεία και εισάγονται στο περιβάλλον όπως και οι οργανικοί ρύποι με φυσικές και ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Τους

συναντάμε στα εδάφη, στα ύδατα και τον αέρα της ατμόσφαιρας (Jacob et al., 2018). Οι ανόργανοι ρύποι αποτελούνται από χημικές ενώσεις που δεν είναι βιοαποικοδομήσιμες ουσίες από το περιβάλλον όπως είναι τα βαρέα μέταλλα. Αποτελούνται από ανόργανα οξέα, άλατα, ιχνοστοιχεία, μέταλλα, ενώσεις μεταλλικών στοιχείων, από σύμπλοκα μετάλλων με οργανικές ενώσεις, κυανίδια, θειικά άλατα κτλ, τα οποία εμφανίζονται υπό μορφή διαλυμένων ανιόντων και κατιόντων. Λόγω της αντοχής και της μη βιοαποικοδόμησής τους, έχουν την ικανότητα να συσσωρεύονται σε εδάφη, ύδατα και στους ιστούς των ζωντανών οργανισμών αποτελώντας ένα σοβαρό κίνδυνο για το περιβάλλον και για τη δημόσια υγεία. Αν και ορισμένοι από αυτούς επιδρούν θετικά στην ανάπτυξη όλων των ζωντανών οργανισμών, όταν η συγκέντρωσή τους εμφανίζεται πάνω από τα φυσιολογικά επίπεδα επιδρούν αρνητικά λόγω της τοξικότητας που προκαλούν. Από τους πλέον σημαντικότερους ανόργανους ρύπους που απαντώνται στα εδάφη, στα ύδατα και την ατμόσφαιρα αποτελούν τα βαρέα μέταλλα (Cd, Cr, Pb, Ni, Zn, Se, Cu, Co), τα μεταλλικά στοιχεία (As, Hg και Se) και τα ραδιονουκλεΐδια (Patinha, Armienta, Argyraki, & Durães, 2017; Vhahangwele & Khathutshelo, 2018).



**Εικόνα 1-4: Κύκλος ανόργανων ρύπων στο περιβάλλον.** Πηγή: (Saha et al., 2017)

### 1.3.3 Βαρέα Μέταλλα (Heavy Metals)

Από χημική άποψη ως βαρέα μέταλλα (heavy metals) ονομάζονται εκείνα τα στοιχεία με ατομική μάζα μεγαλύτερη από 20 και πυκνότητα μεγαλύτερη από 5.0 g/cm<sup>3</sup> (Häni, 1990; Järup, 2003; Rascio & Navari-Izzo, 2011). Τα βαρέα μέταλλα είναι φυσικά συστατικά του φλοιού της γης. Η εμφάνισή τους στον αέρα, στο έδαφος και στα ύδατα είναι αιτία τόσο φυσικών όσο και δραστηριοτήτων ανθρωπογενούς προέλευσης (Gong et al., 2018). Από τις πιο σημαντικές φυσικές πηγές αποτελούν η αποσάθρωση των πετρωμάτων, η ηφαιστειακή δραστηριότητα και η ατμοσφαιρική εναπόθεση, ενώ από τις ανθρωπογενείς είναι η εξόρυξη και η τήξη ορυκτών, η χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων και η διαχείριση αποβλήτων (Ahmad S, Tabassum H, & Alam A, 2016; Khalid et al., 2017; Prabhat Kumar Rai, Lee, Zhang, Tsang, & Kim, 2019).

Τα βαρέα μέταλλα με βάση την τοξικότητά τους ταξινομούνται σε βασικά και μη βασικά μέταλλα. Τα βασικά μέταλλα είναι απαραίτητα ως ιχνοστοιχεία για τις ζωτικές φυσιολογικές και βιοχημικές λειτουργίες ανάπτυξης των ζωντανών οργανισμών. Τέτοια μέταλλα αποτελούν ο σίδηρος (Fe), το μαγγάνιο (Mn), ο χαλκός (Cu), ο ψευδάργυρος (Zn), το νικέλιο (Ni) κ.ά. (Tang et al., 2019; Tchounwou, Yedjou, Patlolla, & Sutton, 2012). Τα μη βασικά

μέταλλα έχουν άγνωστη βιολογική ή φυσιολογική λειτουργία που δεν είναι απαραίτητα και εισέρχονται σε ζωντανούς οργανισμούς μέσω της τροφής, του αέρα, της επαφής ή από την τυχαία έκθεσή τους σε αυτά. Τέτοια μέταλλα αποτελούν το αρσενικό (As), το κάδμιο (Cd), το χρώμιο (Cr), ο μόλυβδος (Pb), ο υδράργυρος (Hg) κ.ά. Και οι δύο ομάδες μετάλλων πάνω από συγκεκριμένες συγκεντρώσεις είναι τοξικές (Ali, Khan, & Sajad, 2013; J.-J. Kim, Kim, & Kumar, 2019; Laghlimi, Baghdad, El Hadi, & Bouabdli, 2015).

**Πίνακας 1: Ανθρωπογενείς πηγές των σημαντικότερων βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον.**

Πηγή: (Ali et al., 2013)

Βαρέα μέταλλα	Πηγές
As	Παρασιτοκτόνα και συντηρητικά ξύλου.
Cd	Χρώματα και χρωστικές ουσίες, καύση πλαστικών που περιέχουν κάδμιο, σταθεροποιητές πλαστικών, φωσφορικά λιπάσματα.
Cr	Βυρσοδευεία, βιομηχανίες χάλυβα, ιπτάμενη τέφρα.
Hg	Απελευθέρωση από την εξόρυξη Au-Ag, καύση άνθρακα.
Pb	Εκπομπές αερίων από καύση μολυβδόχου πετρελαίου, παραγωγή μπαταριών, ζιζανιοκτόνα, εντομοκτόνα.

### **Αρσενικό (As)**

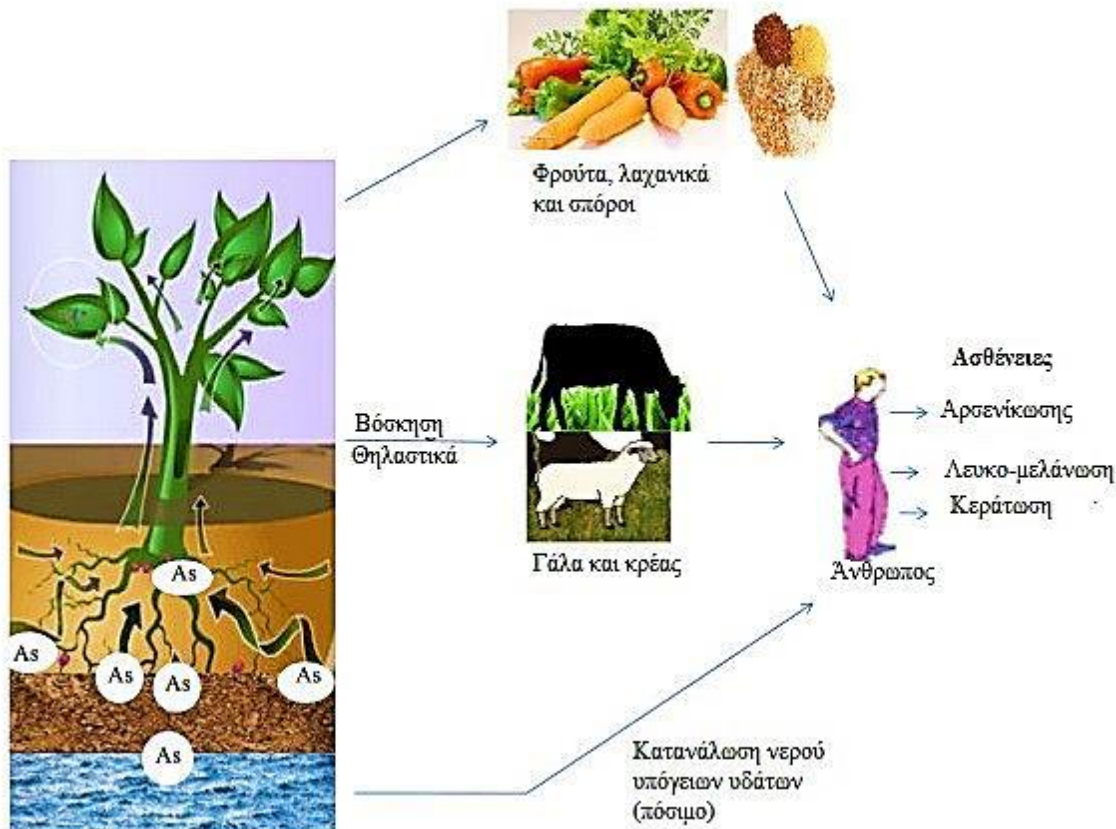
Το αρσενικό (As) αποτελεί ένα φυσικό στοιχείο στο φλοιό της γης και το συναντάμε σχεδόν παντού στον αέρα, στο νερό, στο έδαφος, στα φυτά και στα ζώα. Δεν ανήκει στην κατηγορία των βαρέων μετάλλων αλλά στην κατηγορία των μεταλλικών στοιχείων, παρόλα αυτά πολλές φορές το κατηγοριοποιούμε συχνά στα βαρέα μέταλλα λόγω της τοξικότητας που παρουσιάζει που είναι εξίσου παρόμοια με αυτή των βαρέων μετάλλων. Στην ανόργανη μορφή του είναι ιδιαίτερα τοξικό για τους περισσότερους ζωντανούς οργανισμούς. Έχει τη φυσική ικανότητα να προσκολλάται σε μικρά σωματίδια που αιωρούνται στον αέρα τα οποία παραμένουν εκεί για μεγάλο χρονικό διάστημα και μέσω της δύναμης του ανέμου μεταφέρεται σε πολύ μακρινές αποστάσεις όπου τελικά εναποτίθεται σε εδάφη και σε υδάτινα συστήματα (π.χ. θάλασσες, λίμνες, ποτάμια) (Chung, Yu, & Hong, 2014).

Οι μεγαλύτερες από τις ποσότητες αρσενικού προέρχονται μέσω φυσικών δραστηριοτήτων και σε μικρότερο βαθμό μέσω ανθρωπογενών (Garbinski, Rosen, & Chen, 2019). Ωστόσο, οι δραστηριότητες ανθρωπογενούς προελεύσεως ενισχύουν σε σημαντικό βαθμό τη συσσώρευση του στο περιβάλλον (Minatel et al., 2018). Από τις σημαντικότερες φυσικές δραστηριότητες που προωθούν την απελευθέρωσή του είναι η ηφαιστειακή δραστηριότητα, η αποσάθρωση και η διάβρωση των πετρωμάτων, οι γεωθερμικές πηγές και οι δασικές πυρκαγιές.

Ανθρωπογενείς δραστηριότητες που σχετίζονται με την απελευθέρωση του αρσενικού στο περιβάλλον έχουν να κάνουν συνήθως με την εξόρυξη και τήξη των ορυκτών, με την καύση του άνθρακα για παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας (κυρίως μέσω εναπόθεσης της ιπτάμενης τέφρας στο έδαφος και στα επιφανειακά ύδατα) και η χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων. Άλλες σημαντικές πηγές ανθρωπογενούς προελεύσεως αποτελούν η βιομηχανία παραγωγής γυαλιού, ιατρικών προϊόντων, χαρτιού, υφασμάτων, επεξεργασίας και συντήρησης του ξύλου και πυρομαχικών. Όλες οι παραπάνω βιομηχανικές δραστηριότητες χρησιμοποιούν το αρσενικό ως συστατικό σε πολλές διεργασίες σε διαφορετικά στάδια της

παραγωγική τους διαδικασία. Παράγουν υψηλές ποσότητες στερεών και υγρών αποβλήτων αλλά και αερίων που περιέχουν ενώσεις αρσενικού, τα οποία στη συνέχεια απορρίπτονται ή απελευθερώνονται στο έδαφος, στα ύδατα και στον ατμοσφαιρικό αέρα ρυπαίνοντας το φυσικό περιβάλλον με αυτόν τον τοξικό ρύπο (Asere, Stevens, & Du Laing, 2019; Nikolopoulos D & D, 2015; Punshon et al., 2017; Singh, Singh, Parihar, Singh, & Prasad, 2015; Y. Wang, Li, Guo, Jiang, & Liu, 2018). Μια άλλη σημαντική πηγή αρσενικού αποτελούν οι μονάδες επεξεργασίας των αστικών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων. Κατά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων παράγεται ένα στερεό υπόλειμμα, η λυματολάσπη, η οποία περιέχει ποσότητες αρσενικού. Η λυματολάσπη μετέπειτα ή απορρίπτεται σε κάποιον χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων ή κομποστοποιείται για παραγωγή εδαφοβελτιωτικού υλικού το οποίο προορίζεται για χρήση σε γεωργικές, δασικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές ή χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για παραγωγή ενέργειας (Bellamri, Morzadec, Fardel, & Vernhet, 2018; Chen et al., 2019; Grosser & Celary, 2019; Ji et al., 2017; Prasanta Mandal, Debbarma, Saha, & Ruj, 2016; Vašíčková, Maňáková, Šudoma, & Hofman, 2016).

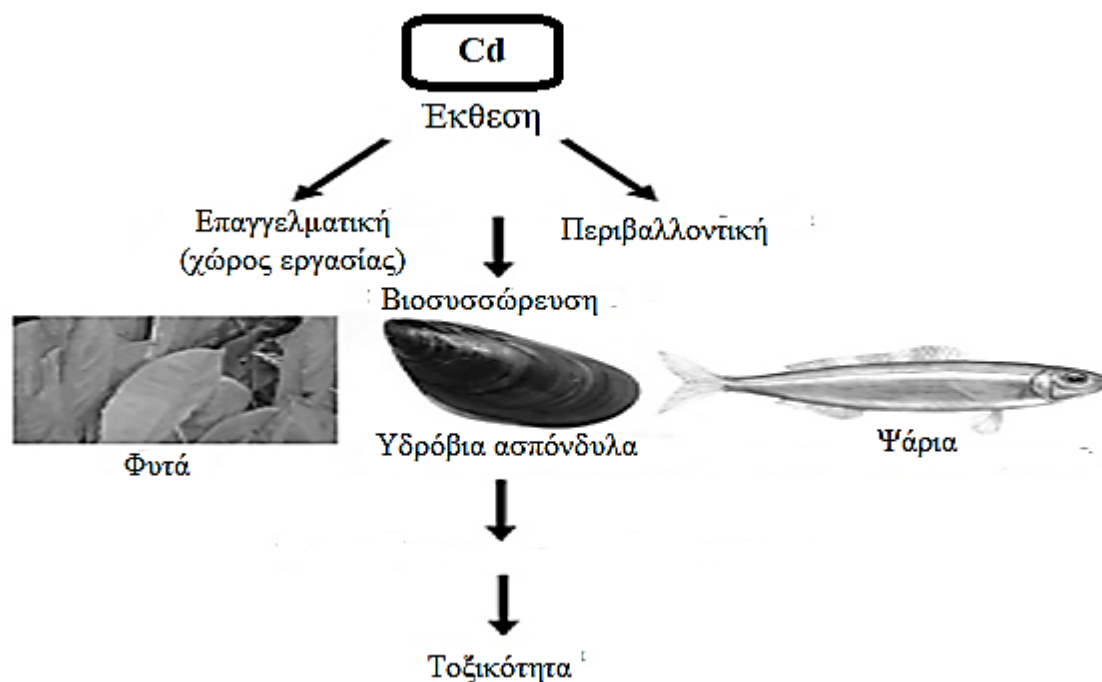
Τα μολυσμένα ύδατα και τρόφιμα με αρσενικό είναι η κύρια πηγή έκθεσης τόσο του ανθρώπου όσο και των ζώων σε αυτόν τον επικίνδυνο ρύπο (Paramita Mandal, 2017; Molin, Ulven, Meltzer, & Alexander, 2015). Το αρσενικό εισέρχεται στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω των τροφίμων και του πόσιμου νερού, το οποίο στη συνέχεια συσσωρεύεται στους λιπώδεις ιστούς και με την πάροδο του χρόνου μπορεί να προκαλέσει διάφορα προβλήματα υγείας. Η χρόνια έκθεση σε αρσενικό σχετίζεται με τον καρκίνο του δέρματος, με προβλήματα στους πνεύμονες, την καρδιά, το ήπαρ, την νεφρική ανεπάρκεια και πολλές άλλες ασθένειες (Chung et al., 2014; Mohammed Abdul, Jayasinghe, Chandana, Jayasumana, & De Silva, 2015; Rahman, Rahman, Khan, & Renzaho, 2018).



Εικόνα 1-5: Έκθεση και βιοσυσσώρευση αρσενικού. Πηγή: (Singhetal., 2015).

### **Κάδμιο (Cd)**

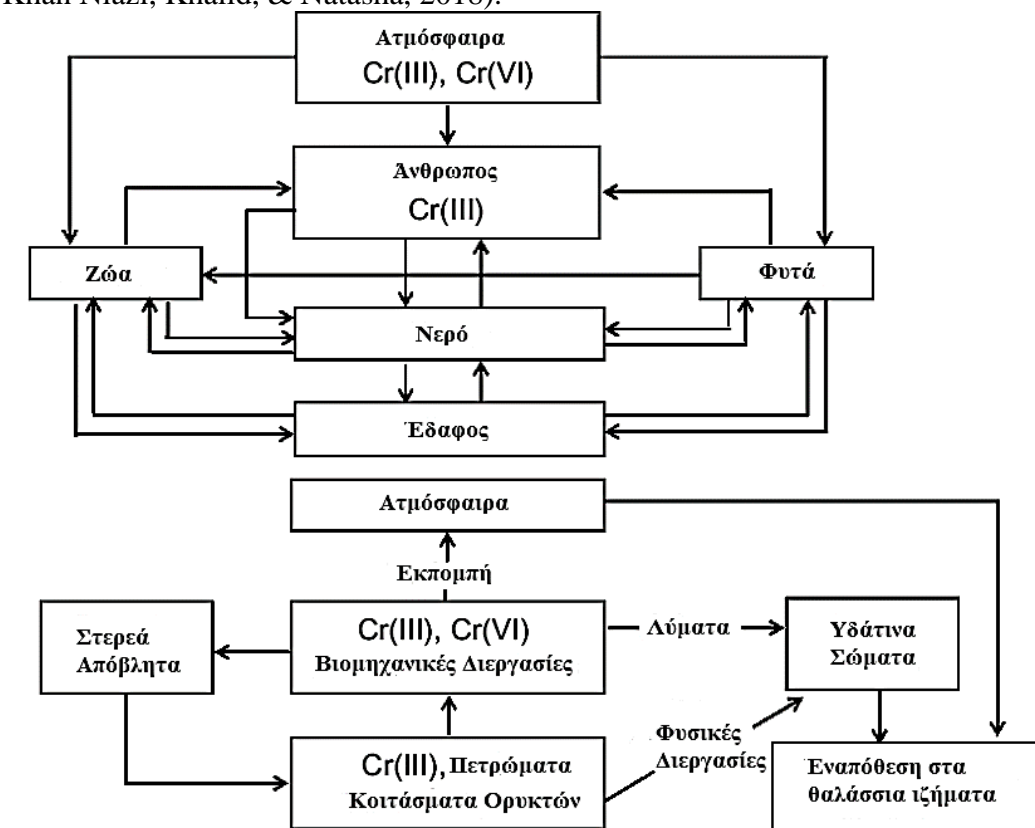
Το κάδμιο (Cd), αποτελεί έναν σημαντικό επικίνδυνο τοξικό ρύπο για το περιβάλλον και τους ζωντανούς οργανισμούς. Είναι ένα φυσικό στοιχείο ευρέως καταναμημένο στο φλοιό της γης με μέση συγκέντρωση περίπου στα 0.1 mg/kg. Οι μεγαλύτερες ποσότητες του καδμίου απελευθερώνονται στο περιβάλλον μέσω της τήξης άλλων μετάλλων, ιδίως του ψευδαργύρου (Zn). Άλλες πηγές απελευθέρωσης αποτελούν η καύση των ορυκτών καυσίμων, η αποτέφρωση των αστικών στερεών αποβλήτων και η χρήση των λιπασμάτων. Η χρήση της ιλύος δημοτικών λυμάτων σε καλλιέργειες αποτελεί επίσης μια άλλη σημαντική πηγή καδμίου στο περιβάλλον. Οι μεγαλύτερες από τις ποσότητες καδμίου που απελευθερώνονται τόσο από φυσικές όσο και ανθρωπογενείς δραστηριότητες συσσωρεύονται περισσότερο στα φωσφορικά άλατα και στα θαλάσσια ιζηματογενή πετρώματα. Το κάδμιο ανήκει στην κατηγορία των μη βασικών βαρέων μετάλλων και είναι ιδιαίτερα τοξικό για τους περισσότερους ζωντανούς οργανισμούς. Παρά την υψηλή επικινδυνότητά του χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικές δραστηριότητες που έχουν να κάνουν κυρίως με την παραγωγή των μπαταριών νικελίου-καδμίου (83%), διάφορων χρωστικών ουσιών (8%), την επεξεργασία των κραμάτων (7%), σταθεροποιητικών πλαστικών (1,2%) και πολλές άλλες χρήσεις (0,8%) (Π' yasova & Schwartz, 2005; Kirkham, 2006; H. Zhang & Reynolds, 2019). Λόγω της πολύ μεγάλης χρήσης του καδμίου στον κλάδο της βιομηχανίας, τα φυσικά επίπεδά του στο περιβάλλον έχουν αυξηθεί σημαντικά. Ο άνθρωπος εκτίθεται στο κάδμιο κυρίως μέσα από τους επαγγελματικούς χώρους εργασίας του που έχουν μολυνθεί από το κάδμιο, την κατανάλωση τροφίμων (π.χ. ψάρια) και των κακών συνηθειών όπως είναι το κάπνισμα κ.ά. Η χρόνια έκθεση σε Cd και η συσσώρευσή του στον ανθρώπινο οργανισμό σχετίζεται συνηθώς με την εμφάνιση προβλημάτων υγείας όπως είναι η νεφρική ανεπάρκεια, οι νευρολογικές διαταραχές, τα αναπνευστικά προβλήματα και πολλές άλλες ασθένειες (RoyChowdhury, Datta, & Sarkar, 2018; Tchounwou et al., 2012; WHO, 2010).



**Εικόνα 1-6:** Έκθεση και βιοσυσσώρευση καδμίου. Πηγή: (Zhang & Reynolds, 2019).

### Χρώμιο (Cr)

Το χρώμιο (Cr) είναι φυσικό στοιχείο που το συναντάμε σχεδόν παντού στο περιβάλλον και θεωρείται ως ένας από τους πιο επικίνδυνους ρύπους ακόμη και σε χαμηλή συγκέντρωση λόγω της τοξικότητάς του. Η συγκέντρωσή του στο εδαφικό σύστημα είναι ανάλογη με τη σύνθεση ιζηματογενών πετρωμάτων. Το συναντάμε σε πολλές διαφορετικές χημικές μορφές οξείδωσης αλλά οι περισσότερο σύνηθες και σταθερές του μορφές είναι το στοιχειακό (Cr<sup>0</sup>), το τρισθενές (Cr<sup>III</sup>) και το εξασθενές χρώμιο (Cr<sup>VI</sup>) (Oliveira, 2012; Shanker, 2019). Ενώσεις στοιχειακού χρωμίου Cr<sup>0</sup> χρησιμοποιούνται ευρέως στα βυρσοδεψεία για την επεξεργασία του δέρματος, στην παραγωγή χάλυβα και κραμάτων, σε ανασταλτικές ουσίες διάβρωσης των μετάλλων, ως χρωστική ουσία σε χρώματα και σε διάφορες άλλες βιομηχανικές εφαρμογές. Το εξασθενές χρώμιο (Cr<sup>VI</sup>) είναι η πιο τοξική μορφή του χρωμίου, ακόμη και σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο. Η έκθεση του ανθρώπου στο χρώμιο έχει αρνητικές επιδράσεις στο ανοσοποιητικό και αναπνευστικό σύστημα, στα νεφρά, και είναι υπεύθυνο για την εμφάνιση καρκίνου. Αντίθετα, το τρισθενές χρώμιο (Cr<sup>III</sup>) είναι λιγότερο τοξικό και επικίνδυνο από το εξασθενές χρώμιο (Cr<sup>VI</sup>), το οποίο συνδέεται με την οργανική ύλη στο έδαφος και το υδάτινο περιβάλλον (Shahid, Dumat, Khan Niazi, Khalid, & Natasha, 2018).



Εικόνα 1-7: Κύκλος χρωμίου στο περιβάλλον. Πηγή: (Samantaray, Mohapatra, & Mishra, 2014).

### Μόλυβδος (Pb)

Ο μόλυβδος (Pb) αποτελεί από τα περισσότερο εμφανιζόμενα βαρέα μέταλλα (μη βασικό μέταλλο, μπλε-γκριζωπού χρώματος) που απαντάται στη φύση στο φλοιό της γης. Συνήθως το συναντάμε σε συνδυασμό με δύο ή περισσότερα άλλα στοιχεία που σχηματίζουν μεταξύ



τους διάφορες ενώσεις μολύβδου. Είναι ιδιαίτερα τοξικό ακόμη και σε μικρές συγκεντρώσεις για τους ζωντανούς οργανισμούς αλλά και για τον ίδιο τον άνθρωπο. Λόγω των φυσικοχημικών ιδιοτήτων (μαλακό, εύκαμπτο, ολκιμότητα, κακή αγωγιμότητα, ανθεκτικότητα στη διάβρωση), έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές όπως στην παραγωγή των μπαταριών, χρωμάτων, των πυρομαχικών, των μετάλλων, των παιχνιδιών, στην εκτύπωση βιβλίων κ.ά. Η χρήση του μολύβδου σήμερα έχει μειωθεί σε μεγάλο βαθμό. Σε πολλές χώρες παγκοσμίως έχει απαγορευθεί λόγω των αρνητικών επιδράσεων που προκαλεί στην ανθρώπινη υγεία. Ωστόσο η χρήση του είναι ιδιαίτερα ελκυστική λόγω των σημαντικών φυσικοχημικών ιδιοτήτων που κατέχει, πράγμα που καθιστά δύσκολη την εγκατάλειψη της χρήσης του. Σε ορισμένες χώρες χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα (Tchounpou et al., 2012).

Εμφανίζεται στο φυσικό περιβάλλον σε φυσιολογικά μη επικίνδυνα επίπεδα συγκέντρωσης, ωστόσο οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες όπως είναι η καύση ορυκτών καυσίμων, η εξόρυξη μεταλλευμάτων, η χρήση των μολυβδούχων καυσίμων, η παραγωγή αλλά και η ανακύκλωση των προϊόντων που περιέχουν ως βασικό στοιχείο μολύβδο αποτελούν από τις πιο σημαντικές πηγές και αιτίες της αύξησης των φυ

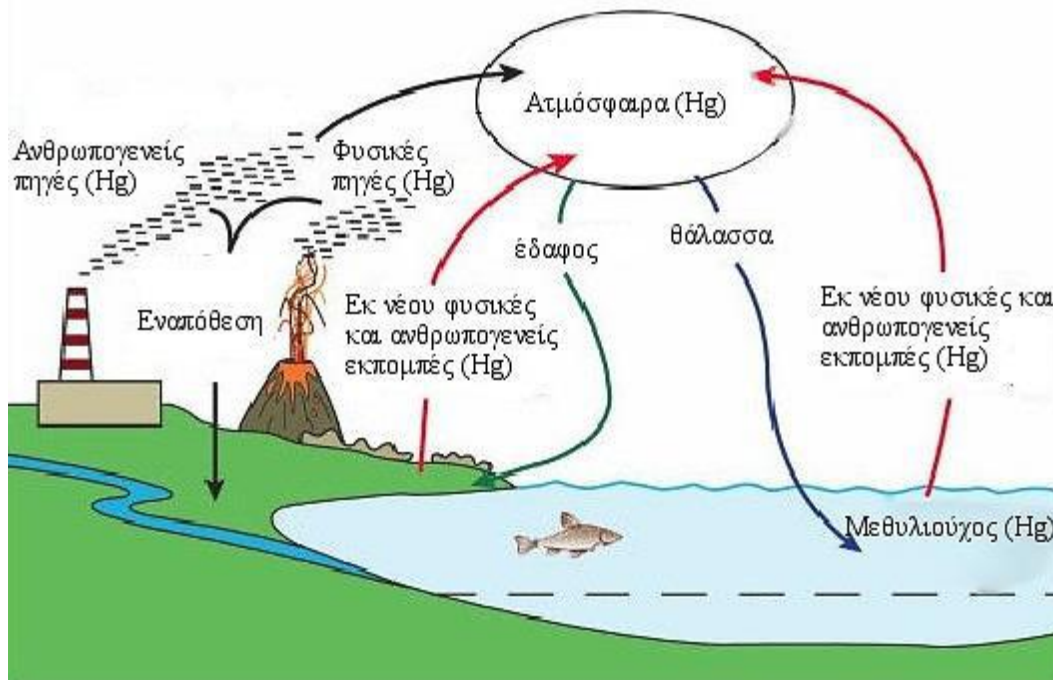
σικών επιπέδων μολύβδου στο περιβάλλον. Ο μολύβδος εισέρχεται στο έδαφος, στα ύδατα, στον αέρα, στα φυτά, στα ζώα και στα τρόφιμα με τελική κατάληξη τον ανθρώπινο οργανισμό. Οι κύριες οδοί εισαγωγής του μολύβδου στον ανθρώπινο οργανισμό είναι η κατάποση νερού, τροφίμων και μέσω της αναπνοής (Cullen & McAlister, 2017; O'Connor et al., 2018; Payne, 2008; Riva, Lafranconi, D'orso, & Cesana, 2012).

Η έκθεση των ανθρώπων στο μολύβδο ακόμη και σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις αποτελεί σήμερα ένα πολύ σημαντικό ζήτημα δημόσιας υγείας. Τόσο στους ενήλικες όσο και στα παιδιά προκαλεί προβλήματα υγείας που σχετίζονται με τη λειτουργία του νευρικού συστήματος. Για παράδειγμα, στα παιδιά ο μολύβδος είναι υπεύθυνος για προβλήματα εμφάνισης διανοητικής και σωματικής ανάπτυξης (μείωση του δείκτη νοημοσύνης, έλλειψη συγκέντρωσης). Ενώ στα ενήλικα άτομα σχετίζεται κυρίως με παθήσεις της καρδιάς όπως είναι η υπέρταση, η αύξηση αρτηριακής πίεσης και τα εγκεφαλικά επεισόδια. Επίσης, σχετίζεται με την εμφάνιση νεφρικής ανεπάρκειας, την αναιμία και επιπλοκών κατά τη διάρκεια μιας εγκυμοσύνης στις γυναίκες (αποβολή, εγκεφαλικές βλάβες στο έμβρυο) (Landrigan, 2018; M. Sullivan & Green, 2016).

### ***Υδράργυρος (Hg)***

Ο υδράργυρος (Hg) είναι ένα φυσικό στοιχείο του φλοιού της γης ο οποίος είναι ιδιαίτερα τοξικός σε μικρές συγκεντρώσεις για τους περισσότερους οργανισμούς συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπου. Απελευθερώνεται στο περιβάλλον τόσο από φυσικές πηγές (π.χ. ηφαίστεια, διάβρωση πετρωμάτων, δασικές πυρκαγιές κτλ) όσο και από ανθρωπογενείς πηγές (π.χ. καύση άνθρακα, αποτέφρωση αποβλήτων, επεξεργασία μετάλλων κτλ) (M.-K. Kim & Zoh, 2012). Ο Υδράργυρος εμφανίζεται στο φυσικό περιβάλλον σε διάφορες φυσικοχημικές μορφές. Ο τύπος της εμφάνισής του υποδεικνύει και το βαθμό της τοξικότητάς του και την κυκλοφορία του μέσα στο περιβάλλον. Γενικά, υπάρχουν τρεις μορφές υδραργύρου που συναντάμε πιο συχνά στο περιβάλλον, αυτές είναι ο στοιχειακός (Hg<sup>0</sup>), ο ανόργανος και ο οργανικός υδράργυρος (μεθυλουδράργυρος, MeHg) (Selin, 2009). Παρά το γεγονός ότι όλες οι παραπάνω μορφές υδραργύρου έχουν την ικανότητα να συσσωρεύονται στους ιστούς των ζωντανών οργανισμών, ο μεθυλουδράργυρος (MeHg) συσσωρεύεται σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με τις υπόλοιπες μορφές και αποτελεί την περισσότερο τοξική μορφή υδραργύρου. Ο MeHg προκαλεί μεγάλη ανησυχία όσον αναφορά την ανθρώπινη υγεία, την υδρόβια ζωή και την ασφάλεια τροφίμων λόγω της τοξικότητας και της μεταφοράς του μέσω της τροφικής αλυσίδας. Στον άνθρωπο σχετίζεται με προβλήματα

υγείας στο νευρικό σύστημα, στο ανοσοποιητικό σύστημα, στους πνεύμονες, τα νεφρά, το δέρμα και τα μάτια (Rice et al., 2014; Jones, Rand, & Darell, 1996).



**Εικόνα 1-8: Πηγές και κύκλος υδραργύρου στο περιβάλλον.** Πηγή: (Barringer, Szabo, & Reilly, 2013).

## **Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> : Αποκατάσταση Ρυπασμένων Εδαφών**

Η ρύπανση των εδαφών και των υπόγειων υδάτων αποτελεί για τις σημερινές κοινωνίες ένα πρόβλημα εκτεταμένο αλλά και δύσκολο στην αντιμετώπισή του. Ειδικά όσο αφορά τα εδάφη, το πρόβλημα γίνεται εντονότερο λόγω της αντίληψης που υπάρχει στους χρήστες της γης, οι οποίοι τις περισσότερες φορές είναι απλοί άνθρωποι-αγρότες, ότι το έδαφος είναι σε θέση να επανέρχεται στην φυσική του κατάσταση και να αφομοιώνει ό,τι πέφτει πάνω του, από νερό μέχρι απόβλητα. Ενώ στην περίπτωση των υδάτων ο εντοπισμός του προβλήματος ρύπανσης είναι ευκολότερος και πιο άμεσος εξαιτίας κυρίως του γεγονότος ότι το νερό χρησιμοποιείται σε δραστηριότητες του ανθρώπου συνδεδεμένες άμεσα με τη διατήρηση της υγείας του αλλά και της υγείας των ζώων που εκτρέφει, δυστυχώς στην περίπτωση του εδάφους το πρόβλημα της ρύπανσης ή και της υποβάθμισής του γίνεται αντιληπτό όταν πια το σύστημα αδυνατεί να αντεπεξέλθει στη χρήση για την οποία προορίζεται και που τις περισσότερες φορές είναι μη αντιστρεπτή κατάσταση. Η ρύπανση των εδαφών από τις δραστηριότητες των ανθρώπων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη ρύπανση των υδάτων. Διάφοροι ρύποι εισέρχονται μέσω του εδάφους στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες ή οδηγούνται μέσω επιφανειακών απορροών σε επιφανειακά υδάτινα συστήματα.

Οι μέθοδοι αποκατάστασης των εδαφών από τις διάφορες κατηγορίες ρύπων είναι αρκετές, η επιλογή όμως της καταλληλότερης εξαρτάται από τη φύση των ρύπων, τη συγκέντρωση και τις επιπτώσεις τους, την υδρογεωλογία της περιοχής, τις κλιματικές συνθήκες, την έκταση της προς αποκατάσταση περιοχής, τις ιδιαίτερες συνθήκες, κοινωνικο-οικονομικές της περιοχής.

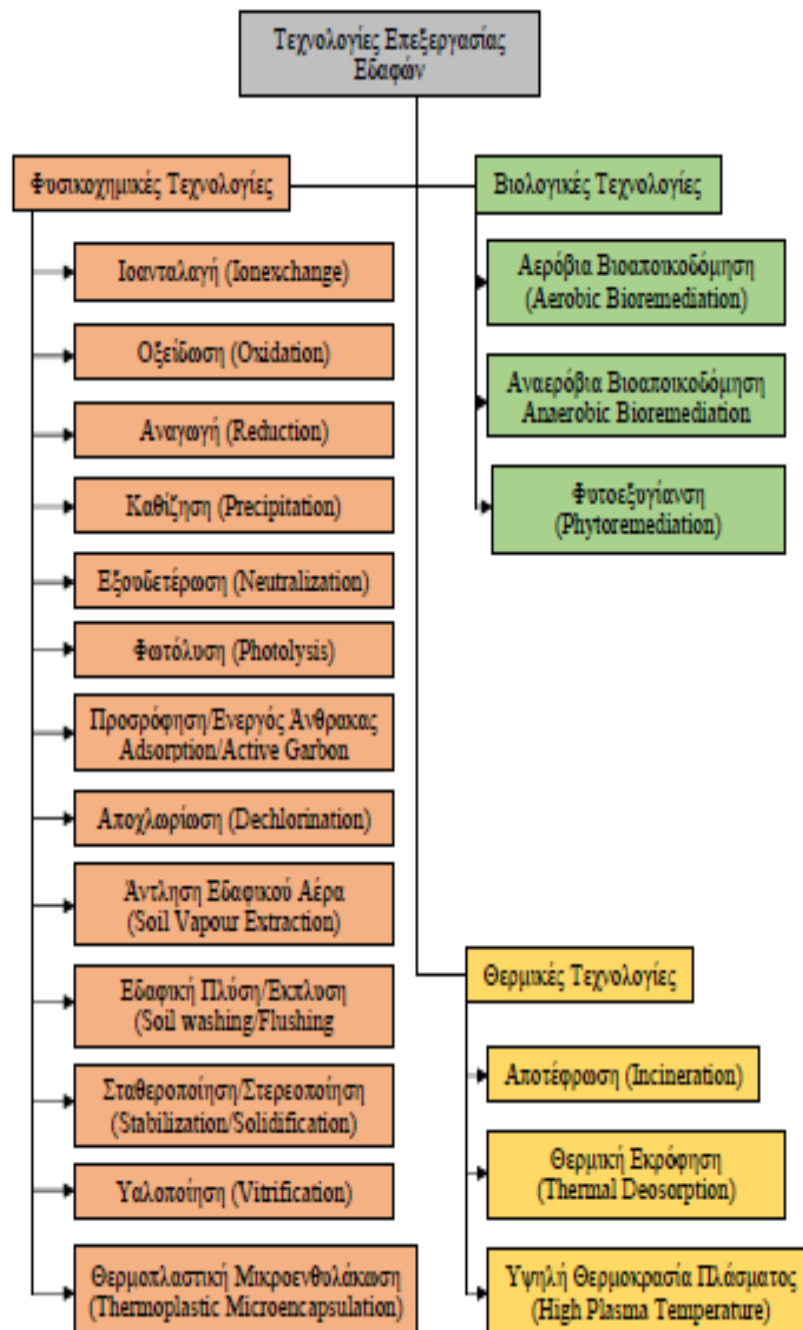
### **2.1 Διάκριση Τεχνολογιών Αποκατάστασης**

Οι τεχνολογίες αποκατάστασης ρυπασμένων εδαφών διακρίνονται λαμβάνοντας ως βάση κάποια κριτήρια. Ένας απλός τρόπος διάκρισης αποτελεί αν θέσουμε ως κριτήριο το είδος των μηχανισμών που περιλαμβάνει η κάθε τεχνολογία στην απομάκρυνση ρύπων. Οι μηχανισμοί είναι είτε φυσικοχημικοί είτε βιοτικοί. Λαμβάνοντας υπόψιν μας τον παραπάνω χαρακτηρισμό των μηχανισμών, οι τεχνολογίες αποκατάστασης μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες: στις φυσικοχημικές, στις βιολογικές και στις θερμικές τεχνολογίες (Akamolafe, Onwusiri, & Adokpa, 2019; EPA, 2015; Gong et al., 2018; Mirsal, 2004; Ευάγγελος Γιδάρκος, Αιβαλιώτη, Γιαννής, & Καλδέρης, 2009).

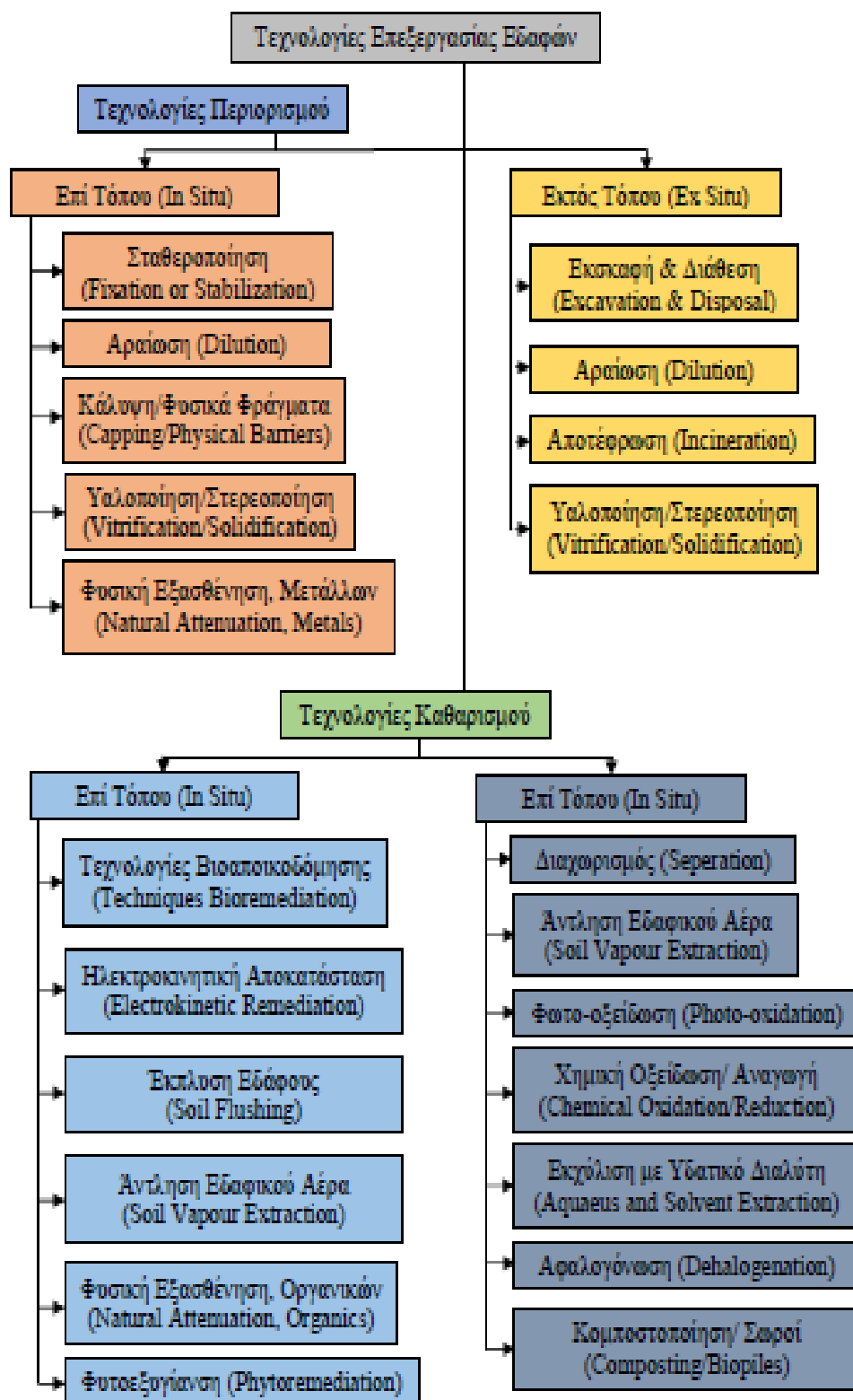
Μια άλλη διάκριση των τεχνολογιών μπορεί να γίνει με βάση το στόχο της εξυγίανσης, στις τεχνολογίες καθαρισμού και στις τεχνολογίες περιορισμού. Οι τεχνολογίες που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία (τεχνολογίες καθαρισμού) έχουν ως στόχο στη μέγιστη δυνατή μείωση της συνολικής συγκέντρωσης των ρύπων στο έδαφος δηλαδή στην απομάκρυνση των ρύπων, ενώ οι τεχνολογίες που ανήκουν στη 2η κατηγορία (τεχνολογίες περιορισμού) έχουν ως στόχο στη μέγιστη δυνατή μείωση της κινητικότητας των ρύπων δηλαδή στον περιορισμό της διάχυσης των ρύπων στο έδαφος (Lombi & Hamon, 2005).

Τέλος, μια άλλη διάκριση των τεχνολογιών αποκατάστασης μπορεί να γίνει ανάλογα με την περιοχή που εφαρμόζονται. Πιο συγκεκριμένα αν η επεξεργασία γίνεται στον ίδιο χώρο της μολυσμένης περιοχής έχουμε την επιτόπου (in situ) επεξεργασία, ενώ αν η επεξεργασία γίνεται σε άλλη περιοχή εκτός μολυσμένης περιοχής όπου απαιτείται η εκσκαφή και μεταφορά του μολυσμένου εδάφους έχουμε την εκτός τόπου (ex-situ) επεξεργασία. Η in situ αποκατάσταση αναφέρεται ως η επεξεργασία μολυσμένου εδάφους το οποίο παραμένει στην αρχική θέση του καθόλη τη διάρκεια της επεξεργασίας χωρίς να απαιτείται εκσκαφή και μεταφορά του, ενώ η ex situ το αντίθετο. Η χρήση in situ τεχνολογιών αποκατάστασης είναι αυτή που συνιστάται λόγω του χαμηλού κόστους και του μικρού κινδύνου διάχυσης της

ρύπανσης. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα τους σε σχέση με τις ex situ τεχνολογίες είναι ότι απαιτούν μεγαλύτερο χρόνο αποκατάστασης. Οι ex situ τεχνολογίες επεξεργασίας χαρακτηρίζονται από το υψηλότερο κόστος και ο κίνδυνος διάχυσης της ρύπανσης αυξάνεται λόγω της εκσκαφής και μεταφοράς του εδάφους. Αντίθετα, υπερέχουν στο ότι ο χρόνος αποκατάστασης είναι γρηγορότερος (Liu et al., 2018; Lombi & Hamon, 2005) (Wuana & Okieimen, 2014).



Εικόνα 2-1: Διάκριση τεχνολογιών με βάση τους μηχανισμούς τους.  
Πηγή: (Mittal, 2004)



Εικόνα 2-2: Διάκριση τεχνολογιών βάσει στόχου εξογίασης και περιοχής εφαρμογής.  
Πηγή: (Loubi & Hiron, 2005)

Η βιο-αποκατάσταση (bioremediation) των εδαφών (και των υδάτων) ανήκει στις βιολογικές μεθόδους απομάκρυνσης ρύπων μαζί με τη φυτοεξυγίανση.

Η βιο-αποκατάσταση είναι μία μέθοδος αποκατάστασης η οποία, με σωστή εφαρμογή, θεωρείται περιβαλλοντικά φιλική αλλά και οικονομικά συμφέρουσα. Εφαρμόζεται σε εδάφη και ιζήματα που είναι επιβαρημένα με οργανικούς ρύπους και επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση του κατεργασμένου συστήματος (εδάφους, ιζήματος) ελαττώνοντας συγχρόνως τις ποσότητες αυτών που διατίθενται για υγειονομική ταφή ενώ ταυτόχρονα έχει θετικά αποτελέσματα στην ολική βελτίωση του περιβάλλοντος και στην προστασία των έμβιων όντων που αυτό περιλαμβάνει.

Η εφαρμογή της συνήθως περιλαμβάνει καλό ανακάτεμα του εδάφους, αερισμό και προσθήκη λιπασμάτων αργής αποδέσμευσης (slow release fertilizers), ενώ η βασική αρχή της είναι η υποβοήθηση της αποικοδόμησης των οργανικών ενώσεων-ρύπων προς παραγωγή μη τοξικών ουσιών/CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O από μικροοργανισμούς που υπάρχουν στο έδαφος (γηγενής πανίδα) ή έχουν προστεθεί (μη γηγενής πανίδα), ενώ στην ενεργοποίηση αυτού του μηχανισμού βοηθούν ο αερισμός, ο οποίος επιτυγχάνεται με το ανακάτεμα του εδάφους αλλά και με μηχανικά μέσα, και η προσθήκη νερού και θρεπτικών στοιχείων. Οι περισσότερες μέθοδοι βιοαποκατάστασης στηρίζονται στη δράση των βακτηρίων, τα οποία αποτελούν απλούς μονοκύτταρους οργανισμούς με το τυπικό μέγεθός τους να είναι της τάξεως των 5μm και το βάρος τους περίπου 10 pg (Pope και Matthes, 1993).

Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί με δύο τρόπους

- Απομάκρυνση του ρυπασμένου συστήματος και καθαρισμό του σε άλλη περιοχή από την αρχική (ex situ-remove and treat)
- Εφαρμογή της μεθόδου στο σημείο που εντοπίζεται το πρόβλημα της ρύπανσης (in situ-treat in place).

Η μέθοδος είναι κατάλληλη για την επεξεργασία εδαφών/ιζημάτων ρυπασμένων από διάφορες οργανικές ουσίες, όπως :

- Πτητικές οργανικές ενώσεις
- Βενζόλιο, τολουόλιο, ξυλένιο
- Φαινολικές ενώσεις
- Απλούς πολυκυκλικούς υδρογονάνθρακες
- Υδρογονάνθρακες από την κατεργασία πετρελαίου
- Αρωματικές νιτροενώσεις, κ.α.

Αντίθετα η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί για (EPA, 2004):

- Βαρέα μέταλλα
- Πολυκυκλικούς αρωματικούς H/C με μεγάλο μοριακό βάρος
- Χλωριωμένους H/C

Πάντως, ειδικά για τα βαρέα μέταλλα, υπάρχουν αναφορές στη βιβλιογραφία για εφαρμογή της μεθόδου (Σκορδίλης και Κομνίτσας, 2004). Έτσι, τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται βιολογικές μέθοδοι και για τους ανόργανους ρύπους. Για ορισμένους μεταλλικούς ρύπους μπορεί να επιτευχθεί με την μικροβιακή δράση αλλαγή της οξειδωτικής τους βαθμίδας, η οποία είναι πολλές φορές καθοριστική για τις περιβαλλοντικές και τοξικές τους ιδιότητες. Για παράδειγμα το εξασθενές χρώμιο Cr(VI) παρουσιάζει σημαντικά υψηλότερη τοξικότητα και υψηλότερη διαλυτότητα στο νερό σε σύγκριση με το τρισθενές χρώμιο Cr(III). Η μετατροπή του Cr(VI) σε Cr(III) με βιολογική επεξεργασία αποτελεί μια μέθοδο «σταθεροποίησης» του ρύπου, η οποία μπορεί να μειώσει ουσιαστικά τους περιβαλλοντικούς κινδύνους.

Όποια από τις δύο μεθόδους βιο-αποκατάστασης πρόκειται να χρησιμοποιηθεί πρέπει να ακολουθηθούν τα παρακάτω τρία στάδια:

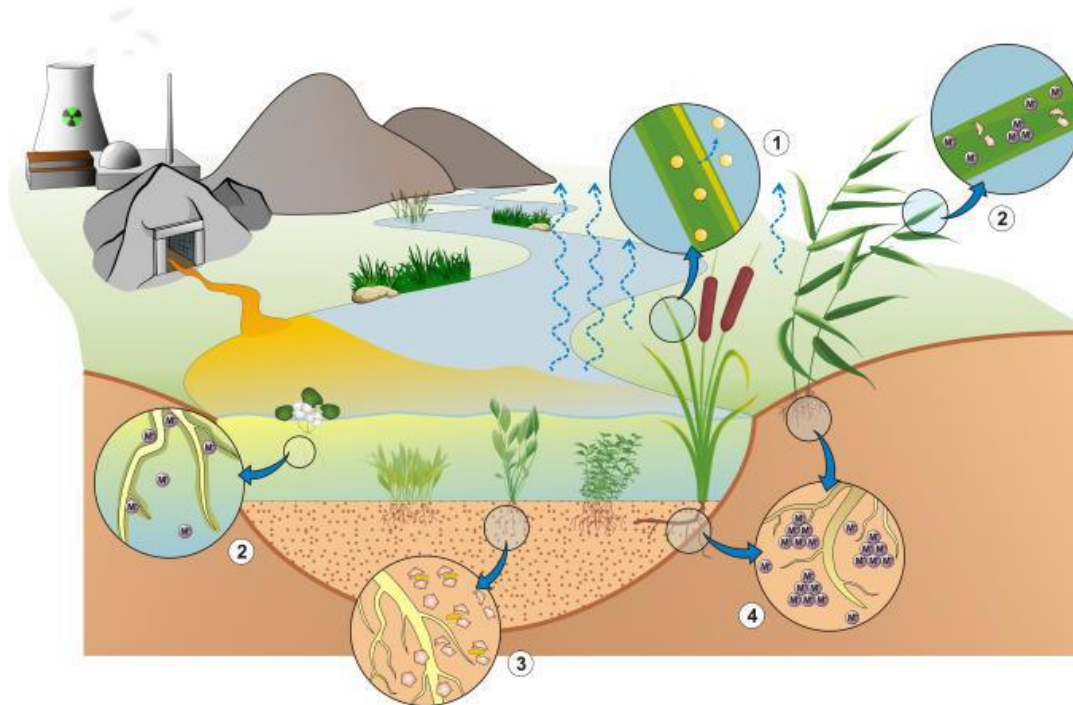
1. Εργαστηριακές δοκιμές με σκοπό να προσδιοριστεί ο βαθμός βιο-αποδόμησης των ενώσεων-στόχων από τους ενδογενείς μικροοργανισμούς ή από άλλους τεχνητά προστιθέμενους
2. Πιλοτική εφαρμογή της μεθόδου (μικρή κλίμακα) είτε στο εργαστήριο, είτε στην προς αποκατάσταση περιοχή με σκοπό να συλλεγούν περισσότερα απαραίτητα στοιχεία για το σχεδιασμό της εφαρμογής της μεθόδου σε μεγάλη κλίμακα.
3. Εφαρμογή της μεθόδου στην προς αποκατάσταση περιοχή ή σε άλλο καθορισμένο και ελεγχόμενο χώρο.

Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί ότι όταν πρόκειται να εφαρμοστεί μέθοδος αποκατάστασης σε οποιοδήποτε χώρο θα πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη κατασκευής εγκαταστάσεων για την αποφυγή περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη διάρκεια των εργασιών.

## **2.2 Βιολογικές Τεχνολογίες**

### **2.2.1 Φυσική Εξασθένηση (Natural Attenuation, in situ)**

Η τεχνική της φυσικής εξασθένησης (natural attenuation) βασίζεται σε φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες του εδάφους (π.χ. βιοαποικοδόμηση, προσρόφηση, εξάτμιση, διασπορά, υδρόλυση, μετασχηματισμό, σταθεροποίηση, καθίζηση, κατακρήμνιση κτλ) των αυτόχθονων μικροοργανισμών και φυτών που υπάρχουν είδη στο έδαφος ή στην επιφάνειά του αντίστοιχα, φυσικά χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση που μειώνουν τη συγκέντρωση και κινητικότητα των ρύπων στο ρυπασμένο από ρύπους έδαφος (EPA, 2017; H. I. Gomes, Dias-Ferreira, & Ribeiro, 2013). Εφαρμόζεται για την απομάκρυνση τόσο οργανικών όσο και ανόργανων ρύπων που υποβαθμίζονται εύκολα και δεν αποτελούν σοβαρό κίνδυνο για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία. Δεν είναι κατάλληλη για εφαρμογή σε περιπτώσεις που η συγκέντρωση ρύπων είναι σε υψηλά επίπεδα και ο ρυθμός της εξασθένησής τους είναι υπερβολικά πάρα πολύ αργός (Yeung, 2011). Οι παραπάνω φυσικοχημικές/βιολογικές διεργασίες θα πρέπει να παρακολουθούνται σε τακτά διαστήματα ώστε να ελέγχεται πως ο ρυθμός της εξασθένησης των ρύπων επιτυγχάνεται σε ικανοποιητικά επίπεδα και δεν υπάρχει περεταίρω κίνδυνος εξάπλωσής τους στο έδαφος και στα υπόγεια ύδατα (Surampalli, Ong, Seagren, & Nuno, 2004). Το κύριο πλεονέκτημα της φυσικής εξασθένησης είναι το πολύ χαμηλό κόστος λόγω της μη ανθρώπινης παρέμβασης, ενώ τα κύρια μειονέκτημά της είναι ο χρόνος που χρειάζεται (είναι αργή διαδικασία από τη φύση της) και η πιθανότητα κινδύνου ότι οι φυσικές διεργασίες μπορεί να μετατοπίσουν τη ρύπανση σε άλλες θέσεις (Chaudhary & Kim, 2019; F. I. Khan, Husain, & Hejazi, 2004; Maletić et al., 2019; Raju & Scalvenzi, 2018).



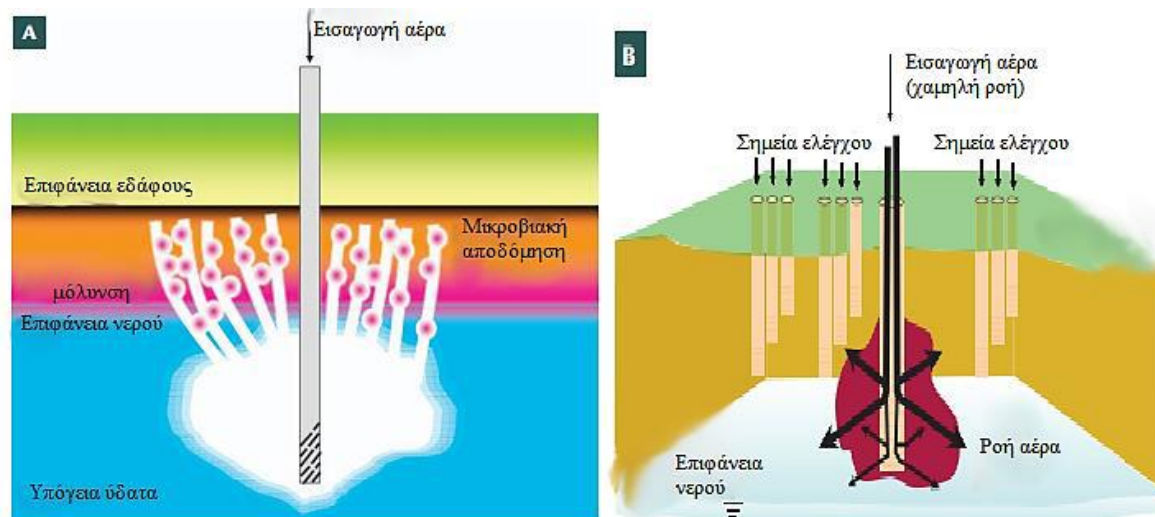
**Εικόνα 2-3: Μηχανισμοί φυσικής εξασθένισης. (1) εξάτμιση, (2) ενσωμάτωση στη βιομάζα (3) υποβάθμιση (4) σταθεροποίηση.** Πηγή: (Favas, Pratas, Paul, & Prasad, 2019).

### 2.2.2 Βιοαερισμός και Βιοδιασπορά (Bioventing and Biosparging, in situ)

Ο βιοαερισμός (bioventing) είναι μια *in situ* τεχνολογία επεξεργασίας μολυσμένων εδαφών που βασίζεται στην εισαγωγή αέρα στην κορεσμένη ζώνη του εδάφους, ώστε να διεγείρει και να αυξήσει την κινητικότητα των μικροοργανισμών που βρίσκονται επί του εδάφους για την αποικοδόμηση ρύπων. Κατά τη διαδικασία, εισάγεται αέρας μέσω ειδικών φρεατίων έγχυσης με σχετικά μικρό ρυθμό ροής, ώστε να επιτυγχάνεται μια ομοιόμορφη κατανομή του αέρα στο έδαφος αλλά και για την αποφυγή απελευθέρωσης πτητικών ρύπων στην ατμόσφαιρα. Ο αέρας παρέχει οξυγόνο στους οργανισμούς που είναι απαραίτητο για το μετασχηματισμό των ρύπων σε απλούστερες αβλαβής μικρότερες ενώσεις. Σε περιπτώσεις που κρίνεται αναγκαίο γίνεται και εισαγωγή θρεπτικών συστατικών (π.χ. φωσφόρου, αζώτου) και υγρασίας για την ενίσχυση της βιοαποικοδόμησης. Ο βιοαερισμός μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο τεχνικές στον ενεργό και τον παθητικό βιοαερισμό. Στον ενεργό βιοαερισμό, η εισαγωγή του αέρα στο έδαφος γίνεται με τη βοήθεια φυσητήρα ή αντλιών, ενώ στον παθητικό η εισαγωγή του αέρα γίνεται μέσω φρεατίων υπό την επίδραση της ατμοσφαιρικής πίεσης (Azubuike, Chikere, & Okrokwasili, 2016; Chaudhary & Kim, 2019; Zouboulis & Moussas, 2011).

Η βιοδιασπορά (biosparging) είναι μια παρόμοια τεχνολογία με τον βιοαερισμό με βασική τους διαφορά ότι ο αέρας εισάγεται υπο πίεση στα υπόγεια ύδατα και η βιοαποικοδόμηση των ρύπων γίνεται εντός κορεσμένης ζώνης, ενώ στον βιοαερισμό ο αέρας εισάγεται με ελεγχόμενη χαμηλή ροή στο έδαφος πάνω από την επιφάνεια του υπόγειου νερού και η βιοαποικοδόμηση γίνεται εντός της ακόρεστη ζώνης (Antizar-Ladislao, 2010).

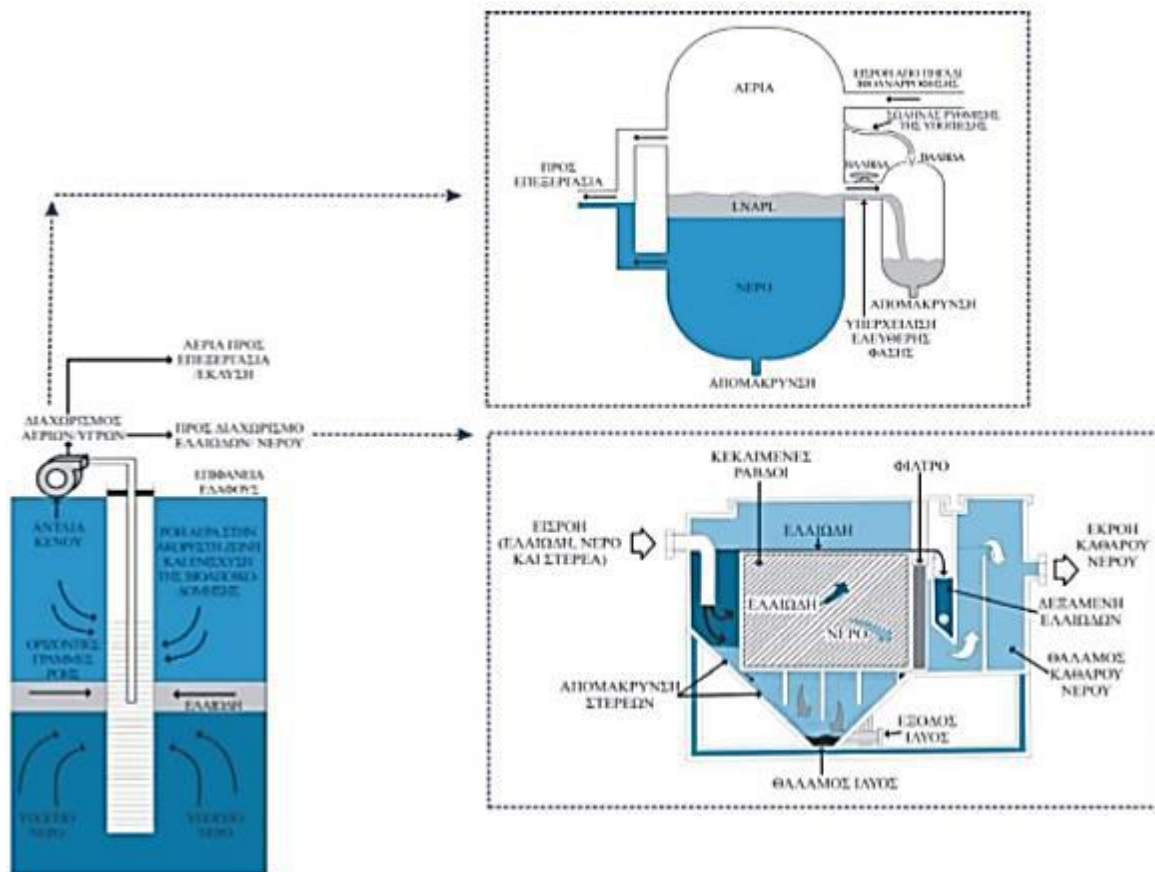




**Εικόνα 2-4: Σχηματική απεικόνιση (A) βιοδιασποράς και (B) βιοαερισμού.** Πηγή: (Antizar-Ladislao, 2010).

### 2.2.3 Βιοαναρρόφηση (Bioslurping, in situ)

Η βιοαναρρόφηση (bioslurping) περιλαμβάνει ένα συνδυασμό διεργασιών των τεχνολογιών της άντλησης υπό κενό (vacuum encanced pumping), της άντλησης εδαφικού αέρα (soil vapor extraction) και του βιοαερισμού (bioventing), επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα την αποκατάσταση μολυσμένου εδάφους και των υπογείων υδάτων με έμμεση παροχή οξυγόνου και διέγερση των μικροοργανισμών για τη βιοαποικοδόμηση των ρύπων. Η τεχνική αυτή έχει σχεδιαστεί κυρίως για απομάκρυνση υγρών ρύπων που βρίσκονται σε υπόγεια ύδατα, όπως είναι το πετρέλαιο και η βενζίνη (π.χ. LNAPs), ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για απομάκρυνση πτητικών ή ημιπτητικών οργανικών ρύπων του εδάφους. Τα LNAPs λόγω της μικρότερης πυκνότητάς τους από το νερό δε βυθίζονται, αναδύονται και εξαπλώνονται στην επιφάνεια του νερού, όπως τα έλαια. Για την απομάκρυνση τους χρησιμοποιείται ένα μηχανικό σύστημα συλλογής που αντλεί τους ρύπους από την επιφάνεια του νερού μαζί με αέρια του εδάφους. Η άντληση του εδαφικού αέρα προκαλεί την κίνηση και μεταφορά των LNAPs προς την επιφάνεια όπου στη συνέχεια διαχωρίζονται από το νερό και τον αέρα. Μετά την απομάκρυνσή τους, η διαδικασία λειτουργεί όπως ένα σύστημα βιολογικού καθαρισμού (Azubuike et al., 2016; Gidarakos & Aivalioti, 2007; F. I. Khan et al., 2004; Raju & Scalvenzi, 2018).

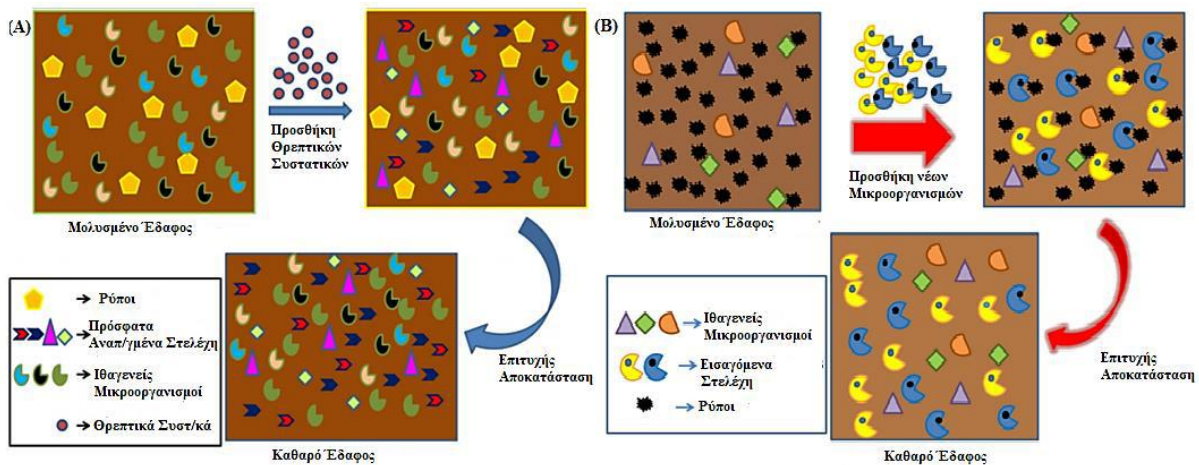


Εικόνα 2-5: Τμήματα ενός τυπικού συστήματος βιοαναρρόφησης. Πηγή: (Gidarakos & Aivalioti, 2007).

**2.2.4 Βιοδιέργηση και Βιοενίσχυση (Biostimulation and Bioaugmentation, in situ)**

Η αποτελεσματική βιοαποικοδόμηση των ρύπων είναι μια συνάρτηση του πληθυσμού των αυτόχθονων μικροοργανισμών του εδάφους και ορισμένων παραγόντων που έχουν να κάνουν με την επάρκεια θρεπτικών συστατικών, την περιεκτικότητα υγρασίας, το pH, τη συγκέντρωση του οξυγόνου και τη θερμοκρασία. Η ανάπτυξη των αυτόχθονων μικροοργανισμών εξαρτάται από τους παραπάνω παράγοντες. Όταν αυτοί οι παράγοντες δεν είναι στα επιθυμητά επίπεδα, μειώνεται αντίστοιχα η μεταβολική δραστηριότητα των μικροοργανισμών του εδάφους και η βιοαποικοδόμηση των ρύπων του εδάφους είναι ανεπαρκής. Εδώ παίρνει μέρος η τεχνολογία της βιοδιέγερσης (biostimulation). Η βιοδιέγερση είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει την προσθήκη θρεπτικών συστατικών αλλά και υγρασίας με σκοπό να ενισχύσει την ανάπτυξη και μεταβολική δραστηριότητα των ήδη υπάρχοντων αυτόχθονων μικροοργανισμών. Τα θρεπτικά συστατικά προστίθενται συνήθως μέσω λιπασμάτων. Η προσθήκη τους θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ότι θα είναι διαθέσιμα για τους μικροοργανισμούς με αναλογία άνθρακα (C), αζώτου (N) και φωσφόρου (P) στα 120: 10: 1, καθώς αυτή η αναλογία είναι απαραίτητη για τις βασικές βιολογικές διεργασίες μικροοργανισμών. Μετά τη διαδικασία της βιοδιέγερσης ακολουθεί συνήθως η βιοενίσχυση του εδάφους (Vineet Kumar, Shahi, & Singh, 2018). Η βιοενίσχυση (bioaugmentation) του εδάφους είναι μια τεχνολογία που περιλαμβάνει τη διαδικασία προσθήκης ιθαγενών ή εξωγενών ή γενετικά τροποποιημένων μικροοργανισμών και είναι αναγκαία όταν ο πληθυσμός των ήδη υπάρχοντων αυτόχθονων μικροοργανισμών

στο έδαφος είναι μικρός και ανεπαρκής για τη βιοαποικοδόμηση ρύπων του εδάφους (Abdulsalam & Omale, 2009; Chaudhary & Kim, 2019).

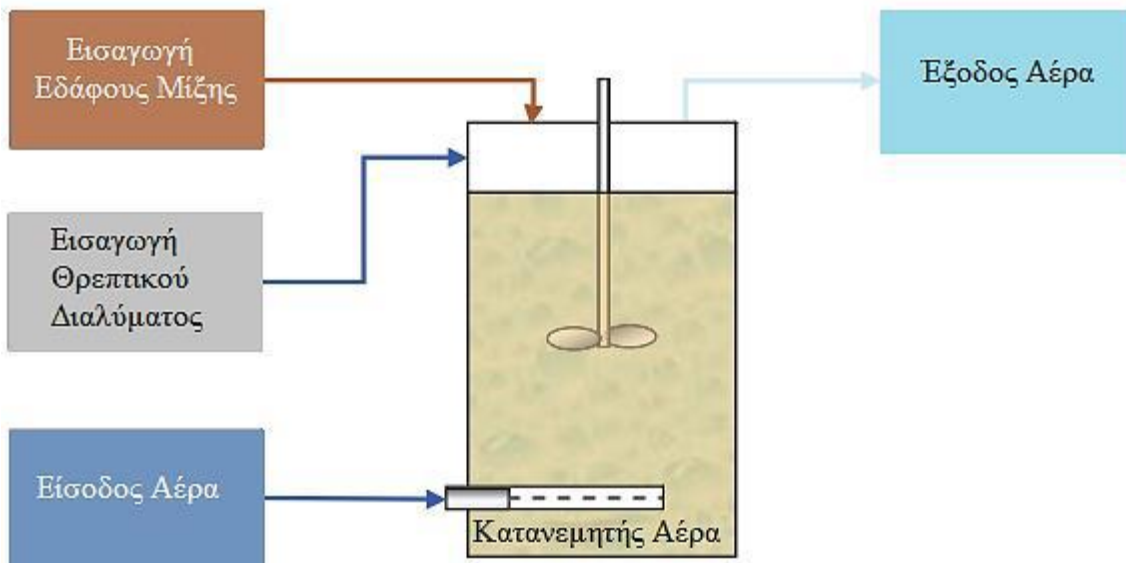


**Εικόνα 2-6: (Α) Διαδικασία βιοδιέγερσης, (Β) Διαδικασία βιοενίσχυσης.** Πηγή: (Goswami et al., 2018).

### 2.2.5 Βιοαντιδραστήρες (Bioreactors, ex situ)

Οι βιοαντιδραστήρες (bioreactors) αποτελούν μια *ex situ* τεχνολογία, η οποία έχει παρόμοια λειτουργία επεξεργασίας του εδάφους με αυτή της αγροκαλλιέργειας με τη διαφορά όμως ότι οι βιοαντιδραστήρες αποτελούν ένα κλειστό πλήρως ελεγχόμενο σύστημα στο οποίο υπάρχει η δυνατότητα να ελεγχθούν όλες εκείνες οι σημαντικές παράμετροι (pH, θερμοκρασία, υγρασία, οξυγόνο) που επηρεάζουν τη βιοαποικοδόμηση των ρύπων. Οι βιοαντιδραστήρες επιλέγονται για αποκατάσταση του εδάφους όταν δεν υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες για χρήση άλλων συμβατικών μεθόδων και όταν απαιτείται γρήγορη και ασφαλής αποκατάσταση του εδάφους (Pino-Herrera et al., 2017). Ένα ολοκληρωμένο σύστημα με βιοαντιδραστήρα μπορούμε να το χαρακτηρίσουμε ότι έχει τη μορφή μιας μεγάλης δεξαμενής, η οποία είναι εξοπλισμένη με ένα σύστημα ανάμιξης των υλικών, ένα σύστημα τροφοδοσίας αερισμού, ένα σύστημα θρεπτικών συστατικών και από μια συνδυασμένη αλληλουχία αντλιών εισροής και εκροής. Το σύστημα αυτό μπορεί και λειτουργεί κάτω υπό αερόβιες ή αναερόβιες συνθήκες και με διαφορετικούς τρόπους τροφοδοσίας των υλικών όπως συνεχούς ροής, κατά παρτίδες και ημικυκλικά. Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλοί διαφορετικοί τύποι βιοαντιδραστήρων, ωστόσο, εκείνοι που παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι οι βιοαντιδραστήρες τριών φάσεων (Slurry bioreactors) και οι βιοαντιδραστήρες φάσης ατμού (Vapour phase bioreactors) (Morillo & Villaverde, 2017; Zouboulis & Moussas, 2011).

Κατά τη διαδικασία επεξεργασίας του εδάφους με χρήση βιοαντιδραστήρα, το μολυσμένο έδαφος από ρύπους αρχικά θα πρέπει να υποστεί προεπεξεργασία και να καθαριστεί από τα ενδεχόμενα υλικά (π.χ. μεγάλες πέτρες, ξύλα, μέταλλα, πλαστικά) που υπάρχουν και παρεμποδίζουν τη διαδικασία της επεξεργασίας του. Στη συνέχεια το έδαφος αναμειγνύεται με νερό ή άλλα οργανικά υλικά (π.χ. λύματα, αγροτικά υπολείμματα κτλ, ιλύς λυμάτων), ώστε να δημιουργηθεί ένα πλούσιο μείγμα, το οποίο θα πρέπει να περιέχει εκείνα τα ευνοϊκά χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την ανάπτυξη του κατάλληλου πληθυσμού μικροοργανισμών. Εν συνέχεια, το σύστημα τροφοδοτείται με το μείγμα αυτό και μετά την επεξεργασία του, προκύπτει ένα πλέον καθαρό έδαφος από ρυπογόνες ουσίες (Chaudhary & Kim, 2019; Robles-González, Fava, & Poggi-Varaldo, 2008).

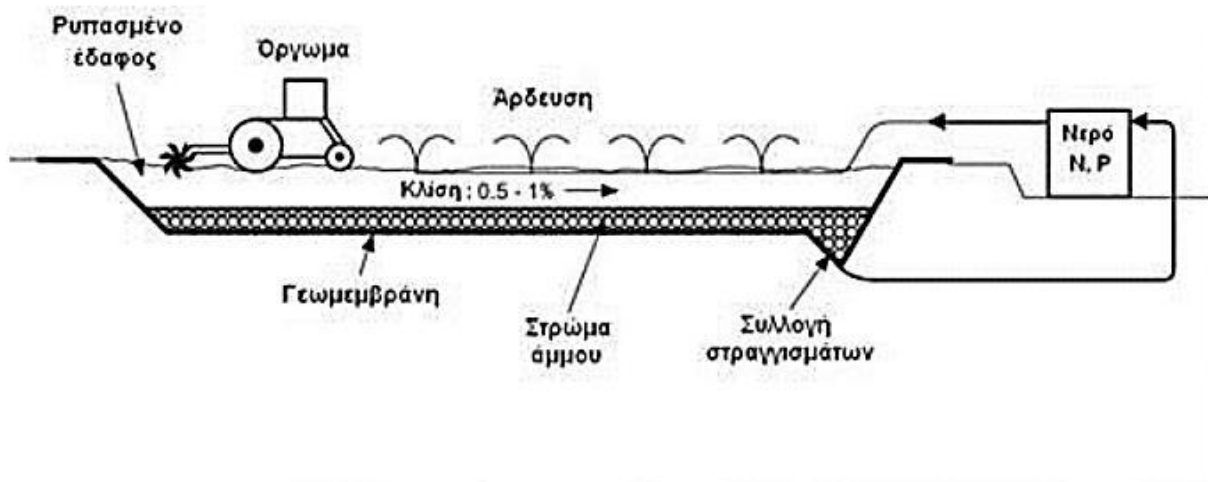


Εικόνα 2-7: Τυπική διάταξη βιοαντιδραστήρα. Πηγή: (Iaea, 2006).

### 2.2.6 Αγροκαλλιέργεια (Landfarming, in situ or ex situ)

Η αγροκαλλιέργεια (landfarming) αποτελεί μια βιολογική τεχνολογία αποκατάστασης των μολυσμένων εδαφών. Ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για αποκατάσταση μολυσμένων ιζημάτων και της ιλύος των λυμάτων (Vineet Kumar et al., 2018). Βασική αρχή της τεχνολογίας είναι η ανασκαφή και η τοποθέτηση του εδάφους σε μια μεγάλη επιφάνεια δημιουργώντας ένα λεπτό στρώμα πάχους λίγων εκατοστών (20-60 cm), όπου κάτω από αυτό τοποθετείται ένα σύστημα στεγανοποίησης (π.χ. γεωμεμβράνη) για να ελαχιστοποιηθεί η μεταφορά ρύπων στο έδαφος και στα υπόγεια ύδατα. Το έδαφος θα πρέπει να αναμιγνύεται σε τακτικά χρονικά διαστήματα, ώστε να αυξηθεί ο αερισμός και να αναπτυχθούν εκείνες οι συνθήκες που ευνοούν την ανάπτυξη του πληθυσμού κατάλληλων μικροοργανισμών (Meuser, 2013).

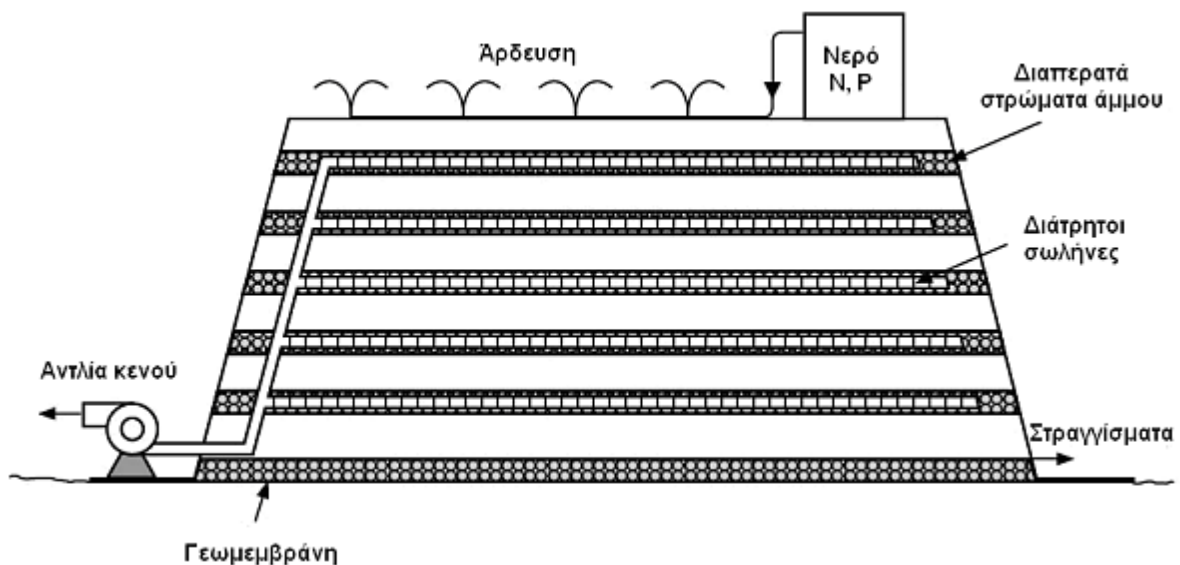
Ένα σύστημα αγροκαλλιέργειας περιλαμβάνει συνήθως κάποιο σύστημα αποστράγγισης ή συλλογής στραγγισμάτων και κάποιο σύστημα εισαγωγής υγρασίας. Όταν είναι απαραίτητο προστίθενται και θρεπτικά συστατικά χρησιμοποιώντας οργανικά και ανόργανα λιπάσματα. Η έλλειψη της κατάλληλης ποσότητας θρεπτικών συστατικών, υγρασίας και οξυγόνου μπορεί να οδηγήσει στην επιβράδυνση της βιοαποικοδόμησης των ρυπογόνων ουσιών του μολυσμένου εδάφους από τους μικροοργανισμούς (Abdulsalam & Omale, 2009; Chaudhary & Kim, 2019; EPA, 1994, 2014; Kulshreshtha, Agrawal, Barar, & Saxena, 2014; Lukić et al., 2017; Morillo & Villaverde, 2017; Zouboulis & Moussas, 2011). Η αγροκαλλιέργεια είναι μια απλή λειτουργικά και σχετικά φθηνή μέθοδος που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση συνήθως εύκολα βιοαποικοδομήσιμων οργανικών ρύπων που βρίσκονται σε χαμηλές συγκεντρώσεις στο έδαφος (Dzionek, Wojcieszynska, & Guzik, 2016). Έχει τη μορφή in situ τεχνολογίας όταν τα μολυσμένα εδάφη από ρύπους είναι ρηχά (<1m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους). Εάν τα μολυσμένα εδάφη βρίσκονται σε μεγαλύτερο βάθος από τα 1,7m από την επιφάνεια του εδάφους, θα πρέπει να ανασκαφθούν και να μεταφερθούν σε κάποια άλλη κατάλληλη τοποθεσία για επεξεργασία (ex situ) (EPA, 2014; King, Long, & Sheldon, 1998; Lukić et al., 2017; Maila & Cloete, 2004; Nikolopoulou, Pasadakis, Norf, & Kalogerakis, 2013; Raju & Scalvenzi, 2018).



Εικόνα 2-8: Τυπική λειτουργία αγροκαλλιέργειας. Πηγή: (King et al., 1998).

### 2.2.7 Επεξεργασία σε Σωρούς (Biopiles, ex situ)

Η επεξεργασία σε σωρούς (biopiles) είναι μια τεχνολογία αποκατάστασης *ex situ*, η οποία περιλαμβάνει αρχικά την ανάμιξη του μολυσμένου εδάφους με άλλα οργανικά υλικά και την τοποθέτησή τους σε διαδοχικούς σωρούς στην επιφάνεια του εδάφους. Ένας σωρός μπορεί να φτάσει σε ύψος από 3 έως 4m έχοντας όγκο αρκετών εκατοντάδων m<sup>3</sup>. Συνήθως σε μια τέτοια εγκατάσταση επεξεργασίας περιλαμβάνεται κάποιο σύστημα συλλογής στραγγισμάτων, ένα σύστημα αερισμού, ένα σύστημα παροχής υγρασίας ή και ένα σύστημα εισαγωγής θρεπτικών συστατικών. Ο αερισμός των σωρών του εδάφους γίνεται μέσα από ειδικές σωλήνες αερισμού οι οποίες μπορεί να είναι τοποθετημένες είτε κάτω από την επιφάνεια του σωρού ή μέσα στο εσωτερικό του. Η αναμόχλευση του σωρού γίνεται με μηχανικά μέσα, η οποία θα πρέπει να εφαρμόζεται σε τακτά χρονικά διαστήματα ώστε να δημιουργούνται οι βέλτιστες συνθήκες παροχής αέρα (οξυγόνου), θερμοκρασίας και υγρασίας που είναι απαραίτητα στοιχεία για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών και της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας. Επίσης, συχνά προστίθενται και αυξητικοί παράγοντες όπως πριονίδι και άχυρα στοχεύοντας στην παροχή δομικής στήριξης και αύξησης του πορώδους της μήτρας του εδάφους. Για να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη αναλογία άνθρακα, αζώτου χρησιμοποιούνται λιπάσματα (Azubuike et al., 2016; Fingas, Brown, Cologgi, Gee, & Ulrich, 2017; Vineet Kumar et al., 2018; Morillo & Villaverde, 2017; Βλυσίδης, Γρηγοροπούλου, & Λυμπεράτος, 2019).



Εικόνα 2-9: Τυπικό σύστημα επεξεργασίας σε σωρούς. Πηγή: (King et al., 1998).

### 2.2.8 Κομποστοποίηση (Composting, ex situ)

Η κομποστοποίηση (composting) είναι μια βιολογική διαδικασία η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για τη βιοαποικοδόμηση των στερεών αστικών, γεωργοκτηνοτροφικών αποβλήτων και της ιλύς των λυμάτων, αποσκοπώντας στη μείωση του όγκου και της υγρασίας των αποβλήτων, την καταστροφή των οσμών και παθογόνων παραγόντων που περιέχουν και τη σταθεροποίησή τους για τελική διάθεση ή χρήση ως ένα εμπορεύσιμο προϊόν (πχ compost). Η εφαρμογή της κομποστοποίησης ως μια τεχνική επεξεργασίας μολυσμένων εδαφών από ρυπογόνες ουσίες είναι μια πιο πρόσφατη έννοια που έχει ως σκοπό τη μετατροπή των ρυπογόνων ουσιών σε λιγότερο επικίνδυνες ενώσεις. Η διαδικασία της κομποστοποίησης σε επικίνδυνα υλικά όπως το μολυσμένο έδαφος σε σχέση με την κομποστοποίηση αστικών και γεωργικών αποβλήτων διαφέρει στο χρόνο επεξεργασίας που απαιτείται για την καταστροφή μολυσματικών ουσιών. Γενικά, η διαδικασία κομποστοποίησης σε επικινδυνά υλικά μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια εφαρμογή πιο ελεγχόμενης και επιθετικής προσέγγισης (Williams & Myler, 1990).

Η κομποστοποίηση μολυσμένου εδάφους περιλαμβάνει σε αρχικό στάδιο την ανάμιξή του με άλλα στερεά απόβλητα που είναι κατάλληλα για κομποστοποίηση (πχ κοπριές ζώων, ιλύς λυμάτων κτλ) ώστε να βελτιωθεί η ανάπτυξη των μικροοργανισμών όπως μύκητες, βακτήρια, γαιοσκώληκες κτλ. Η διαδικασία διεξάγεται υπό αερόβιες συνθήκες και εκμεταλλεύεται τη θερμότητα που παράγεται κατά την διάρκεια των οξειδωτικών εξωθερμικών αντιδράσεων της βιοδιάσπασης προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας περίπου στους 50 με 60 °C. Απαιτείται τακτική ανάμιξη ώστε να επιτευχθούν οι κατάλληλες συνθήκες ανάπτυξης μικροοργανισμών (Concetta Tomei & Daugulis, 2013; Morillo & Villaverde, 2017; Zouboulis & Moussas, 2011).

Η αποτελεσματικότητα της αποικοδόμησης ρύπων επιτυγχάνεται μέσα από τον έλεγχο των παρακάτω παραγόντων.

**Θερμοκρασία :** Πρέπει να διατηρείται επαρκής αερισμός και υγρασία για να εξασφαλιστεί ότι οι θερμοκρασίες φθάνουν στους 60 °C, ώστε να αδρανοποιηθούν τα μικροβιακά παθογόνα.

**Αερισμός :** Ο αέρας πρέπει να παρέχεται μέσω ανεμιστήρων ή με περιστροφή.

**Υγρασία :** Οι συνθήκες δεν πρέπει να είναι ούτε πολύ υγρές, που να προωθούν την αναερόβια δραστηριότητα, ούτε πολύ ξηρές γιατί περιορίζεται η μικροβιακή δραστηριότητα.

Ο λόγος C: N : Η αναλογία C: N του υποστρώματος θα πρέπει να διατηρείται γύρω στο 25: 1, ώστε να εξασφαλιστούν επαρκείς αλλά όχι υπερβολικές ποσότητες αζώτου για τα μικρόβια. *Παράγοντας διογκώσεως* : Το μετασχηματισμένο υλικό πρέπει να χρησιμοποιείται για αύξηση της επιφάνειας του υποστρώματος για μικροβιακό μεταβολισμό (Gerba & Pepper, 2015).

### 2.3 Αρχή της μεθόδου βιο-αποκατάστασης. Βασικός μικροβιακός μεταβολισμός

Η διάσπαση των οργανικών ενώσεων πραγματοποιείται από τους μικροοργανισμούς οι οποίοι τις χρησιμοποιήσουν για τη δική τους επιβίωση και ανάπτυξη. Σε ένα μικροβιακό κύτταρο λαμβάνουν χώρα δύο βασικές κατηγορίες μεταβολικών δράσεων, ο αναβολισμός και ο καταβολισμός.

Στις αναβολικές αντιδράσεις πραγματοποιείται παραγωγή βιομάζας, δηλ. ανάπτυξη του μικροοργανισμού, και απαιτούν την ύπαρξη πηγής άνθρακα, ενώ στις καταβολικές αντιδράσεις παράγεται ενέργεια, απαραίτητη για τη διατήρηση και ανάπτυξη των οργανισμών, απαιτούν δηλαδή μια πηγή ενέργειας.

Οι οργανικοί ρύποι χρησιμοποιούνται από τους μικροοργανισμούς σαν πηγή άνθρακα και σαν πηγή ενέργειας ταυτόχρονα. Τα μικρόβια εξασφαλίζουν ενέργεια από τους ρύπους μέσω της οξειδωσής αυτών. Πραγματοποιείται έτσι μία οξειδοαναγωγική αντίδραση, στην οποία ο ρύπος είναι το αναγωγικό σώμα το δε ρόλο του οξειδωτικού έχουν διάφορες ενώσεις, ανάλογα με τον τύπο της διαδικασίας του μεταβολισμού:

Αερόβια αναπνοή είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το μεταβολισμό όταν δέκτης ηλεκτρονίων είναι το οξυγόνο (O<sub>2</sub>). Πολυάριθμοι μικροοργανισμοί ακολουθούν αυτό το είδος μεταβολισμού και οι περισσότερες μέθοδοι βιοαποκατάστασης αξιοποιούν αυτή τη συγκεκριμένη κατηγορία μεταβολισμού. Υπάρχει εντούτοις μια μεγάλη ποικιλία μικροοργανισμών που επιβιώνουν και αναπτύσσονται κάτω από αναερόβιες συνθήκες χρησιμοποιώντας σαν δέκτη ηλεκτρονίων διάφορες άλλες ανόργανες ή οργανικές ενώσεις διαφορετικές από το οξυγόνο. Αυτός ο τύπος μεταβολισμού χαρακτηρίζεται σαν αναερόβια αναπνοή. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι δέκτες ηλεκτρονίων κάτω από αναερόβιες συνθήκες είναι τα νιτρικά και τα θειικά ιόντα, διαλυτά συστατικά στα υπόγεια νερά, καθώς και ο τρισθενής σίδηρος, και το τετρασθενές μαγγάνιο, που αποτελούν συστατικά των στερεών σωματιδίων του εδάφους συνήθως στη μορφή οξειδίων. Ένας άλλος τύπος μεταβολισμού που μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο σε ισχυρά αναερόβιες συνθήκες είναι η ζύμωση. Κατά τη ζύμωση δεν απαιτείται εξωτερική προσθήκη ενός δέκτη ηλεκτρονίων, διότι ο οργανικός ρύπος χρησιμοποιείται ταυτόχρονα σαν δότης και σαν δέκτης ηλεκτρονίων.

Τυπικές αντιδράσεις βιοαποδόμησης με χρήση διαφορετικών δεκτών ηλεκτρονίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 για την απλή περίπτωση του βενζολίου. Όπως φαίνεται στον Πίνακα, το είδος του δέκτη ηλεκτρονίων που χρησιμοποιείται σχετίζεται άμεσα με το οξειδοαναγωγικό δυναμικό που επικρατεί στη συγκεκριμένη ζώνη. Κάτω από αερόβιες συνθήκες, όταν το οξειδοαναγωγικό δυναμικό είναι της τάξης των 200-220 mV, η βιοαποδόμηση λαμβάνει χώρα κυρίως με αερόβιους μικροοργανισμούς. Όταν το οξυγόνο εξαντλείται αλλά το οξειδοαναγωγικό δυναμικό παραμένει σχετικά υψηλό, η βιοδιάσπαση μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της μεταβολικής δραστηριότητας νιτροαναγωγικών βακτηρίων. Τα οξείδια του σιδήρου του εδάφους μπορούν να δράσουν σαν δέκτες ηλεκτρονίων σε μια ευρεία κλίμακα τιμών οξειδοαναγωγικού δυναμικού, αλλά έχουν σχετικά περιορισμένη βιοδιαθεσιμότητα ανάλογα με την κρυσταλλικότητά τους. Τέλος τα θειοαναγωγικά και τα μεθανογόνα βακτήρια είναι δραστικά μόνον κάτω από έντονα αναγωγικές συνθήκες (Kuo, 1999).

**Πίνακας 1** Τυπικές αντιδράσεις βιοαποδόμησης του βενζολίου με χρήση διαφορετικών δεκτών ηλεκτρονίων ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες οξειδοαναγωγικού δυναμικού (Kuo, 1999).

Ενδεικτικές τιμές Οξειδοαναγωγικού Δυναμικού, Eh.	Δέκτες ηλεκτρονίων	Αντιδράσεις Βιοαποδόμησης
> +200mV	O <sub>2</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> + 7,5O <sub>2</sub> → 6CO <sub>2</sub> + 3H <sub>2</sub> O
< +200mV	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> + 6NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 6H <sup>+</sup> → 6CO <sub>2</sub> + 3N <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O
< 0 mV	Fe(III)	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> + 30Fe <sup>3+</sup> + 12H <sub>2</sub> O → 6CO <sub>2</sub> + 30Fe <sup>2+</sup> + 30H <sup>+</sup>
< -100 mV	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> + 3,75SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + 7,5H <sup>+</sup> → 6CO <sub>2</sub> + 3,75H <sub>2</sub> S + 3H <sub>2</sub> O
< -200 mV	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> + 12H <sub>2</sub> O → 2,25CO <sub>2</sub> + 3,75CH <sub>4</sub>

## 2.4 Εφαρμογή της μεθόδου-Κρίσιμοι παράγοντες λειτουργίας

Οι μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας συνίστανται στην προώθηση και διατήρηση της μεταβολικής δραστηριότητας ενός μικροβιακού πληθυσμού, ο οποίος μπορεί να αποδομήσει ή να μειώσει την τοξικότητα συγκεκριμένων ρύπων. Προκειμένου να σχεδιαστεί κατάλληλα μια εγκατάσταση βιοαποκατάστασης είναι σημαντικό να ελεγχθούν ορισμένοι παράγοντες, οι οποίοι είναι κρίσιμοι για τη διατήρηση της μικροβιακής δραστηριότητας σε αποτελεσματικά επίπεδα. Οι κυριότεροι παράγοντες που καθορίζουν την αποδοτικότητα των μεθόδων βιοαποκατάστασης είναι η διαθεσιμότητα του δέκτη ηλεκτρονίων και των θρεπτικών συστατικών, καθώς και ορισμένες κρίσιμες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η υγρασία, η θερμοκρασία και το pH (King et al. 1998).

### • Δέκτης ηλεκτρονίων

Η μεγάλη πλειονότητα των έργων βιοαποκατάστασης γίνεται με εφαρμογή της αερόβιας διάσπασης των οργανικών ρύπων όπου ο περιοριστικός παράγοντας είναι συνήθως η διαθεσιμότητα του οξυγόνου. Η μάζα του οξυγόνου που απαιτείται στα αερόβια συστήματα μπορεί να υπολογιστεί με βάση τη στοιχειομετρία των βιολογικών αντιδράσεων, καθώς και με κατάλληλες εργαστηριακές ή/και επιτόπιες μετρήσεις και είναι απαραίτητη για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου.

Τόσο οι καταβολικές όσο και οι αναβολικές αντιδράσεις απαιτούν δέκτη ηλεκτρονίων. Η στοιχειομετρία των αντιδράσεων καταβολισμού μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί λαμβάνοντας υπόψη το είδος των προϊόντων. Για παράδειγμα στην περίπτωση της πλήρους ανοργανοποίησης του τολουολίου η αντίδραση καταβολισμού είναι η ακόλουθη:

Αντίδραση καταβολισμού:

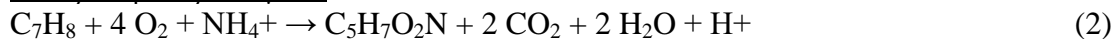


Για τις αναβολικές αντιδράσεις, οι οποίες καταλήγουν στην παραγωγή νέων κυττάρων, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε περίπου τη χημική σύσταση της βιομάζας. Τα βακτηριακά κύτταρα αποτελούνται κατά 75-80% από νερό, ενώ το στερεό υλικό αποτελείται κατά 90% από οργανικά συστατικά και κατά 10% από ανόργανα στοιχεία. Έχουν κατά καιρούς προταθεί διάφοροι εμπειρικοί τύποι για να περιγραφεί η αναλογία των στοιχείων στο βακτηριακό κύτταρο. Ένας συνηθισμένος τύπος είναι C<sub>5</sub>H<sub>7</sub>O<sub>2</sub>N ή C<sub>60</sub>H<sub>87</sub>O<sub>23</sub>N<sub>12</sub>P. Η βιομάζα περιέχει και άλλα στοιχεία, όπως S, Na, K, Ca, Mg, Cl, Fe, καθώς και διάφορα ιχνοστοιχεία, το άθροισμα όμως όλων αυτών των στοιχείων αντιπροσωπεύει μόλις το 5% της ξηρής βιομάζας.



Θεωρώντας τον απλό τύπο για τη σύσταση της κυτταρικής μάζας, η χρήση του τολουολίου για τη δημιουργία νέων κυττάρων μπορεί να περιγραφεί από την αντίδραση (2):

Αντίδραση αναβολισμού:



Με βάση την εμπειρία από διάφορες περιπτώσεις αερόβιας διάσπασης οργανικών ρύπων, θεωρείται ότι το 50% της οργανικής ένωσης διασπάται για παραγωγή ενέργειας και το 50% για παραγωγή βιομάζας. Με βάση αυτή την υπόθεση η ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για να διασπαστεί 1 mole τολουολίου αντιστοιχεί σε 6.5 moles, δηλ. 4.5 moles για παραγωγή ενέργειας και 2 moles για παραγωγή βιομάζας.

- **Θρεπτικά συστατικά**

Όπως είναι γνωστό σημαντικό ρόλο στη σύνθεση του κυτταρικού ιστού έχουν το άζωτο και ο φωσφόρος καθώς είναι απαραίτητα στοιχεία για τη σύνθεση των πρωτεϊνών. Κατά τη βιολογική επεξεργασία των ρυπασμένων εδαφών υπάρχει συνήθως έλλειψη των στοιχείων αυτών και συχνά απαιτείται προσθήκη N και P, στη μορφή αμμωνιακών και φωσφορικών αλάτων, για να ενισχυθεί η βιολογική δραστηριότητα. Ο εμπειρικός τύπος  $C_{60}H_{87}O_{23}N_{12}P$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογισθούν προσεγγιστικά οι απαιτήσεις σε N και P κατά τη διάρκεια της βιολογικής επεξεργασίας. Η μοριακή αναλογία C:N:P για την αναβολική αντίδραση είναι 60:12:1, αλλά η πραγματική απαίτηση σε N και P είναι χαμηλότερη, δεδομένου ότι ένα ποσοστό μόνο του οργανικού άνθρακα χρησιμοποιείται για την παραγωγή βιομάζας. Στο παράδειγμα της βιοαποδόμησης του τολουολίου που παρουσιάζεται παραπάνω, μόνο τα 2.5 από τα 7 άτομα άνθρακα του τολουολίου θεωρείται ότι χρησιμοποιούνται για την παραγωγή νέας βιομάζας και η συνολική αναλογία C:N:P είναι 168:12:1.

- **Υγρασία**

Κατά την εφαρμογή των μεθόδων βιοαποκατάστασης η υγρασία είναι απαραίτητη για δυο λόγους: 1) για την κυτταρική ανάπτυξη δεδομένου ότι η κυτταρική μάζα αποτελείται κατά 75-80% από νερό και 2) διότι το νερό αποτελεί το βασικό μέσο το οποίο εξασφαλίζει την κίνηση των μικροοργανισμών προς τους οργανικούς ρύπους και αντιστρόφως. Ποσοστά μεταξύ 25 και 85% του πλήρους κορεσμού σε νερό θεωρούνται αποδεκτά για τη βιολογική επεξεργασία των εδαφών. Σε πολλές περιπτώσεις η υγρασία του εδάφους στη ακόρεστη ζώνη είναι χαμηλότερη και απαιτείται προσθήκη νερού για διατηρηθούν ικανοποιητικές συνθήκες λειτουργίας.

Όπως αναφέρθηκε οι μέθοδοι βιοαποκατάστασης μπορεί να εφαρμοσθούν επιτόπου ή μετά από εκσκαφή και μεταφορά του εδάφους στην κατάλληλη εγκατάσταση επεξεργασίας. Στη συνέχεια θα αναφερθούν οι τρόποι εφαρμογής της μεθόδου και στις δύο μορφές της.

## 2.5 Επιτόπιες μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας οργανικών ρύπων

Οι επιτόπιες μέθοδοι στηρίζονται μόνον στη δράση γηγενών βακτηρίων και μολονότι υπάρχει μια πολύ μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα ώστε να απομονωθούν και να αναπτυχθούν ειδικά βακτήρια με υψηλή ικανότητα βιο-αποδόμησης οργανικών ρύπων, δεν έχει μέχρι σήμερα αναφερθεί παράδειγμα επιτόπιας επεξεργασίας εδαφών με προσθήκη μη γηγενών βακτηρίων (King et al., 1998, Suthersan 1997).

- **Βιοαποκατάσταση στην ακόρεστη ζώνη**

Σε πολλές περιπτώσεις εφαρμογής παρατηρήθηκε ότι η κυκλοφορία του αέρα μέσα από το πορώδες της ακόρεστης ζώνης προκαλεί ταυτόχρονα την βιολογική αποδόμηση των

οργανικών ρύπων. Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις αναπτύχθηκε η τεχνική του *βιο-αερισμού* (bioventing), όπου ο συνολικός σχεδιασμός βελτιστοποιείται για να ενισχυθούν οι δράσεις αερόβιας βιο-αποδόμησης των ρύπων. Ο βιοαερισμός ελαττώνει το συνολικό φορτίο των πτητικών ρύπων ενώ μπορούν να απομακρυνθούν και ρύποι οι οποίοι έχουν χαμηλή πτητικότητα αλλά μπορούν να βιοαποδομηθούν εύκολα σε αερόβιες συνθήκες.

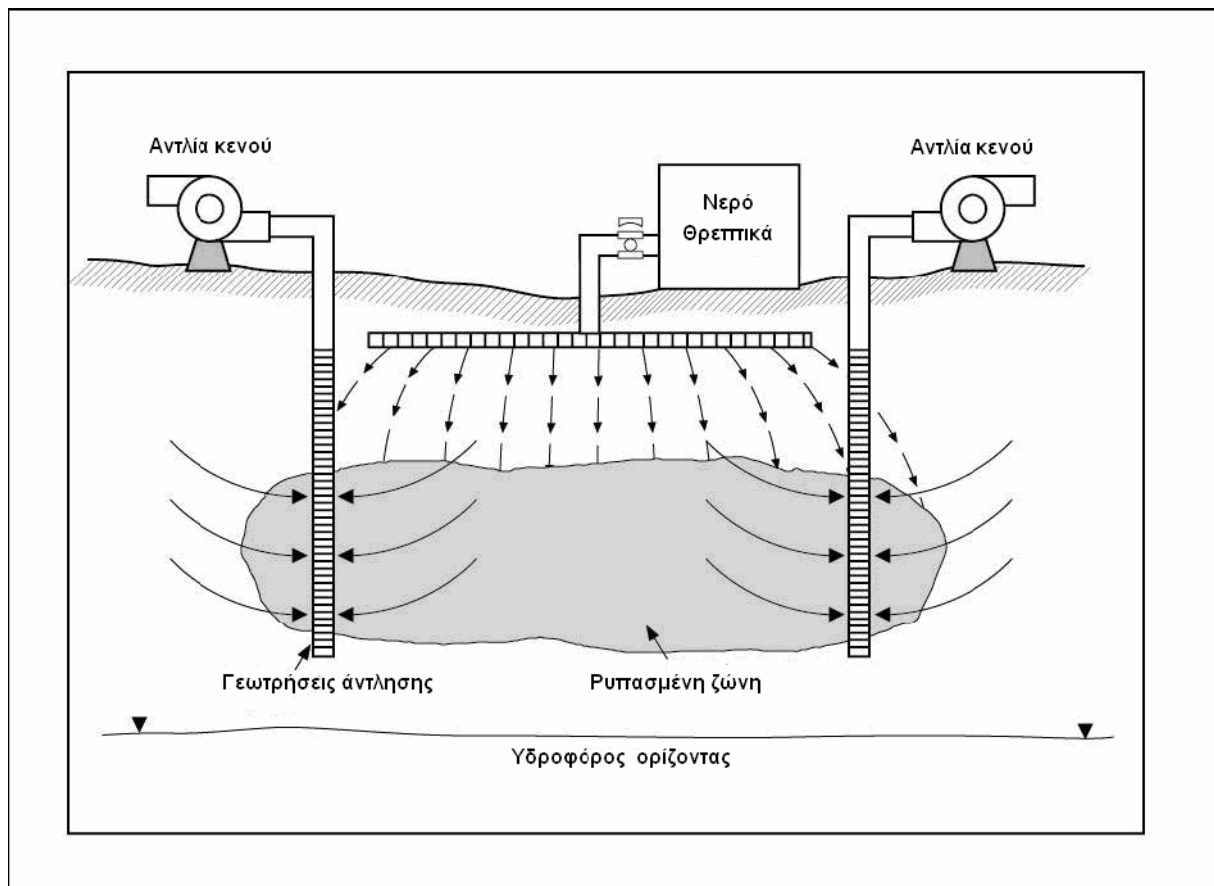
Οι κύριες απαιτήσεις κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος βιοαερισμού είναι οι ακόλουθες:

**Διατήρηση ροής O<sub>2</sub> μέσα από τη ρυπασμένη ζώνη**, έτσι ώστε να ευνοείται η αερόβια βιοαποδόμηση των ρύπων. Πρέπει να τονισθεί ότι κατά το βιοαερισμό η κύρια επιδίωξη είναι η μεγιστοποίηση της χρήσης O<sub>2</sub> από τους μικροβιακούς πληθυσμούς. Ένας απλός εμπειρικός κανόνας είναι ότι ο αέρας των πόρων πρέπει να ανανεώνεται κάθε 1 ή 2 ημέρες.

**Διατήρηση της υγρασίας του εδάφους** σε μια βέλτιστη τιμή για τη μικροβιακή δραστηριότητα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί για την βιοαποδόμηση απαιτείται ένα ελάχιστο επίπεδο υγρασίας του εδάφους. Η συνεχής κυκλοφορία του αέρα κατά την εφαρμογή του βιοαερισμού έχει σαν αποτέλεσμα την εξάτμιση της εδαφικής υγρασίας. Για το λόγο αυτό κατά τον σχεδιασμό των εγκαταστάσεων πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη για την προσθήκη νερού στη ρυπασμένη ζώνη. Η βέλτιστη υγρασία για τη διατήρηση της βιολογικής δραστηριότητας κυμαίνεται μεταξύ 40 και 60% της τιμής κορεσμού του εδάφους. Εάν η εδαφική υγρασία αυξηθεί σημαντικά πάνω από το όριο του 60%, δημιουργείται πρόβλημα στην αποτελεσματική κυκλοφορία του αέρα, λόγω μείωσης του πορώδους.

**Προσθήκη μακρο- και μικρο-θρεπτικών συστατικών**, εφόσον χρειάζεται. Συνήθως τα εδάφη περιέχουν N και P καθώς και τα μικροστοιχεία που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών. Σε ορισμένες όμως περιπτώσεις, ιδιαίτερα στα αρχικά στάδια, πρέπει να ενισχυθεί η ανάπτυξη των γηγενών μικροοργανισμών και είναι απαραίτητη η προσθήκη των απαραίτητων θρεπτικών συστατικών και κατά κύριο λόγο N και P.

Στην Εικόνα 2.10 παρουσιάζεται διάγραμμα μιας εγκατάστασης βιοαερισμού με πρόβλεψη για την προσθήκη υγρασίας και θρεπτικών συστατικών στη ρυπασμένη ζώνη του εδάφους. Η προσθήκη νερού, μαζί με διαλυμένα θρεπτικά συστατικά, μπορεί να γίνει με ένα απλό σύστημα επιφανειακής άρδευσης του εδάφους εάν η ρυπασμένη περιοχή βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια ή με σύστημα υπόγειων σωληνώσεων, γεωτρήσεων, κλπ.



**Εικόνα 2.10.** Σχηματικό διάγραμμα εγκατάστασης βιοαερισμού με πρόβλεψη για προσθήκη υγρασίας και θρεπτικών συστατικών στη ρυπασμένη ζώνη του εδάφους (NAS, USA, 1993)

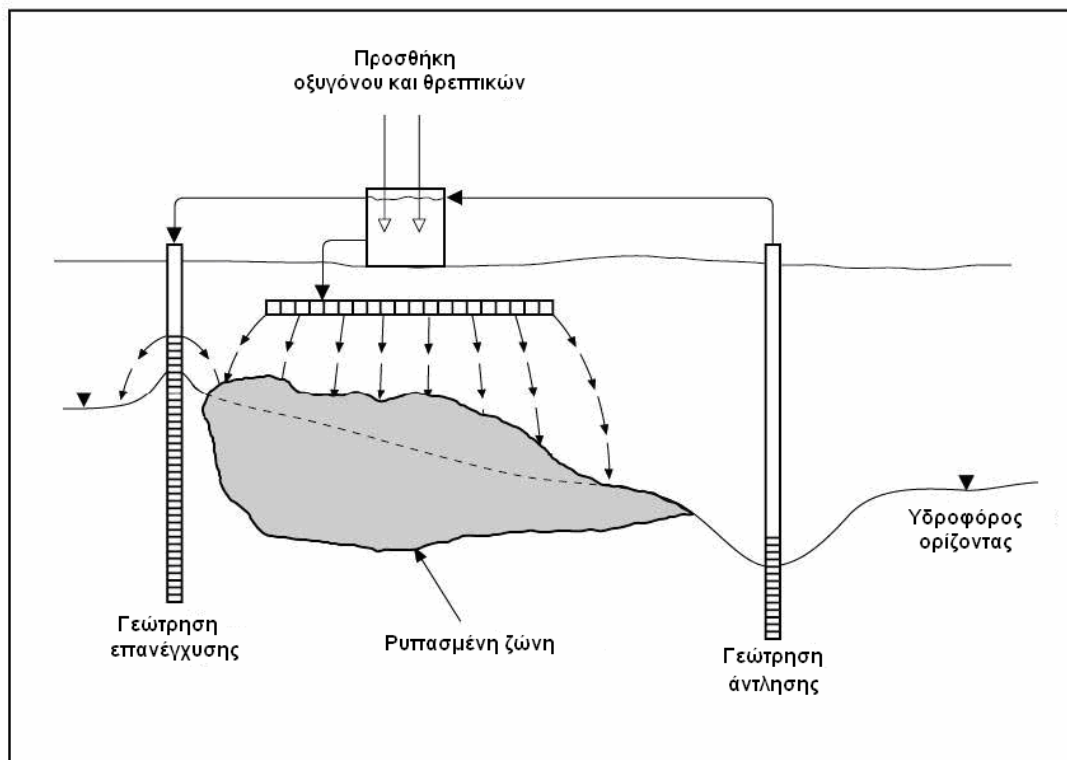
Από τις τρεις βασικές προϋποθέσεις για την αποτελεσματική λειτουργία των εγκαταστάσεων βιοαερισμού η σημαντικότερη είναι η παροχή του απαιτούμενου  $O_2$  και κατά δεύτερο λόγο η διατήρηση της υγρασίας και θρεπτικών συστατικών στις βέλτιστες τιμές.

- **Βιοαποκατάσταση στο υδροφόρο στρώμα**

Όταν η ρυπασμένη περιοχή βρίσκεται μέσα στο υδροφόρο στρώμα, η διαθεσιμότητα του οξυγόνου γίνεται ένα ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα για την αερόβια βιο-αποδόμηση των οργανικών ρύπων. Για την προσθήκη του απαιτούμενου  $O_2$  εφαρμόζονται δύο κυρίως τεχνικές: (α) άντληση και επανακυκλοφορία των υπόγειων νερών μετά από τον εμπλουτισμό τους σε οξυγόνο σε επιφανειακές εγκαταστάσεις, και (β) διοχέτευση αέρα μέσα στο υδροφόρο στρώμα (αεροδιασκορπισμός).

*Άντληση, οξυγόνωση και επανακυκλοφορία των υπόγειων νερών*

Στην Εικόνα 2.11 παρουσιάζεται μια τυπική εγκατάσταση με άντληση, οξυγόνωση και επανακυκλοφορία των υπόγειων νερών. Η οξυγόνωση μπορεί να πραγματοποιηθεί με τους ακόλουθους τρόπους: εμφύσηση αέρα, εμφύσηση καθαρού οξυγόνου, προσθήκη  $H_2O_2$ .



**Εικόνα 2.11.** Βιοαποκατάσταση του υδροφόρου με άντληση, οξυγόνωση και επανακυκλοφορία των υπόγειων νερών (La Grega, 1994, NAS, USA, 1993 ).

Με την εμφύσηση αέρα η συγκέντρωση του διαλυμένου  $O_2$  δεν υπερβαίνει συνήθως τα  $8\text{mg/L}$ , ενώ με την εμφύσηση καθαρού  $O_2$ , μπορεί να επιτευχθεί συγκέντρωση μέχρι  $40\text{mg/L}$ . Το  $H_2O_2$  παράγει  $O_2$  μέσω της ακόλουθης αντίδρασης:



Λόγω της αντίδρασης αυτής, το διαλυμένο  $H_2O_2$  λειτουργεί σαν πηγή συνεχούς παραγωγής οξυγόνου και συνεπώς η διαθέσιμη ποσότητα  $O_2$  μπορεί να είναι μεγαλύτερη από το όριο των  $40\text{mg/L}$ , που αντιστοιχεί στη διαλυτότητα του αερίου οξυγόνου. Εντούτοις έχει διαπιστωθεί ότι το υπεροξείδιο του υδρογόνου είναι τοξικό στους μικροοργανισμούς σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από  $1000\text{mg/L}$ . Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως συγκεντρώσεις μεταξύ  $100$  και  $500\text{mg/L}$ .

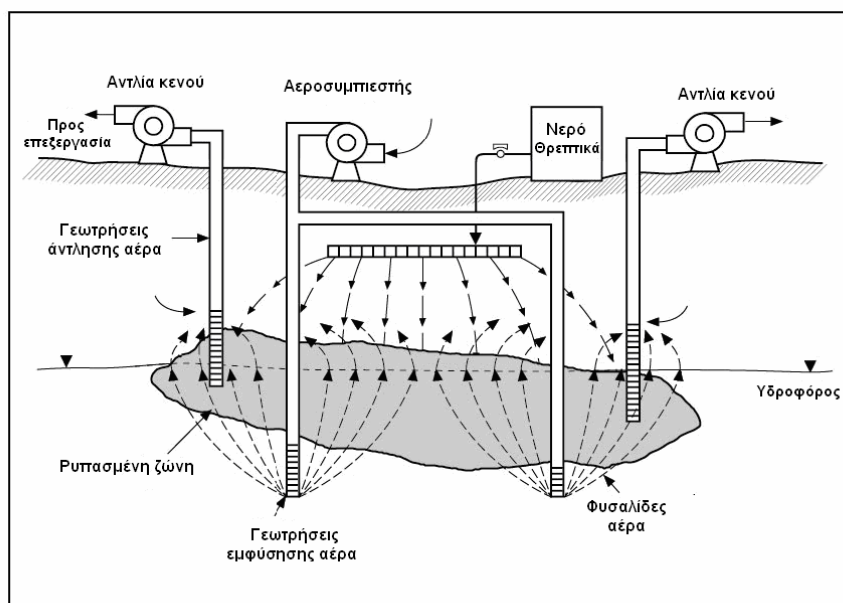
#### *Αεροδιασκορπισμός μέσα στο υδροφόρο στρώμα*

Η τεχνική του αεροδιασκορπισμού αναπτύχθηκε αρχικά στις Ευρωπαϊκές χώρες και λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων της μετά το 1990 άρχισε να εφαρμόζεται και στις ΗΠΑ. Μια τυπική εγκατάσταση παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.10. Με τον αεροδιασκορπισμό η απομάκρυνση των ρύπων γίνεται με δύο μηχανισμούς ταυτόχρονα:

(α) Εξάτμιση των διαλυμένων πτητικών ρύπων, μέσα από την διεπιφάνεια αέριων φυσαλλίδων-νερού.

(β) Βιο-αποδόμηση λόγω του εμπλουτισμού των υπόγειων νερών με οξυγόνο. Στην περίπτωση αυτή η τροφοδοσία του οξυγόνου είναι συνεχής και περιορίζεται μόνον από τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας μεταξύ αέριας και υδατικής φάσης.

Το γεγονός ότι υπάρχει μια συνεχής πηγή προσφοράς  $O_2$ , για την αναπλήρωση της ποσότητας που καταναλώνεται από τη βιολογική δραστηριότητα, αποτελεί το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής.



**Εικόνα 2.12.** Εγκατάσταση αεροδιασκορπισμού στο υδροφόρο στρώμα. Η απομάκρυνση των ρύπων επιτυγχάνεται αφενός μεν με εξάτμιση και αφετέρου με βιοαποδόμηση. Η εγκατάσταση περιλαμβάνει αντλίες κενού για την ανάκτηση και τον καθαρισμό του αέρα που περιέχει τους πτητικούς ρύπους (NAS, USA, 1993 Suthersan, 1997).

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται δεδομένα βιοαποδόμησης για ορισμένες χαρακτηριστικές οργανικές ενώσεις. Οι τέσσερις πρώτες αρωματικές ενώσεις, που είναι γνωστές ως BTEX, απομακρύνονται εξίσου εύκολα τόσο με εξάτμιση όσο και με βιοαποδόμηση. Οι χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες παρουσιάζουν συνήθως πολύ μικρή τάση βιοαποδόμησης σε αερόβιες συνθήκες, ενώ μπορεί να έχουν υψηλή πτητικότητα όπως το τριχλωροαιθυλένιο και το τριχλωροαιθάνιο. Οι ενώσεις αυτές θα απομακρυνθούν κατά κύριο λόγο με εξάτμιση. Υπάρχουν τέλος ενώσεις, όπως το ακετονιτρίλιο και το διφαινύλιο που βιοαποδομούνται εύκολα ενώ η πτητικότητά τους είναι σχετικά χαμηλή. Στην περίπτωση αυτή ο κυρίαρχος μηχανισμός απομάκρυνσης είναι η βιοδιάσπαση.

**Πίνακας 2** Δεδομένα βιοαποδόμησης για χαρακτηριστικές οργανικές ενώσεις (Suthersan 1997)

Ένωση	Αερόβια Βιο-αποδόμηση	
	Χρόνος ημίσειας ζωής, ώρες	
	Από	Μέχρι
Βενζόλιο	120	384
Τολουόλιο	96	528
m-Ξυλένιο	168	672
Αιθυλ-βενζόλιο	72	240
Τριχλωροαιθυλένιο	4.320	8.640
1,1,1-τριχλωρο αιθάνιο	3.360	6.552
Ακετονιτρίλιο	168	672
Διφαινύλιο	36	168

#### *Παράμετροι σχεδιασμού*

Ο κύριος στόχος κατά τον σχεδιασμό των εγκαταστάσεων αεροδιασκορπισμού μέσα στο υδροφόρο στρώμα είναι να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή διεπιφάνεια μεταξύ του αέρα και των υπόγειων νερών, να δημιουργούνται δηλαδή πολλές και μικρές φυσαλίδες αέρα που να διασπείρονται σε όλη τη ρυπασμένη περιοχή. Η μεγάλη διεπιφάνεια είναι απαραίτητη τόσο για την εξάτμιση των ρύπων (μεταφορά από την υδατική φάση προς τον αέρα), όσο και για την οξυγόνωση των υπόγειων νερών (μεταφορά οξυγόνου από τον αέρα προς την υδατική φάση). Δεν έχουν μέχρι σήμερα αναπτυχθεί απλά και εύχρηστα μαθηματικά πρότυπα που να περιγράφουν με αξιοπιστία την διασπορά του αέρα μέσα στον υδροφόρο γι' αυτό ο σχεδιασμός αυτών των συστημάτων στηρίζεται κυρίως στην εμπειρία και σε επιτόπιες δοκιμές. Οι σημαντικότερες παράμετροι σχεδιασμού είναι οι ακόλουθες:

**Ζώνη επιρροής.** Στα συστήματα αεροδιασκορπισμού δεν είναι εύκολο να ορισθεί μια ακτίνα επιρροής. Η εμφύσηση του αέρα γίνεται συνήθως μέσα από έναν ή περισσότερους σωλήνες, οι οποίοι βυθίζονται έτσι ώστε το άκρο τους να βρίσκεται κάτω από τη ρυπασμένη περιοχή. Οι φυσαλίδες αέρα που βγαίνουν από το άκρο του κάθε σωλήνα δημιουργούν μια μορφή ανεστραμμένου κώνου. Το εύρος του κώνου εξαρτάται κυρίως από την διαπερατότητα και την ομοιογένεια του εδάφους. Διαπερατά και ομοιογενή εδάφη δημιουργούν συνήθως στενούς κώνους. Εδάφη χαμηλής διαπερατότητας ή εδάφη με ζώνες χαμηλής διαπερατότητας δημιουργούν περισσότερο ανοικτούς κώνους. Η ζώνη επιρροής προσδιορίζεται συνήθως με επιτόπιες δοκιμές.

**Βάθος διασκορπισμού του αέρα.** Το άκρο του σωλήνα, από το οποίο γίνεται ο διασκορπισμός του αέρα, τοποθετείται συνήθως 30 με 60 cm χαμηλότερα από το κατώτερο βάθος της ρυπασμένης περιοχής.

**Πίεση και ροή του αέρα.** Η πίεση του αέρα θα πρέπει βέβαια να είναι μεγαλύτερη από την υδροστατική πίεση των νερών στο βάθος της εμφύσησης. Η απαιτούμενη υπερπίεση εξαρτάται από την διαπερατότητα του υδροφόρου στρώματος. Σε λεπτόκοκκα εδάφη χαμηλής διαπερατότητας εφαρμόζεται συνήθως μεγάλη υπερπίεση, που αντιστοιχεί σε 0.3-3 m στήλης νερού, ενώ σε διαπερατά χονδρόκοκκα εδάφη είναι αρκετή υπερπίεση της τάξεως των 3-30 cm νερού. Οι τυπικές τιμές ογκομετρικής ροής ανά γεώτρηση κυμαίνονται από 25 μέχρι 400 L/min.

## 2.6 Βιολογική επεξεργασία μετά από εκσκαφή

Σε ορισμένες περιπτώσεις δεν είναι δυνατή η εφαρμογή της βιολογικής επεξεργασίας επιτόπου, οπότε γίνεται εκσκαφή του ρυπασμένου εδάφους και μεταφορά του σε ειδικά διαμορφωμένες εγκαταστάσεις, όπου η βιοαποκατάσταση πραγματοποιείται κάτω από καλύτερα ελεγχόμενες συνθήκες. Οι συνηθέστερες μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας μετά από εκσκαφή είναι οι ακόλουθες (Chiacchierini, 2004; Marin, 2005):

- **Επεξεργασία με τεχνικές αγροκαλλιέργειας (landfarming)**

Σ' αυτό τον τύπο επεξεργασίας το έδαφος απλώνεται σε μια μεγάλη επιφάνεια, δημιουργώντας ένα στρώμα πάχους 45-60 cm. Σε τακτά χρονικά διαστήματα το έδαφος οργώνεται με κλασικά αγροτικά μηχανήματα, έτσι ώστε να εμπλουτίζεται με το οξυγόνο που είναι απαραίτητο για τις βιολογικές δράσεις, ενώ παράλληλα γίνεται συστηματική προσθήκη υγρασίας και θρεπτικών. Σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης επεξεργασίας με τεχνικές αγροκαλλιέργειας έχει παρουσιαστεί σε εικόνα παραπάνω. Η κάτω επιφάνεια διαμορφώνεται με κλίση 1% προς ένα σημείο συλλογής των στραγγισμάτων και διαστρώνεται με αδιαπέρατη γεωμεμβράνη για να μην υπάρχει ανεξέλεγκτη διαρροή στραγγισμάτων προς το υπέδαφος. Πάνω από τη γεωμεμβράνη τοποθετείται διαπερατό στρώμα άμμου και πάνω στο στρώμα αυτό γίνεται η διάστρωση του ρυπασμένου εδάφους. Η μέθοδος αυτή είναι πολύ εύκολη στην εφαρμογή της και δεν παρουσιάζει τεχνικές δυσκολίες, προϋποθέτει όμως την ύπαρξη μιας μεγάλης έκτασης, διότι το πάχος του εδαφικού στρώματος δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 60cm. Το όριο αυτό αντιστοιχεί στο μέγιστο βάθος οργώματος των διαθέσιμων αγροτικών μηχανημάτων.





**Εικόνα 2.13:** Επίδειξη εφαρμογής μεθόδου στην Murcia, Ισπανία

Η μέθοδος δίνει πολύ καλά αποτελέσματα, απαιτεί όμως μεγάλο χρόνο εφαρμογής ενώ υπάρχει ο κίνδυνος έκλυσης πτητικών τοξικών ενώσεων. Για το λόγο αυτό η πραγματοποίησή της γίνεται μακριά από κατοικημένες περιοχές και σε κάθε περίπτωση δεν εφαρμόζεται σε περιοχές που οι ουσίες αυτές μπορεί να επηρεάσουν ευαίσθητους αποδέκτες.

- **Επεξεργασία σε σωρό ή λάκκο (biopile ή biopit)**

Όταν δεν υπάρχει επαρκής διαθέσιμη επιφάνεια η επεξεργασία του εδάφους μπορεί να γίνει σε σωρούς ή λάκκους. Εγκαταστάσεις επεξεργασίας σε σωρό παρουσιάζονται στα σχήματα 6. Όταν το έδαφος έχει χαμηλή σχετικά διαπερατότητα, ο σωρός κατασκευάζεται σε διαδοχικά στρώματα πάχους 60 cm περίπου, τα οποία χωρίζονται μεταξύ τους με ένα λεπτό στρώμα διαπερατής άμμου. Τα διαπερατά στρώματα συνδέονται με μια αντλία, μέσω της οποίας γίνεται η διοχέτευση αέρα στον σωρό. Όταν υπάρχει κίνδυνος διαφυγής πτητικών ενώσεων ο σωρός καλύπτεται πλήρως με αδιαπέρατη γεωμεμβράνη.

Η επεξεργασία σε λάκκο μπορεί να πραγματοποιηθεί στην ίδια την περιοχή στην οποία έγινε η εκσκαφή του εδάφους, μετά από την κατάλληλη στεγανοποίηση του πυθμένα. Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατή η κάλυψη της επάνω επιφάνειας και η απόδοσή της σε κοινή χρήση.



## 2.7 Παρακολούθηση της εφαρμογής και αποτελεσματικότητας της μεθόδου

Προκειμένου να επιτύχουμε τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα με τις ελάχιστες δυνατές περιβαλλοντικές επιπτώσεις απαιτείται η εφαρμογή και τα αποτελέσματα της μεθόδου, με όποια μορφή κι αν αυτή εφαρμόζεται, να ελέγχονται και να συσχετίζονται με ποσοτικούς δείκτες αποτελεσματικότητας (EPA, 2003-2004).

Έτσι, απαιτείται καταρχήν η κατάστρωση ενός **σχεδίου διαχείρισης της μεθόδου** (Bioremediation management plan) το οποίο θα περιγράφει τη διαχείριση και τον έλεγχο της μεθόδου, αυτής καθ' αυτής και θα πρέπει να περιλαμβάνει πληροφορίες όπως:

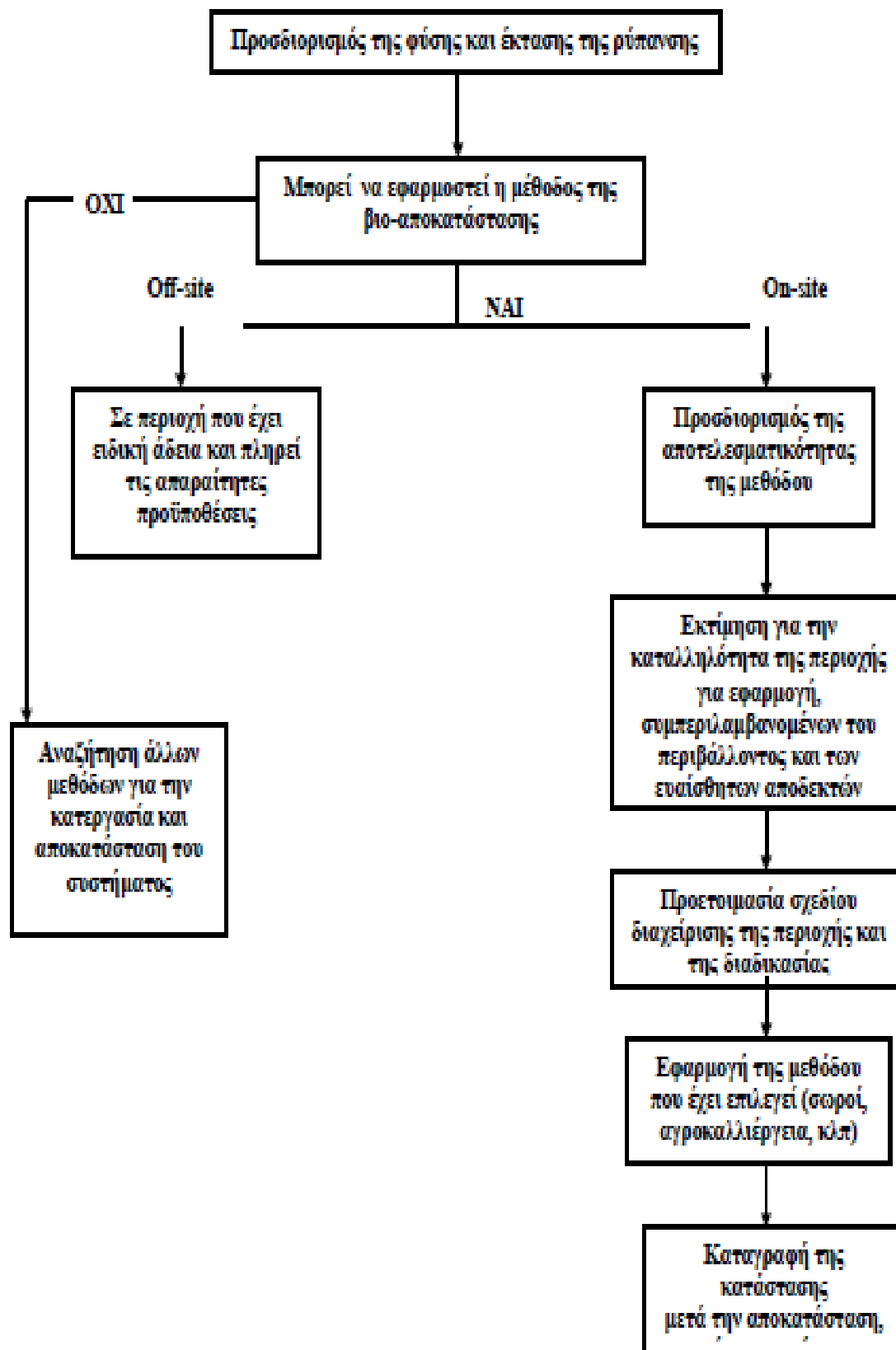
- Όγκος του προς επεξεργασία χώματος και συγκεντρώσεις των ενώσεων-ρύπων καθώς και οι πηγές προέλευσής τους με τα χαρακτηριστικά τους
- Τελικές συγκεντρώσεις-στόχοι των τοξικών ουσιών και προβλεπόμενος χρόνος επίτευξης
- Πρόβλεψη χρήσεων του αποκατεστημένου εδάφους και της τελικής διάθεσης του υλικού που δεν αποκαταστάθηκε επιτυχώς
- Καταλληλότητα του χώρου που θα πραγματοποιηθεί η επεξεργασία και απαιτούμενες εγκαταστάσεις
- Λεπτομέρειες εφαρμογής της μεθόδου, των καιρικών συνθηκών, της επεξεργασίας των στραγγισμάτων, της προσθήκης θρεπτικών συστατικών και νερού για τη διατήρηση της υγρασίας, πιθανές μέθοδοι συλλογής των πτητικών οργανικών ουσιών πριν την έκλυση τους στην ατμόσφαιρα, διαδικασία και μέθοδοι δειγματοληψίας εδάφους.

Συμπληρωματικά με το παραπάνω σχέδιο θα πρέπει να διενεργηθεί και **σχέδιο διαχείρισης περιβάλλοντος** (environmental management plan) το οποίο θα καταγράφει και προβλέπει όλα τα γνωστά αλλά και τα πιθανά περιβαλλοντικά προβλήματα σε σχέση πάντα με την εφαρμογή της μεθόδου. Έτσι μεταξύ θα πρέπει να περιλαμβάνει :

- Πληροφορίες για τον έλεγχο της ποιότητας του αέρα στον χώρο που εφαρμόζεται η μέθοδος προκειμένου να διασφαλιστούν αρνητικές επιπτώσεις στον περιβάλλοντα χώρο και τα οικοσυστήματά του καθώς και τρόποι αντιμετώπισης των πιθανών επιπτώσεων
- Πληροφορίες για την ποιότητα και τα χαρακτηριστικά του υπεδάφους, π.χ. διαπερατότητα, ικανότητα αφομοίωσης ουσιών που θα προκύψουν από τις δραστηριότητες στην επιφάνεια
- Πληροφορίες για την καταλληλότητα των εγκαταστάσεων και των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή τους
- Μέτρα για την αποφυγή δυσάρεστων οσμών, θορύβων, σκόνης κ.α.
- Υδρογεωλογικά δεδομένα της περιοχής όπως βάθος υδροφόρου, κατεύθυνση ροής νερού, ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά του νερού καθώς και αναγκαιότητα ή μη ελέγχου των παραμέτρων αυτών

Σημαντικό είναι επίσης να υπάρχει ένα σχέδιο ελέγχου της αποτελεσματικότητας της μεθόδου μετά το τέλος της εφαρμογής της προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για τη συνολική βελτίωση του συστήματος που αυτή εφαρμόστηκε.

Προκειμένου να αποφασιστεί η εφαρμογή της μεθόδου αποκατάστασης θα πρέπει να αναπτυχθεί μία στρατηγική, η οποία και θα δώσει σαν αποτέλεσμα την αποτελεσματικότητα ή μη της χρήσης της. Με ένα απλό διάγραμμα η στρατηγική αυτή μπορεί να παρουσιαστεί ως εξής:



**Εικόνα 2.14.** Στρατηγική αποφάσεων και δράσεων για την εφαρμογή της μεθόδου βιο-αποκατάστασης εδαφών.

## 2.8 Εφαρμογή της μεθόδου σε ρυπασμένα εδάφη στην Ελλάδα

Η μέθοδος θα μπορούσε να εφαρμοστεί, και στην Ελλάδα, σε περιπτώσεις όπου οργανικές, τοξικές ουσίες αποτίθενται σε εδάφη, συστηματικά ή μετά από τυχαία συμβάντα (ατυχήματα), π.χ. διαρροές υπόγειων δεξαμενών βενζινάδικων, ατυχήματα κατά τη μεταφορά ουσιών, κλπ.

Υπάρχει όμως στην Ελλάδα μία συστηματική απόρριψη οργανικών-τοξικών ουσιών στα εδάφη και στα υδάτινα συστήματα η οποία συμβαίνει από την αρχαιότητα και δεν είναι άλλη από την απόθεση αποβλήτων της κατεργασίας ελαιοκάρπου.

Η Ελλάδα είναι η τρίτη χώρα παγκοσμίως, μετά την Ισπανία και την Ιταλία, στην παραγωγή ελαιολάδου (Πίνακας 3).

Πίνακας 3. Ετήσια παραγωγή σε τόνους ελαιολάδου στην Μεσόγειο από τις 5 μεγαλύτερες ελαιοπαραγωγικές χώρες παγκοσμίως

Χώρα	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Ελλάδα	406.375	302.230	381.620	374.903	321.338	386.385	400.635	394.700
Ιταλία	507.400	573.500	574.950	600.482	794.559	671.315	626.800	590.200
Πορτογαλία	25.974	34.950	31.050	36.498	50.066	31.817	51.847	39.000
Ισπανία	962.400	1.412.100	836.902	1.449.071	1.005.461	820.597	1.139.000	1.326.000
Τυνησία	115.000	30.000	72.000	280.000	130.000	210.000	170.000	194.900

Κι ενώ το ελαιόλαδο κατέχει μία από τις σημαντικότερες θέσεις στη διατροφή του ανθρώπου και από αυτό παράγονται πλήθος προϊόντων ευρείας κατανάλωσης, δυστυχώς η διαδικασία παραγωγής του καταλήγει σε μεγάλο όγκο αποβλήτων. Τα απόβλητα αυτά, γνωστά και ως κατσίγαρος-λιοζούμια, χαρακτηρίζονται από υψηλή συγκέντρωση πολυφαινολικών ενώσεων, οι οποίες είναι τοξικές για το περιβάλλον και κατά συνέπεια και για τα συστήματα που αυτό υποστηρίζει.

Εκτός από την υψηλή τιμή φαινολικών ενώσεων, ο κατσίγαρος χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές BOD, υψηλό λόγο COD/BOD (2,05-2,35), υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα (0,89-4,75 dS/m), οργανική ουσία (86,0-97,6%) και χαμηλό pH (4,5-6,0).

Η απόθεσή τους στην Ελλάδα και στις άλλες ελαιοπαραγωγικές χώρες γίνεται κυρίως σε εξατμισοδεξαμενές όπου τα απόβλητα οδηγούνται μέσω σωληνώσεων από τα ελαιοτριβεία και αφήνονται προς εξάτμιση του υγρού μέρους του. Το δε στερεό υπόλειμμα παραμένει στις δεξαμενές. Όταν οι δεξαμενές γεμίσουν το στερεό υπόλειμμα απομακρύνεται και απορρίπτεται σε σημεία που ορίζονται από τη συνείδηση του κάθε ιδιοκτήτη. Ο σχεδιασμός της δεξαμενής γίνεται με βάση την παραγωγή ελαιολάδου, το ρυθμό εξάτμισης και την ετήσια βροχόπτωση (ένα τυπικό ελαιοτριβείο παραγωγής 300 τόνων ελαιολάδου παράγει περίπου 1000 κυβικά μέτρα απόβλητα), στην πράξη όμως οι δεξαμενές σχεδιάζονται με βάση τις απαιτήσεις και την οικονομική δυνατότητα του ιδιοκτήτη. Υπάρχουν και άλλοι τρόποι απόθεσης των αποβλήτων, οι οποίοι όμως δεν εφαρμόζονται στην Ελλάδα, όπου επικρατούν οι εξατμισοδεξαμενές και η απ' ευθείας απόθεση στα ρυάκια, ποτάμια, σε πηγάδια, κ.α Η απόθεση των αποβλήτων σε εξατμισοδεξαμενές επιτρέπεται από την ελληνική νομοθεσία εφόσον τηρούνται ορισμένοι περιορισμοί, κι ένας από αυτούς είναι οι δεξαμενές να είναι στεγανοποιημένες. Στην πράξη ελάχιστες από αυτές πληρούν αυτήν την προϋπόθεση, ενώ τις περισσότερες φορές όταν ο όγκος των αποβλήτων που δέχονται είναι μεγάλος, ξεχειλίζουν

και κατακλύζουν τον περιβάλλοντα χώρο αλλά και άλλους γειτονικούς. Επίσης πολλοί ελαιοτριβείς αποθέτουν το στερεό υπόλειμμα όταν αδειάζουν τις δεξαμενές στα εδάφη. Το πρόβλημα στην Ελλάδα είναι ιδιαίτερα μεγάλο με τους ελεγκτικούς μηχανισμούς του κράτους και των Υπηρεσιών Περιβάλλοντος να μην έχουν αποδώσει ιδιαίτερα καλά αποτελέσματα.



Θεωρητικά η εδαφική πανίδα έχει την ικανότητα να διασπάσει τις πολυφαινολικές ενώσεις των αποβλήτων μέσα σε 20-30 ημέρες από την απόθεση και η οργανική ουσία που απορρίπτεται με τα απόβλητα μπορεί να διασπαστεί και να εξασθενήσει μέσα σε μερικούς μήνες, οπότε με την έναρξη της παραγωγικής διαδικασίας, το φθινόπωρο, το έδαφος να έχει επανέλθει στην αρχική του κατάσταση. Στην πραγματικότητα όμως η μακροχρόνια χρήση των εδαφών για το σκοπό αυτό καθώς και το γεγονός της σταδιακής υποβάθμισής τους από τη συνεχή απόρριψη αποβλήτων πολύ μεγάλης ηλεκτρικής αγωγιμότητας έχει σαν αποτέλεσμα την καταστροφή των συστημάτων.



Η ΕΕ έχει κατά το παρελθόν χρηματοδοτήσει πλήθος ερευνητικών προγραμμάτων προκειμένου να εξευρεθεί λύση για την επεξεργασία των αποβλήτων των ελαιοτριβείων με πάρα πολύ καλά αποτελέσματα. Έτσι έχουν αναπτυχθεί αερόβιες και αναερόβιες μέθοδοι επεξεργασίας κάποιες από τις οποίες προβλέπουν και την ανάκτηση πολύτιμων οργανικών ενώσεων από τα απόβλητα με μεγάλη εμπορική αξία καθώς είναι πρώτες ύλες για την παρασκευή φαρμάκων και καλλυντικών.

Δυστυχώς όμως τα ελαιοτριβεία στην Ελλάδα είναι ως επί το πλείστον μικρές οικογενειακές ή συνεταιριστικές επιχειρήσεις και ως εκ τούτου δεν έχουν την οικονομική δυνατότητα να εγκαταστήσουν και να συντηρήσουν τη λειτουργία συστημάτων επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων. Έτσι το πρόβλημα διαιώνίζεται και μεγαλώνει.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> : Φυτο-εξυγίανση

Τα τελευταία χρόνια, στις τεχνικές απορρύπανσης εδαφών έχει προστεθεί και αυτή της φυτοεξυγίανσης, η οποία εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους, κυρίως ως προς τον ενισχυμένο περιβαλλοντικά φιλικό χαρακτήρα της. Η εν λόγω μέθοδος, αφορά σε χρήση φυτών που έχουν την ικανότητα να δεσμεύσουν μέταλλα. Παραδείγματα τέτοιων φυτών αποτελούν το Θλάσπι, η Τσουκνίδα, τα Αγαθόφυτα (*Chenopodium*), το Πολύγωνο (*Polygonum rachalare*) και το Άλυσο (*Alyssim*) και έχουν χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση καδμίου, χαλκού, μολύβδου, νικελίου και ψευδαργύρου. Η εν λόγω τεχνική λειτουργεί αποτελεσματικότερα σε μικρά βάθη μόλυνσης (μέχρι 3 m κάτω από το έδαφος) και χαμηλές συγκεντρώσεις μόλυνσης (2,3- 100 mg/ kg εδάφους), ενώ τα φυτά που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι απομονωμένα από την άγρια φύση ή τις αγροτικές περιοχές και να απορρίπτονται μετά τη μόλυνση τους ή να επεξεργάζονται κατάλληλα (αποτέφρωση, αεριοποίηση, αναερόβια χώνευση κ.α.). Μετά το τέλος της ζωής ή της ικανότητας τους να συσσωρεύσουν περαιτέρω ρύπους, τα φυτά αντιμετωπίζονται ως απόβλητα και απομακρύνονται από το πεδίο. Ανάλογα με τη συγκέντρωση και τοξικότητα των ρύπων που έχουν προσροφήσει επιλέγεται και η ανάλογη μέθοδος διαχείρισης τους, η οποία μπορεί να είναι: και περιλαμβάνει ξήρανση, κομποστοποίηση, συμπίεση, εκχύλιση, αποτέφρωση ή διάθεση σε ειδικούς χώρους. (Γιδαράκος, 2009).

Μια αξιοσημείωτη ιδιότητα των φυτών που αναπτύσσονται σε ρυπασμένα εδάφη είναι ότι μπορούν να απορροφήσουν μεγάλο πλήθος βαρέων μετάλλων και μάλιστα σε μεγάλες ποσότητες. Η πρόσληψη των βαρέων μετάλλων γίνεται μέσω των ριζών και των φύλλων του φυτού, λόγω της αλληλεπίδραση του με το έδαφος και το νερό στην πρώτη περίπτωση και την ατμόσφαιρα στη δεύτερη. Κάθε ρύπος μπορεί να εναποτίθεται σαν αδρανές υλικό στα κύτταρα και τις μεμβράνες των φυτών ή ακόμα και να συμμετέχει στη μεταβολική δραστηριότητα του. Σε κάθε περίπτωση, τα φυτά αποδίδουν πίσω ένα μέρος των στοιχείων που απορροφούν, συμβάλλοντας έτσι στην ανακύκλωση τους στο περιβάλλον. Επιπλέον, τα φυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν δείκτες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, με τα κατώτερα είδη (βρύα, λειχήνες) να αποτελούν τους πιο ευαίσθητους (Παπαφιλίππáκη, 2004). Η μέθοδος της φυτοεξυγίανσης είναι σε θέση να «αντιμετωπίσει» ένα πλήθος ρύπων όπως (Γιδαράκος, 2009):

- βαρέα μέταλλα (Cd, CrVI, Pb, Co, Cu, Pb, Ni, Se, Zn),
- ραδιενεργά στοιχεία (Cs, Sr, Ur),
- χλωριωμένοι διαλύτες (TCE, PCE),
- πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες (BTEX),
- πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs),
- πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs),
- χλωριωμένα φυτοφάρμακα,
- οργανοφωσφορικά ζιζανιοκτόνα (π.χ. παραθείο),
- εκρηκτικά (TNT, DNT, TNB, RDX, HMX),
- θρεπτικά (άζωτο, αμμωνία, φώσφορος).

### 3.1 Πρόσληψη βαρέων μετάλλων από φυτά

#### • Πρόσληψη και μεταφορά

Γενικά, τα μέταλλα δεν αποτελούν «ξένα» στοιχεία για τα φυτικά είδη, αλλά, αντίθετα, αποτελούν απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία, που βοηθούν στην ανάπτυξη τους (π.χ. Zn, Mn, Ni, Cu). Έτσι, τα φυτά έχουν αναπτύξει μηχανισμούς προκειμένου για την πρόσληψη, τη μεταφορά και την αποθήκευση τους. Η ικανότητα πρόσληψης των στοιχείων αυτών από τα περισσότερα φυτά κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα (< 10ppm). Ωστόσο, υπάρχουν και φυτικά είδη που είναι σε θέση να συσσωρεύσουν πολύ μεγάλες ποσότητες (της τάξης των χιλιάδων

ppm) και για το λόγο αυτό καλούνται υπερσυσσωρευτές. Επιπρόσθετο γνώρισμα των υπερσυσσωρευτών αποτελεί το γεγονός ότι μπορούν να προσλάβουν και μη θρεπτικά στοιχεία, όπως π.χ. το κάδμιο. Σε κάθε περίπτωση η πρόσληψη των μετάλλων εξαρτάται από (Αργύρης, 2009):

- τον τύπο και τη συγκέντρωση του μετάλλου,
- τον τύπο και το είδος του φυτού,
- την ηλικία του φυτού,
- το ρυθμό και τις συνθήκες ανάπτυξης του φυτού,
- τον τύπο και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του εδάφους (π.χ. οργανικός περιεχόμενο, pH).

Παραδείγματα τέτοιων φυτών αποτελούν τα Κραμβοειδή (*Brassicaceae*) και ειδικότερα το είδη που εντάσσονται στο γένος Θλάσπι (*Thlaspi*) τα οποία είναι σε θέση να συσσωρεύσουν στους βλαστούς τους μέταλλα, όπως ο ψευδάργυρος, ο μόλυβδος και το κάδμιο σε ποσοστά μεγαλύτερα από 3%, 0,5% και 0,1% αντίστοιχα (Παπαφιλίππáκη, 2009). Στους παρακάτω πίνακες 1 και 2 φαίνονται ενδεικτικά κάποια είδη υπερσυσσωρευτών.

**Πίνακας 1: Φυτά- υπερσυσσωρευτές και δυναμικό συσσώρευσης τους (Ali, 2013)**

Είδος φυτού	Μέταλλο	Συσσώρευση μετάλλου (mg / kg)	Αναφορά
<i>Alyssum bertolonii</i>	Ni	10900	Li, Y.M., Chaney, R., et al, Plant Soil 249, pp. 107-115, 2003
<i>Alyssum caricum</i>	Ni	12500	Li, Y.M., Chaney, R., et al, Plant Soil 249, pp. 107-115, 2003
<i>Alyssum corsicum</i>	Ni	18100	Li, Y.M., Chaney, R., et al, Plant Soil 249, pp. 107-115, 2003
<i>Alyssum heldreichii</i>	Ni	11800	Bani, A., Pavlova, D., et al., Bot. Serb. 34, pp. 3-14, 2010
<i>Alyssum markgrafii</i>	Ni	19100	Bani, A., Pavlova, D., et al., Bot. Serb. 34, pp. 3-14, 2011
<i>Alyssum murale</i>	Ni	4730- 20100	Bani, A., Pavlova, D., et al., Bot. Serb. 34, pp. 3-14, 2012
	Ni	15000	Li, Y.M., Chaney, R., et al, Plant Soil 249, pp. 107-115, 2003
<i>Alyssum pterocarpum</i>	Ni	13500	Li, Y.M., Chaney, R., et al, Plant Soil 249, pp. 107-115, 2003
<i>Alyssum serpyllifolium</i>	Ni	10000	Prasad, M.N.V., Braz. J. Plant Physiol. 17, pp. 113-128, 2005
<i>Azolla pinnata</i>	Cd	740	Rai, P.K., Int. J. Phytorem. 10, 430-439, 2008
<i>Berkheya coddii</i>	Ni	18000	Mesjasz-Przybylowicz, J., Nakonieczny, M., et al. Acta Biol. Cracov. Bot. 46, pp. 75-85, 2004
<i>Corrigiola telephifolia</i>	As	2110	Garcia-Salgado, S., Garcia-Casillas, D., et al., Water Air Soil Pollut. 223, pp. 559-572, 2012
<i>Eleocharis acicularis</i>	Cu	20200	Sakakibara, M., Ohmori, Y., et al., Clean: Soil, Air, Water 39, pp. 735-741, 2011
	Zn	11200	
	Cd	239	
	As	1470	
<i>Euphorbia cheiradenia</i>	Pb	1138	Chehre gani, A., Malayeri, B.E., Int. J. Agri. Biol. 9, pp. 462-465, 2007

<i>Isatis pinnatifida</i>	Ni	1441	Altinozlu, H., Karagoz, A., et al., Turk. J. Bot. 36, pp. 269–280, 2012.
<i>Pteris biaurita</i>	As	~2000	Srivastava, M., Ma, L.Q., Santos, J.A.G., Sci. Total Environ. 364, pp. 24–31, 2006
<i>Pteris cretica</i>	As	~1800	Srivastava, M., Ma, L.Q., Santos, J.A.G., Sci. Total Environ. 364, pp. 24–31, 2006
		2200- 3030	Zhao, F.J., Dunham, S.J., McGrath, S.P., New Phytol., pp. 156, 27–31, 2002
<i>Pteris quadriaurita</i>	As	~2900	Srivastava, M., Ma, L.Q., Santos, J.A.G., Sci. Total Environ. 364, pp. 24–31, 2006
<i>Pteris ryukyuensis</i>	As	3647	Srivastava, M., Ma, L.Q., Santos, J.A.G., Sci. Total Environ. 364, pp. 24–31, 2006
<i>Pteris vittata</i>	As	8331	Kalve, S., Sarangi, B.K., et al., Curr. Sci. 100, pp. 888–894, 2011
		~1000	Baldwin, P.R., Butcher, D.J., Microchem. J. 85, pp. 297–300, 2007
	Cr	20675	Kalve, S., Sarangi, B.K., et al., Curr. Sci. 100, pp. 888–894, 2011
<i>Rorippa globosa</i>	Cd	> 100	Wei, S., Zhou, Q., Saha, U.K., Water Air Soil Pollut. 192, pp. 173–181, 2008
<i>Schima superba</i>	Mn	62.412,30	Yang, S.X., Deng, H., Li, M.S., . Plant Soil Environ. 54, pp. 441–446, 2008
<i>Solanum photeinocarpum</i>	Cd	158	Zhang, X., Xia, H., et al., J. Hazard. Mater. 189, pp. 414–419, 2011
<i>Thlaspi caerulescens</i>	Cd	263	Lombi, E., Zhao, F.J., et al., J. Environ. Qual. 30, pp. 1919–1926, 2001

## Πίνακας 2: Φυτά- υπερσυσσωρευτές (Ahmadpour, 2012)

Φυτό	Μέταλλο	Αναφορά
<i>Clerodendrum infortunatum</i>	Cu	Rajakaruna N, Böhm BA, 2002, J. Appl. Botany-Angewandte Botanik 76:20-28.
<i>Croton bonplandianus</i>	Cu	Rajakaruna N, Böhm BA, 2002, J. Appl. Botany-Angewandte Botanik 76:20-28.
<i>Thordisa villosa</i>	Cu	Rajakaruna N, Böhm BA, 2002, J. Appl. Botany-Angewandte Botanik 76:20-28.
<i>Pityrogramma calomelanos</i>	As	Dembitsky VM, Rezanka T., 2003, Plant Sci. 165(6):1177-1192.
<i>Pistia stratiotes</i>	Zn, Pb, Ni, Hg, Cu, Cd, Ag, Cr	Odjegba VJ, Fasidi IO, 2004, Ecotoxicology 13(7):637-646.
<i>Alyssum lesbiacum</i>	Ni	Cluis C., 2004, BioTech J. 2:61-67.



<i>Helicotylenchus indicus</i>	Pb	Sekara A, Poniedzialek M, Ciura J, Jedrszczyk E., 2005, Polish J. Environ. Stud. 14(4):509-516.
<i>Bidens pilosa</i>	Cd	Sun Y, Zhou Q, Wang L, Liu W, 2009, J. Hazard. Mater. 161(2-3): 808-814.
<i>Thlaspi caerluescens</i>	Cd, Zn, Pb	Cluis C., 2004, BioTech J. 2:61-67 Banasova V, Horak O, Nadubinska M, Ciamporova M., 2008, Int. J. Environ. Pollut. 33(2):133-145.
<i>Lonicera japonica</i>	Cd	Liu Z et al., 2009, Thunb. J. Hazard. Mater. 169(1-3):170-175.
<i>Solanum nigrum L.</i>	Cd	Sun Y, Zhou Q, Diao C., 2008, Bioresour. Technol. 99(5):1103-1110.
<i>Sedum alfredii</i>	Cd	Sun Q et al., 2007, J. Plant Physiol. 164(11):1489-1498.
<i>Brassica juncea</i>	Ni, Cr	Saraswat S, Rai JPN, 2009, Chem. Ecol. 25(1):1-11.

Η διαδικασία μεταφοράς των μετάλλων συντελείται σε τρεις φάσεις: α) δέσμευση των μεταλλικών ιόντων από τις ρίζες, β) μεταφορά προς τα υπέργεια τμήματα του φυτού και γ) απελευθέρωση των ιόντων στα ξυλώδη μέρη του φυτού. Ωστόσο, οι μηχανισμοί που διέπουν τις διαδικασίες συσσώρευσης και αποθήκευσης δεν είναι γνωστοί, ενώ όσον αφορά τη μεταφορά αυτή πιστεύεται ότι γίνεται με τη βοήθεια πρωτεϊνών που δεν έχουν όμως, προς το παρόν, αναγνωριστεί. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο στην συσσώρευση των μετάλλων παίζει και το τρίχωμα του φυτού. Π.χ. το τρίχωμα του φυτού «ινδική μουστάρδα» έχει την ιδιότητα να αποθηκεύει κάδμιο ακόμα και 40 φορές περισσότερο από τα φύλλα του (Αργύρης, 2009).

#### • Ανθεκτικότητα των φυτών

Η μέχρι τώρα έρευνα δείχνει ότι μόνο μικρός αριθμός φυτικών ειδών μπορεί να μείνει ανεπηρέαστος σε κάποιο τοξικό μέταλλο. Γενικά, κατά την αναπαραγωγή των φυτών αναπτύσσονται μηχανισμοί που προστατεύουν τις νεότερες γενιές φυτών και δεν αναπτύσσουν γονίδια ανεκτικά σε βαρέα μέταλλα και επομένως η εμφάνιση τέτοιων ειδών γίνεται είτε τυχαία είτε προκαλείται από το ρύπο (Pulford, 2003).

Η ενδεχόμενη ανθεκτικότητα του εκάστοτε φυτού (Αργύρης, 2009):

- είναι εξειδικευμένη για συγκεκριμένο μέταλλο, αν και είναι δυνατόν σε εδάφη επιβαρυσμένα με περισσότερα μέταλλα, να αναπτυχθούν φυτά με πολλαπλή ανθεκτικότητα,
- παρουσιάζει διαβάθμιση ακόμα και ανάμεσα σε εκπροσώπους του ίδιου είδους,
- αποτελεί χαρακτηριστικό το οποίο κληρονομείται και δεν επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος ή του εδαφικού υποστρώματος,.
- αναπτύσσεται σχετικά σύντομα (τάξη δεκαετίας),
- είναι να δυνατόν να αναπτυχθεί σε χώρους που περιβάλλονται ή συνορεύουν από μη ανθεκτικά φυτικά είδη.

#### • Φυτοδιαθεσιμότητα βαρέων μετάλλων

Η βιοδιαθεσιμότητα και η φυτοδιαθεσιμότητα είναι όροι που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τον βαθμό στον οποίο είναι διαθέσιμα οι προσμείξεις για απορρόφηση ή πρόσληψη από ζωντανούς οργανισμούς που εκτίθενται σε αυτές. Τα φυτά αποκρίνονται μόνο στο κλάσμα που είναι φυτοδιαθέσιμο σε αυτά. Για τη φυτοεξυγίανση εδαφών από βαρέα μέταλλα, η βιοδιαθεσιμότητα των μετάλλων, είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που ρυθμίζει την πρόσληψη βαρέων μετάλλων από τα φυτά. Ωστόσο, η φυτοδιαθεσιμότητα των μετάλλων είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο που εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων, όπως (Laghlimi, 2015):

- Το pH του εδάφους: επηρεάζει άμεσα τη φυτοδιαθεσιμότητα των μετάλλων, καθώς η οξύτητα του εδάφους καθορίζει τη διαλυτότητα του μετάλλου και την ικανότητα μετακίνησης στο έδαφος. Τα μεταλλικά κατιόντα είναι τα πιο κινητά υπό όξινες συνθήκες ενώ τα ανιόντα

τείνουν να απορροφούν ορυκτά οξείδια σε αυτή την περιοχή pH. Έτσι, σε χαμηλό pH, η βιοδιαθεσιμότητα μετάλλων αυξάνεται όσο περισσότερο τα μέταλλα απελευθερώνονται στο έδαφος λόγω ανταγωνισμού με ιόντα H<sup>+</sup>. Σε υψηλό pH, τα κατιόντα κατακρημνίζονται ή προσροφούνται σε ορυκτές επιφάνειες και τα μεταλλικά ανιόντα κινητοποιούνται. Σε ουδέτερο ή αλκαλικό pH, όσο μεγαλύτερο το pH τόσο τα μέταλλα στο έδαφος δεν είναι διαθέσιμα στα φυτά, ειδικά τα Pb και Cr είναι εγγενώς ακίνητα. Σε εδάφη με χαμηλό pH, η μεταλλική κινητικότητα μειώνεται με τη σειρά: Cd > Ni > Zn > Mn > Cu > Pb. Σύμφωνα με τη φυτο- διαθεσιμότητα τους, έχουν οριστεί τέσσερις ομάδες βαρέων μετάλλων:

ο ασθενώς διαλυτό στο έδαφος, απορροφούμενο από τα φυτά σε ιχνοστοιχεία (Cr, Ag),

ο στοιχεία που απορροφούνται σχετικά εύκολα από τις ρίζες, αλλά μεταφέρονται ασθενώς στους βλαστούς (Hg, Pb)

ο στοιχεία που απορροφώνται εύκολα και μεταφέρονται στους βλαστούς (Zn, Cu, Ni)

ο στοιχεία που αποτελούν κίνδυνο για την τροφική αλυσίδα (Co, Cd)

- Η υφή του εδάφους: αντικατοπτρίζει την κατανομή μεγέθους σωματιδίων του εδάφους και συνεπώς την περιεκτικότητα του σε λεπτά σωματίδια όπως οξείδια και πηλό. Η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων μπορεί να επηρεάσει το επίπεδο ρύπανσης από μέταλλα σε ένα έδαφος. Τα λεπτά σωματίδια (<100 μm) είναι πιο δραστικά και έχουν υψηλότερη επιφάνεια από το χοντρότερο υλικό. Έτσι, το λεπτό κλάσμα του εδάφους συχνά περιέχει το μεγαλύτερο μέρος της μόλυνσης.
- Το οργανικό υλικό του εδάφους: συχνά κατέχει κυρίαρχο ρόλο στον έλεγχο της συμπεριφοράς των ιχνοστοιχείων στο έδαφος. Η οργανική ύλη είναι ένας από τους παράγοντες που μπορούν να μειώσουν την ικανότητα των μετάλλων να είναι φυτοτοξικά στο έδαφος λόγω μεταλλο-οργανικής συμπλοκοποίησης. Αύξηση της ποσότητας των οργανικών υλικών συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση της απορρόφησης βαρέων μετάλλων από τα φυτά. Τα εδάφη με σχετικά χαμηλή συγκέντρωση οργανικών ουσιών είναι πιο ευαίσθητα σε μόλυνση από ιχνοστοιχεία. Τροποποιήσεις, μέσω λιπασμάτων, μολυσμένων εδαφών που περιέχουν ασταθή στοιχεία μειώνουν τη συνολική βιοδιαθεσιμότητα των μετάλλων λόγω διεργασιών προσρόφησης.
- Οξειδοαναγωγικό δυναμικό: είναι μία από τις πιο ιδιότητες του εδάφους που επηρεάζουν τις μεταβολές των μεταλλικών ειδών. Το οξειδοαναγωγικό δυναμικό στο έδαφος καθορίζεται από αντιδράσεις οξειδοαναγωγής που προκύπτουν από τη μικροβιακή δραστηριότητα. Οι αντιδράσεις αυτές μετατρέπουν τους ρύπους σε μη επικίνδυνες ή λιγότερο τοξικές ενώσεις που είναι πιο σταθερές, λιγότερο κινητές ή/και αδρανείς. Ωστόσο, στα εδάφη αυτές οι αντιδράσεις τείνουν να είναι σχετικά αργές. Έλλειψη οξυγόνου στο έδαφος αυξάνει την κινητικότητα του μεγάλου μέρους των βαρέων μετάλλων.
- Ριζική ζώνη: η ρίζα του φυτού μπορεί να επηρεάσει τη φυτοδιαθεσιμότητα των βαρέων μετάλλων τροποποιώντας τις ιδιότητες του εδάφους κοντά στη ριζόσφαιρα. Τα φυτικά ένζυμα που εκκρίνονται από τις ρίζες διαδραματίζουν βασικό ρόλο στον μετασχηματισμό και τη χημική συσσώρευση των βαρέων μετάλλων στα εδάφη, τα οποία διευκολύνουν την πρόσληψη τους από τα φυτά. Ανάμεσα στις δραστηριότητες στις ρίζες των φυτών, που αυξάνουν τη διαλυτότητα των μετάλλων περιλαμβάνονται η όξυνση / αλκαλοποίηση και η τροποποίηση του δυναμικού οξειδοαναγωγής. Ωστόσο, η αυξημένη κινητικότητα των βαρέων μετάλλων δεν συνδέεται αναγκαστικά με την αυξημένη πρόσληψη τους στα φυτά.
- Χαρακτηριστικά των βαρέων μετάλλων: η κινητικότητα των ιχνοστοιχείων, η βιοδιαθεσιμότητά τους και η σχετική οικοτοξικότητα στα φυτά εξαρτώνται έντονα από τα χαρακτηριστικά των μετάλλων. Οι χημικές μορφές των βαρέων μετάλλων στο έδαφος επηρεάζουν σημαντικά την κινητικότητά τους. Τα πιο κινητά στοιχεία περιλαμβάνουν τα Cd, Zn και Mo, ενώ τα λιγότερο κινητά είναι τα Cr, Ni και Pb .

- **Φυτικά είδη:** διαφέρουν σημαντικά όσον αφορά την ικανότητά τους να συσσωρεύουν βαρέα μέταλλα. Πολλοί ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι συγκεντρώσεις των μετάλλων σε φυτά που καλλιεργούνται στο ίδιο έδαφος ποικίλλουν μεταξύ των ειδών και ακόμη και μεταξύ των γονότυπων ενός είδους. Μερικοί από τους μηχανισμούς, οι οποίοι μπορεί να είναι υπεύθυνοι για τις διαφορές των φυτικών ειδών είναι: η αρχιτεκτονική της ρίζας, η χρήση του νερού, η χημεία της ριζόσφαιρας, ο τύπος και η συγγένεια των πρωτεϊνών- μεταφορέων των μετάλλων από τη ρίζα στην επιφάνεια, καθώς και η συγκέντρωση και κινητικότητα των μετάλλων. Επίσης, η ηλικία και το στάδιο ανάπτυξης του φυτού μπορεί να επηρεάσει τη συγκέντρωση των μετάλλων στα φυτά.

- **Συστήματα φυτοεξυγίανσης**

Για την εφαρμογή της φυτοεξυγίανσης δεν απαιτείται ιδιαίτερος εξοπλισμός. Συγκεκριμένα χρειάζονται τα κατάλληλα φυτά, εξοπλισμός για την φροντίδα τους (άρδευση, κλάδεμα) και την προστασία τους (περίφραξη). Επιπλέον, όσον αφορά στην παρακολούθηση της απόδοσης του συστήματος απαιτούνται όργανα δειγματοληψίας εδάφους, μέτρησης των φυσικοχημικών παραμέτρων του (π.χ. pH, υγρασία) και παρακολούθησης των καιρικών συνθηκών (π.χ. θερμοκρασία) (Γιδαράκος, 2009).

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος φυτοεξυγίανσης εξαρτάται από το είδος του ρύπου και του φυτού, καθώς και τις περιβαλλοντικές συνθήκες στην περιοχή ενδιαφέροντος. Συνήθως, πριν την εφαρμογή, πραγματοποιούνται εργαστηριακές μετρήσεις προκειμένου να προσδιοριστούν κρίσιμοι για το σχεδιασμό, παράμετροι, όπως π.χ. ο ρυθμός αποικοδόμησης των φυτών, το ποσοστό βιοδιαθεσιμότητας τους στο έδαφος ή το υπόγειο νερό, οι βέλτιστες συνθήκες ανάπτυξης των φυτών. Σε κάθε περίπτωση όμως οι παράμετροι που προσδιορίζονται αφορούν (Τρουλλινός, 2009):

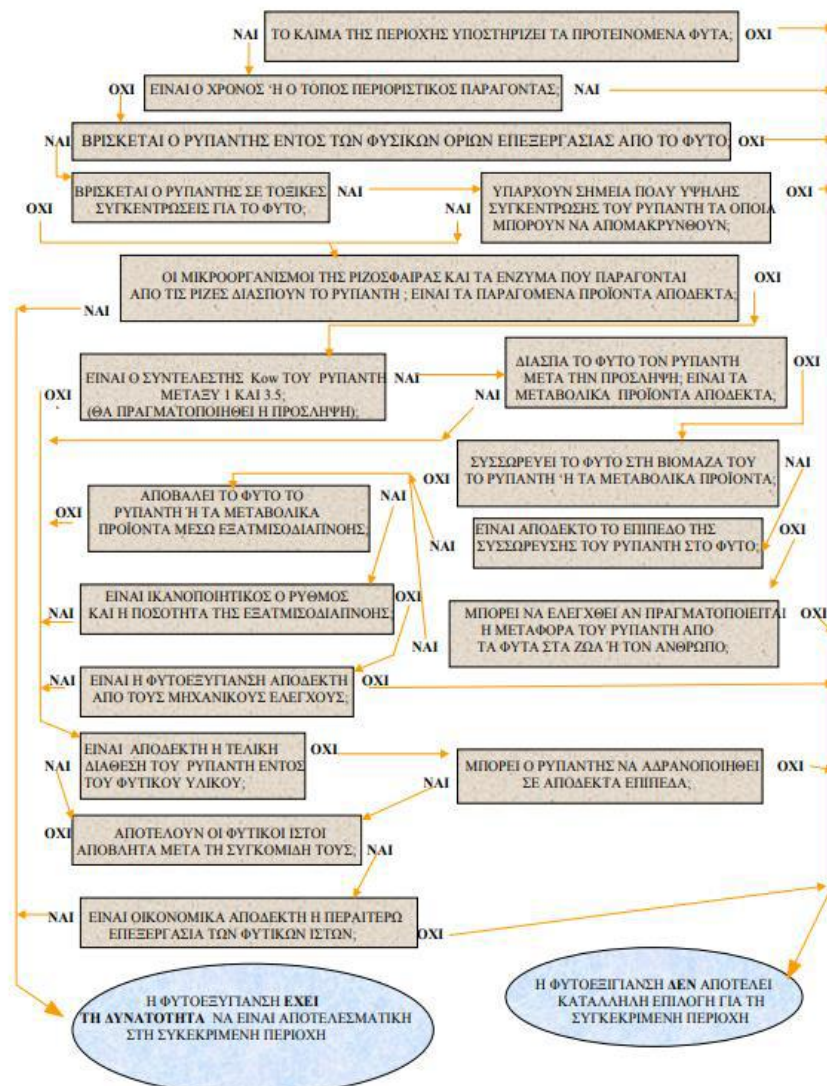
□ **Είδος και συγκέντρωση ρύπων:** Προσδιορίζεται το είδος και η συγκέντρωση των ρύπων, καθώς και το βάθος της ρύπανσης. Στην περίπτωση που αυτοί είναι οργανικοί πρέπει επιπλέον, να υπολογισθεί η δομή, η λιποφιλικότητα και προσροφητική τους ικανότητα. Σημαντική, επίσης, παράμετρος, αποτελεί και η υδροφιλικότητα του ρύπου, που προσδιορίζεται μέσω του συντελεστή  $K_{ow}$  (= λόγος των συγκεντρώσεων ισορροπίας του ρύπου στην οκτανόλη και το νερό) και πρέπει να είναι μεταξύ 1 και 3,5 (υδρόφιλοι ρύποι).

□ **Επιλογή φυτών:** Η επιλογή των φυτών που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτάται από την εκάστοτε τεχνική φυτοεξυγίανσης, το πεδίο προς απορρύπανση και το είδος του ρυπαντή. Τα φυτικά είδη επιλέγονται με βάση το βάθος των ριζών τους, τη φύση του εδάφους και των προσμειξεων του και τις κλιματολογικές συνθήκες. Το βάθος της ρίζας επηρεάζει άμεσα το βάθος του εδάφους που μπορεί να αποκατασταθεί. Διαφέρει πολύ μεταξύ των διαφόρων τύπων φυτών και μπορεί επίσης να ποικίλει σημαντικά για ένα είδος ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες όπως τη δομή του εδάφους, τη γονιμότητα του εδάφους, το μέγεθος της καλλιέργειας, τη συγκέντρωση των μολυσματικών ουσιών κ.α. Τα βάθη καθαρισμού είναι <1m για τα χόρτα, < 3m για θάμνους και < 6m για βαθιά ριζωμένα δέντρα. Γενικά, τα χόρτα χρησιμοποιούνται συχνότερα, καθώς σε σύγκριση με δέντρα, θάμνους και ποώδη φυτά, έχουν ταχεία ανάπτυξη, μεγάλη ποσότητα βιομάζας, ισχυρή αντίσταση, σημαντική ικανότητα σταθεροποίησης των εδαφών και ικανότητας αποκατάστασης διαφόρων τύπων εδαφών. Επιπλέον, τα χόρτα προσαρμόζονται πιο εύκολα σε αντίξοες συνθήκες, όπως σε εδάφη με χαμηλή περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά. Η μεγάλη επιφάνεια των ινωδών ριζών τους και η εντατική διείσδυσή τους στο έδαφος μειώνουν την έκπλυση, την απορροή και την διάβρωση μέσω σταθεροποίησης του εδάφους και προσφέρει πλεονεκτήματα για τη φυτοεξυγίανση. Από την άλλη, οι θάμνοι και τα δέντρα παράγουν εκτεταμένη κάλυψη και παράγουν βαθιές ρίζες για να αποτρέψουν τη διάβρωση μακροπρόθεσμα. Επιπλέον, παρέχουν υψηλή περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά στο χορτάρι, μειώνοντας παράλληλα την πίεση

του νερού και βελτιώνοντας τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους. Πολλά δέντρα μπορούν να αναπτυχθούν σε περιοχή με χαμηλή ποιότητα, καθώς έχουν μεγάλα ριζικά συστήματα και η υπέργεια βιομάζα τους μπορεί να συλλεχθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μην διαταράσσεται η περιοχή. Ωστόσο, το κόστος για τη φύτευση δέντρων είναι υψηλό και ο ρυθμός ανάπτυξης τους είναι χαμηλός. Για να επιτευχθεί μια σταθερή επίμονη κάλυψη, είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθεί μια μικτή καλλιέργεια και να συνδυαστούν χόρτα, θάμνοι και δέντρα (Laghlimi, 2015).

□ **Συντήρηση φυτών:** Αφορά σε όλες τις ενέργειες ενίσχυσης της ανάπτυξης (άρδευση, προσθήκη λιπασμάτων) και προστασίας (ειδικοί ψεκασμοί) των φυτών.

□ **Συγκομιδή φυτών:** Η συγκομιδή και απομάκρυνση των φυτών λαμβάνει χώρα μετά την απορρύπανση της περιοχής. Η περαιτέρω επεξεργασία τους εξαρτάται από την τοξικότητα του ρύπου και των προϊόντων του και συνήθως αφορά σε καύση, κομποστοποίηση ή διάθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής. Στο παρακάτω λογικό διάγραμμα παρουσιάζεται μια τυπική διαδικασία λήψης απόφασης για την καταλληλότητα εφαρμογή της φυτοεξυγίανσης σε δεδομένο πεδίο.



**Εικόνα 3.1:** Διάγραμμα ροής για την εφαρμογή της φυτοεξυγίανσης. Πηγή: (Ζαμπετάκης, Μανιός, & Καρατζάς, 2005).

Σε γενικές γραμμές τα βήματα που ακολουθούνται είναι (Γιδαράκος, 2009):

**1) Εκτίμηση του επιπέδου ρύπανσης:**

- ο χαρακτηρισμός του πεδίου
- ο χαρακτηρισμός ρύπων
- ο προσδιορισμός νομοθετικών ορίων
- ο προσδιορισμός στόχου απορρύπανσης

**2) Αξιολόγηση του πεδίου:**

- ο υπολογισμός βάθους ρύπανσης, φυσικοχημικών παραμέτρων, γεωλογικών συνθηκών
- ο επιλογή της κατάλληλης μεθόδους φυτοεξυγίανσης
- ο συλλογή όλων των απαραίτητων στοιχείων για την εφαρμογή
- ο επιλογή των κατάλληλων φυτών

**3) Προκαταρκτικές μελέτες:**

- ο εργαστηριακές ή/ και πιλοτικές μελέτες εκτίμησης της αναμενόμενης απόδοσης,
- ο αναθεώρηση της μεθόδου φυτοεξυγίανσης, του φυτού ή των παραμέτρων υλοποίησης, εφόσον κριθεί απαραίτητο

**4) Εφαρμογή της τεχνολογίας σε πλήρη κλίμακα:**

- ο Σχεδιασμός, κατασκευή, συντήρηση και λειτουργία

**5) Αξιολόγηση της απόδοσης και πιθανές μετατροπές**

Τέλος, προκειμένου για την ορθή και αποδοτική υλοποίηση ενός προγράμματος φυτοεξυγίανσης είναι σημαντικό να παρακολουθούνται ορισμένες κρίσιμες παράμετροι (βλ. πίνακα 3).

**Πίνακας 3: Παράμετροι παρακολούθησης συστημάτων φυτοεξυγίανσης (Γιδαράκος, 2009).**

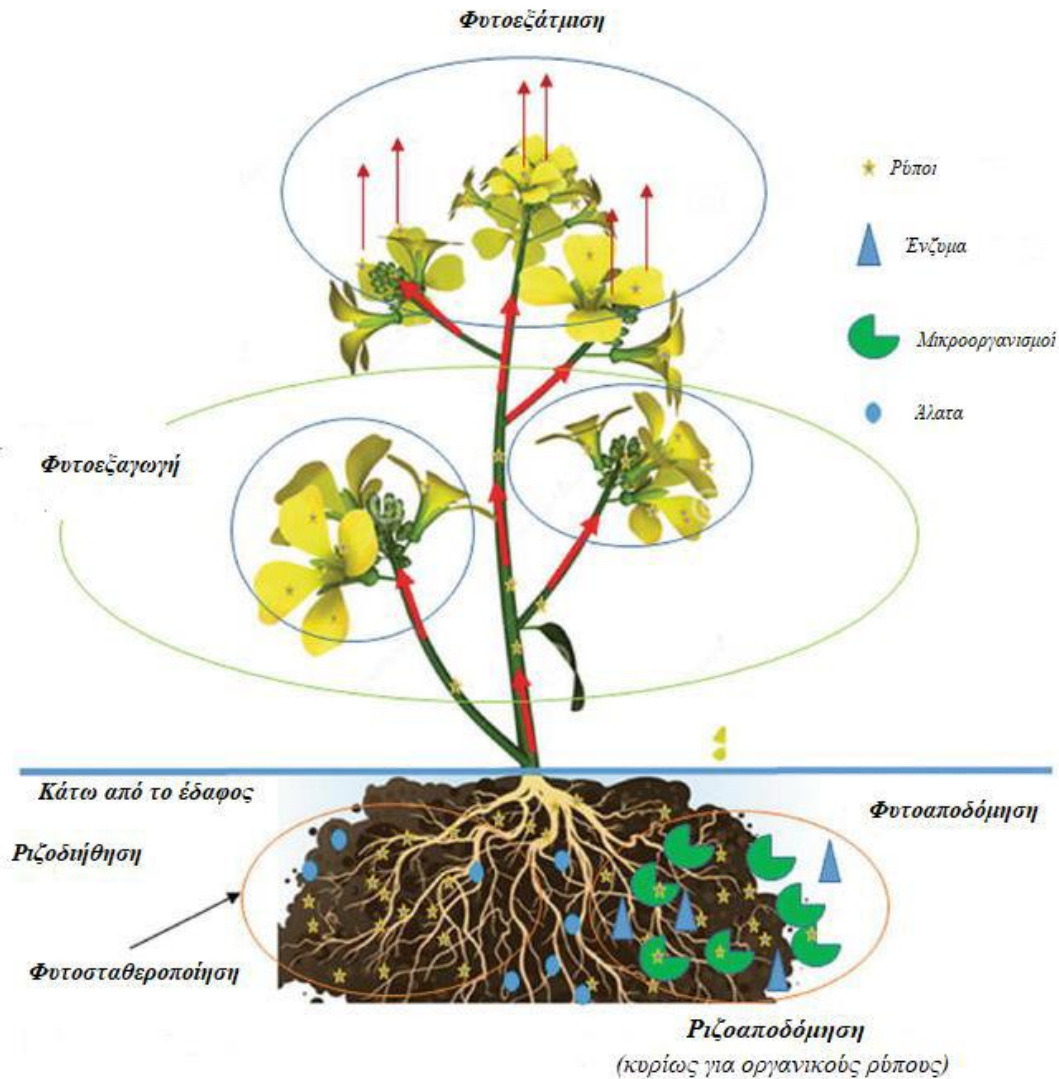
Παράμετρος	Λόγος παρακολούθησης
<i>Κλιματολογικά Δεδομένα</i>	
Θερμοκρασία	Ανάγκη συντήρησης (πότισμα)
Σχετική υγρασία	
Ηλιοφάνεια	
Διεύθυνση και ένταση ανέμων	
<i>Φυτά</i>	
«Οπτικά» χαρακτηριστικά (ζωτικότητα, σημάδια υποανάπτυξης, ζημιές από έντομα ή ζώα κ.α.)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Συντήρηση (αντικατάσταση φυτών, λίπανση, χρήση</li></ul>

Σύσταση (ρίζες, φύλλα κλπ)	φυτοφαρμάκων κτλ) • Ποσοτικοποίηση ρύπων και παραπροϊόντων τους • Ποσοτικοποίηση / πρόβλεψη λειτουργίας «συστήματος»
Αέρια αναπνοής	
Ρυθμός αναπνοής	
Πυκνότητα ριζών	
<i>Έδαφος</i>	
Γεωχημικές παράμετροι (pH, θρεπτικά συστατικά, υγρασία, οξυγόνο κ.α.)	• Βελτιστοποίηση ανάπτυξης φυτού και μικροβιακού φορτίου • Εκτίμηση ισοζυγίου νερού και ρυθμού εξατμισοδιαπνοής • Ποσοτικοποίηση ρύπων και παραπροϊόντων τους • Ποσοτικοποίηση / πρόβλεψη λειτουργίας «συστήματος»
Μικροβιακός πληθυσμός	
Επίπεδα ρύπων και παραπροϊόντων τους	
<i>Υπόγειο νερό</i>	
Χαρακτηριστικά υδροφορέα (διεύθυνση και ταχύτητα ροής, στάθμη υδροφόρου ορίζοντα)	• Ποσοτικοποίηση ρύπων και παραπροϊόντων τους • Ποσοτικοποίηση / πρόβλεψη λειτουργίας «συστήματος»
Επίπεδα ρύπων και παραπροϊόντων τους	

### 3.2 Τεχνολογίες Φυτοεξυγίανσης

Η φυτοεξυγίανση όπως αναφέρθηκε και παραπάνω βασίζεται στη χρήση των φυτών και στη μεταβολική δραστηριότητα μικροοργανισμών που απαντώνται στο έδαφος. Τα φυτά ωστόσο έχουν το κυρίαρχο λόγο στην απομάκρυνση ρύπων από το έδαφος τα οποία έχουν την φυσική ικανότητα μέσω διάφορων μηχανισμών να απομακρύνουν τους ρύπους, οι σημαντικότεροι από αυτούς τους μηχανισμούς είναι:

- η φυτοεξαγωγή (phytoextraction)
- η ριζοδιήθηση (rhizofiltration),
- η φυτοσταθεροποίηση (phytostabilization),
- η φυτοαποδόμηση (phytodegradation),
- η ριζοαποδόμηση (rhizodegradation)
- και η ριζοεξάτμιση (phytovolatilization) (Adiloğlu, 2016; Ali et al., 2013).



Εικόνα 3.2: Τεχνικές φυτοεξυγίανσης. Πηγή: (Adiloğlu, 2016)

- **Φυτοεξαγωγή (Phytoextraction)**

Αναφέρεται και ως φυτοσυσσώρευση (phytoaccumulation) και συνίσταται σε μεταφορά των ρύπων από το έδαφος στα άνω μέρη του φυτού (βλαστοί, φύλλα κ.λπ.).

Τα φυτά που χρησιμοποιούνται, ανήκουν στην κατηγορία των υπερσυσσωρευτών και επομένως εμφανίζουν υψηλή ικανότητα συσσώρευσης μετάλλων. Επιπλέον και προκειμένου να είναι εφαρμόσιμη η μέθοδος, τα φυτά θα πρέπει να (Παπαφιλιππάκη, 2004):

- διαθέτουν ικανότητα μεταφοράς των μετάλλων που προσροφούν με τις ρίζες τους προς τα υπέργεια τμήματα τους σε υψηλά ποσοστά
- παράγουν μεγάλες ποσότητες φυτικής βιομάζας
- διαθέτουν μηχανισμούς αποτοξίνωσης ή ανοχής στις υψηλές ποσότητες μετάλλων

Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται κυρίως από (Παπαφιλιππάκη, 2004):

- τη βιοδιαθεσιμότητα του μετάλλου στη ριζόσφαιρα
- την ικανότητα των ριζών να προσλαμβάνουν μέταλλα
- την ικανότητα του φυτού να μεταφέρει τα μέταλλα
- την ικανότητα του φυτού να αποθηκεύει τα μέταλλα στους βλαστούς του
- την ανθεκτικότητα του φυτού στην τοξικότητα των μετάλλων

Για την ενίσχυση της κινητικότητας και βιοδιαθεσιμότητας των μετάλλων στο έδαφος, συχνά χρησιμοποιούνται χηλικές ενώσεις. Π.χ. το αιθυλενοδιαμινοτετραοξικό οξύ (EDTA) διαλυτοποιεί με επιτυχία τον μόλυβδο, ενώ παράλληλα εμποδίζει την συγκράτηση του στα κυτταρικά τοιχώματα του φυτού. Άλλα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της φυτοεξυγίανσης είναι (Meers, 2008):

#### (A) Ανόργανα:

□ Αλογόνα: Αναφέρεται η αυξημένη πρόσληψη Cd από το φυτό *Solanum tuberosum* παρουσία χλωριδίων. Γενικά έχει αποδειχθεί, ότι η προσθήκη χλωρίου οδηγεί σε χλωριωμένα υδατοδιαλυτά σύμπλοκα, ειδικά με τα μέταλλα Cd, Hg, Pb και Zn.

□ Ισοθειοκυανικά και κυανίδια: Έχει αποδειχθεί η αύξηση της πρόσληψης χρυσού από καφέ μουστάρδα (*Brassica juncea*) μετά από προσθήκη, στο έδαφος, του διαλυτοποιητικού παράγοντα  $\text{NH}_4\text{SCN}$ . Έτσι, η προσθήκη 4 mmol/ kg οδήγησε σε πρόσληψη  $2 \pm 0,5$  mg/ kg Au. Σημειώνεται, ότι στα ανεπεξέργαστα εδάφη η πρόσληψη χρυσού ήταν κάτω από 0,1 mg/ kg). Το ίδιο αποτέλεσμα και μάλιστα σε μεγαλύτερη ένταση παρουσίασε η προσθήκη NaCN (προσθήκη 3 mmol/kg οδήγησε σε πρόσληψη  $39 \pm 1,1$  mg/ kg). Την ίδια συμπεριφορά παρουσίασε και η πρόσληψη του Cu. Συγκεκριμένα, αυτή αυξήθηκε από  $50 \pm 36$  mg/ kg (εδάφη χωρίς επεξεργασία) σε  $133 \pm 11$  mg/ kg (εδάφη με προσθήκη  $\text{NH}_4\text{SCN}$ ) και  $541 \pm 14$  mg/ kg (εδάφη με προσθήκη NaCN).

□ Στοιχειακό θείο: Αποδεικνύεται ότι η όξυνση του εδάφους μέσω προσθήκης στοιχειακού θείου οδηγεί σε αυξημένη πρόσληψη του Zn από την ιτιά (*Salix viminalis*) και το ηλιοτρόπιο (*Helianthus annuus*). Συγκεκριμένα, προσθήκη Zn 100 mmol/ kg S οδήγησε σε αύξηση των συγκεντρώσεων Zn από 930 mg/ kg σε 4300 mg/ kg στην πρώτη περίπτωση και σε 3812 mg/ kg (από 1101 mg/ kg) στη δεύτερη. Το ίδιο αποτέλεσμα παρατηρείται και με άλλα είδη φυτών όπως το καλαμπόκι (*Zea mays*) και τον καπνό (*Nicotiana tabacum*). Παρόλα αυτά η προσθήκη θείου δεν φαίνεται να επηρεάζει την πρόσληψη του Cd και Pb.

□ Υπεροξειδίο του υδρογόνου: Η προσθήκη υπεροξειδίου του υδρογόνου αυξάνει τη βιοδιαθεσιμότητα των μετάλλων. Έχει παρατηρηθεί η αύξηση της διαλυτότητας του Zn και του Cu μετά από επεξεργασία του εδάφους με 0,17-0,35 ml  $\text{H}_2\text{O}_2$ / kg εδάφους.

#### (B) Οργανικά οξέα

Είναι γνωστός ο ρόλος των ριζικών εκκρίσεων του φυτού, που περιέχουν οργανικά οξέα (π.χ. όξινες φωσφατάσες, φαινολικά), στην ικανότητα αυτού να προσλαμβάνει απαραίτητα θρεπτικά συστατικά από το έδαφος. Αυτά τα, χαμηλού μοριακού βάρους, οργανικά οξέα οδηγούν σε διαλυτοποίηση των ανόργανων θρεπτικών συστατικών και σχηματισμών οργανικών αλάτων που είναι εύκολο να απορροφηθούν από το φυτό. Η συγκέντρωση των οργανικών οξέων στο έδαφος είναι συνήθως χαμηλές ( $10^{-7}$  έως  $10^{-6}$  M). Παρόλα αυτά, μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ( $10^{-4}$  με  $10^{-3}$  M) εμφανίζονται στην περίπτωση καλλιεργούμενων φυτών με συστάδες ριζών. Σε κάθε περίπτωση, η προσθήκη οργανικών οξέων στο έδαφος υποβοηθά την ικανότητα πρόσληψης μετάλλων από τα φυτά. Π.χ. η προσθήκη κιτρικού και μηλικού οξέος αυξάνει την πρόσληψη φωσφόρου, ενώ η επεξεργασία του εδάφους με ασκορβικό οξύ οδηγεί σε αύξηση της πρόσληψης του καδμίου. Επιπλέον, το κιτρικό οξύ έχει αποδειχθεί ικανό για την απορρόφηση του ψευδαργύρου και του ουρανίου από το έδαφος. Στην περίπτωση του ουρανίου η προσθήκη 20 mmol/ kg κιτρικού οξέος οδηγεί σε αύξηση της πρόσληψης από 1,2 σε 240 mg/ kg). Παρόλα αυτά, ο κιτρικό οξύ δεν αποδεικνύεται ικανό να αυξήσει την κινητικότητα και βιοδιαθεσιμότητα των Cd, Cu, Pb, και Zn. Σημειώνεται, όμως ότι λόγω της υψηλής αποικοδόμησης των οργανικών οξέων, η εφαρμογή τους πρέπει να γίνεται πριν από τη συγκομιδή και όχι κατά την σπορά των φυτών. Έτσι, έχει αποδειχθεί ότι, η εφαρμογή του κιτρικού, του οξαλικού, του γαλακτικού, του ασκορβικού, του οξικού οξέος ή κυστεΐνης σε συγκέντρωση 2 mmol/ kg σε ασβεστολιθικά



εδάφη, 1 ημέρα πριν από τη σπορά δεν οδήγησαν σε σημαντικές αυξήσεις πρόσληψης των Cd, Cu, Pb και Zn από βλαστούς καλαμποκιού.

Σε τέτοιου τύπου εδάφη πρέπει να προστίθενται σημαντικά μεγαλύτερες ποσότητες (10- 100 φορές υψηλότερες) και μάλιστα νωρίς κατά την ανάπτυξη των φυτών, ώστε να αυξηθεί η πρόσληψη των βαρέων μετάλλων.

### **(Γ) Αμινοξέα**

Η χρήση νικοτιναμίνη έχει προταθεί για τη διευκόλυνση της μεταφοράς του Cu και του Zn στο ξύλινο μέρος και των Cu, Zn και Fe (II) στο φλοιό των φυτών. Επίσης, η ιστιδίνη φαίνεται να υποβοηθά την μεταφορά του Ni, όχι όμως και του Zn, στους βλαστούς.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι υπάρχουν πολλές ουσίες που μπορούν να προστεθούν στο έδαφος και να αυξήσουν την φυτοεξυγίανση τους. Σημειώνεται, όμως, ότι τα εδαφικά πρόσθετα που χρησιμοποιούνται για την κινητοποίηση των μετάλλων είναι τα ίδια δυνητικοί ρύποι της περιοχής (Pulford, 2003).

Σημαντικό πλεονέκτημα της φυτοεξυγίανσης αποτελεί το γεγονός ότι μέσω αυτής επιτυγχάνεται μόνιμη απορρύπανση του εδάφους, ενώ το μέταλλο μπορεί να ανακτηθεί από τη φυτική βιομάζα (Παπαφιλιππάκη, 2004). Αντίθετα, μερικά από τα μειονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν ο αργός ρυθμός ανάπτυξης των φυτών, το ρηχό ριζικό τους σύστημα και η μικρή παραγωγή βιομάζας (Γιδαράκος, 2009). Για λόγους σχετικούς με το κόστος, η βιομάζα που συλλέγεται γενικά αποτεφρώνονται ή μετατρέπεται σε λίπασμα και λιγότερο συχνά ανακυκλώνεται και επαναχρησιμοποιείται (Leguizamo, 2017).

#### **• Φυτοσταθεροποίηση (Phytostabilization)**

Χρησιμοποιείται ως εναλλακτική μέθοδος της φυτοεξαγωγής, όταν η τελευταία απαιτεί τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα επεξεργασίας, ώστε πρακτικά να καθίσταται αδύνατη. Σκοπός της φυτοσταθεροποίησης είναι η μείωση της κινητικότητας και βιοδιαθεσιμότητας των μετάλλων στο έδαφος. Τα φυτά που χρησιμοποιούνται είναι ανθεκτικά στα μέταλλα και τα ακινητοποιούν είτε μέσω της απορρόφησης/ προσρόφησης και συσσώρευσης τους στις ρίζες είτε μέσω της κατακρήμνισης τους μέσα στη ριζόσφαιρα. Η διαδικασία αυτή έχει πολλά οφέλη, καθώς έτσι, αποφεύγεται η μεταφορά των ρύπων είτε στους βλαστούς είτε στον υδροφόρο ορίζοντα και επιπλέον εμποδίζεται η διάβρωση του εδάφους και η μεταφορά των ρύπων σε άλλες περιοχές. Η μέθοδος προτιμάται όταν δεν απαιτείται απομάκρυνση των ρύπων και είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην απορρύπανση εδαφών από Pb, As, Cd, Cr, Cu, Zn. Χρησιμοποιείται συνήθως στην εξυγίανση περιοχών που λειτουργούσαν ως μεταλλεία, ενώ τα συνηθέστερα φυτά που αναπτύσσονται είναι τα *Cynodon dactylon*, *Festuca rubra*, *Typha latifolia* και *Phragmites australis* (Παπαφιλιππάκη, 2004). Η μέθοδος της φυτοσταθεροποίησης, ωστόσο, παρουσιάζει και αρκετά μειονεκτήματα, καθώς (Παπαφιλιππάκη, 2004):

- το έδαφος παραμένει ρυπασμένο,
- απαιτείται η προσθήκη λιπαντικών ή εδαφοβελτιωτικών ουσιών,
- δεν είναι σαφές αν η σταθεροποίηση των ρύπων οφείλεται στα εδαφοβελτιωτικά ή στα φυτά
- είναι αναγκαία η παρακολούθηση του πεδίου και της πορείας της κατεργασίας.

#### **• Φυτοδιάσπαση (Phytodegradation)**

Περιλαμβάνει διαδικασίες οι οποίες αποδομούν τον ρύπο είτε στο εσωτερικό του φυτού (μέσω του μεταβολισμού) είτε εξωτερικό του (στη ριζική περιοχή μέσω ενζύμων). Τα προϊόντα της διάσπασης ενσωματώνονται στο φυτικό ιστό ή απελευθερώνονται στο περιβάλλον. Η εν λόγω τεχνική χρησιμοποιείται συνήθως στην περίπτωση απορρύπανσης επιφανειακών εδαφών ή υπόγειων υδάτων (Τρουλλινός, 2009).

- **Φυτοεξαέρωση (Phytovolatilization)**

Στην περίπτωση αυτή οι ρύποι μετατρέπονται σε πτητικές μορφές και απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα, μέσω της διαπνοής των φυτών. Έχει το πλεονέκτημα να εφαρμόζεται χωρίς να απαιτείται η συγκομιδή των φυτών (Τρουλλινός, 2009). Συνήθως εφαρμόζεται στην απορρύπανση υπόγειων υδάτων, εδαφών και ιζημάτων (Tangahu, 2011) από πτητικά μέταλλα (π.χ. υδράργυρος, σελήνιο). Πλεονεκτεί ως προς το ότι οι ρύποι μετασχηματίζονται σε λιγότερο τοξικές μορφές. Υπάρχει, όμως, ο κίνδυνος οι ρύποι, μετά την απελευθέρωση τους στην ατμόσφαιρα, να επιστρέψουν στο έδαφος ή τους υδάτινους πόρους και να δημιουργηθούν τοξικότερες μορφές. Π.χ. όταν ο υδράργυρος εναποτεθεί σε επιφανειακά ύδατα μετατρέπεται σε τοξικό μέθυλο- υδράργυρο, μέσω αναερόβιων διαδικασιών. (Παπαφιλίππáκη, 2004).

- **Ριζοαποδόμηση (Rhizodegradation)**

Αφορά σε διάσπαση ή μετασχηματισμό των ρύπων στο έδαφος, μέσω μικροοργανισμών (μύκητες, βακτήρια) που αναπτύσσονται στην περιοχή των ριζών (ριζόσφαιρα). Οι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται με χρήση των ρυπογόνων ουσιών ως θρεπτικό υπόστρωμα και του οξυγόνου και νερού που μεταφέρονται διαμέσου των ριζών (Τρουλλινός, 2009). Οι ουσίες που απελευθερώνονται από τις ρίζες των φυτών, τα σάκχαρα, οι αλκοόλες και τα οξέα, περιέχουν οργανικό άνθρακα που αποτελεί τροφή για τους μικροοργανισμούς του εδάφους. Αποτέλεσμα είναι η δημιουργία μιας πυκνής ριζικής μάζας που προσροφά μεγάλες ποσότητες νερού. Η διαδικασία εφαρμόζεται κυρίως σε οργανικούς ρύπους που δεν βρίσκονται σε μεγάλα βάθη μέσα στο έδαφος (Tangahu, 2011). Στον παρακάτω πίνακα 4 φαίνεται το πεδίο εφαρμογής, δηλαδή ο ρύπος- υπόστρωμα, για διάφορα βακτήρια.

**Πίνακας 4: Τύποι βακτηρίων ανά ρύπο (Ζαμπετάκης, 2005)**

<b>Βακτήριο</b>	<b>Υπόστρωμα</b>
A chromobacter	Υδρογονάνθρακες (BT XE)
Acenitobacter	Υδρογονάνθρακες
Alcanigenes	Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες
Azotobacter	Υδρογονάνθρακες
Nitrosomonas	Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες
Nocardia	Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες
Pseudomonas	Υδρογονάνθρακες
Xanthobacter	Αλιφατικές ενώσεις

- **Ριζοδιήθηση (Rhizofiltration)**

Στην περίπτωση αυτή οι ρίζες βρίσκονται μέσα σε υδατικό διάλυμα του ρύπου, τον οποίον και προσροφούν. Η μέθοδος συνήθως εφαρμόζεται σε θερμοκήπια ή στην εξυγίανση επιφανειακών υδάτων και αποβλήτων χαμηλών επιπέδων ρύπανσης. Μπορεί δε να χρησιμοποιηθεί επιτόπια (in situ) ή απομακρυσμένα (ex situ). Στη δεύτερη περίπτωση, υπόγεια, κυρίως, ύδατα αντλούνται και μεταφέρονται σε τάφρους, όπου αναπτύσσονται τα κατάλληλα φυτικά είδη. Η απορρύπανση, μέσω ριζοδιήθησης, δεν γίνεται μόνο μέσω της απορρόφησης, αλλά και μέσω κατακρήμνισης των μετάλλων, λόγω των υγρών που εκκρίνονται από τους ιστούς των φυτών. Με το πέρας τη διαδικασίας, γίνεται συγκομιδή των

ριζών, από όπου ανακτώνται τα μέταλλα, ενώ τα μοσχεύματα των βλαστών μπορούν να φυτευτούν εκ νέου. Τα φυτά που χρησιμοποιούνται είναι υδροχαρή, όπως π.χ. ο ηλιάνθος, το σινάπι, το ρύζι, το καλαμπόκι, τα λέμνα, ο υάκινθος, τα καλάμια και τα βούρλα. (Παπαφιλιππάκη, 2004).

**Πίνακας 5:** Κριτήρια επιλογής φυτών ανά διεργασία φυτοεξυγίανσης (Laghlimi, 2015)

Διεργασία	Ορισμός	Στόχος	Ρύποι	Μέσο	Κριτήρια επιλογής φυτών
Φυτοεξαγωγή (Phytoextraction)	Πρόσληψη ρύπου από τις ρίζες των φυτών και μεταφορά του από το περιβάλλον σε βιομάζα	Εξαγωγή και δέσμευση του ρύπου	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Οργανικοί</li> <li>✓ Ανόργανοι</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Εδάφη</li> <li>✓ Ιζήματα</li> <li>✓ Νερά</li> <li>✓ Λάσπες</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ανοχή σε υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων</li> <li>✓ Υψηλή ικανότητα συσσώρευσης μετάλλων</li> <li>✓ Ταχεία ανάπτυξη</li> <li>✓ Συσσώρευση ιχνοστοιχείων σε σημεία πάνω από το έδαφος</li> <li>✓ Εύκολο στη συγκομιδή</li> <li>✓ Εκτεταμένο σύστημα ρίζας για την επεξεργασία μεγάλων όγκων εδάφους</li> <li>✓ Υψηλός συντελεστής μεταφοράς</li> <li>✓ Εύκολη γεωργική διαχείριση</li> <li>✓ Καλή προσαρμογή στις επικρατούσες περιβαλλοντικές και κλιματικές συνθήκες</li> <li>✓ Αντοχή σε παθογόνους οργανισμούς και παράσιτα</li> <li>✓ Απόθεση των φυτοφαγών ζώων για την αποφυγή της μόλυνσης της τροφικής αλυσίδας.</li> </ul>
Φυτοσταθεροποίηση (Phytostabilization)	Μείωση της κινητικότητας και βιοδιαθεσιμότητας της ρύπανσης; είτε μέσω φυσικών είτε	Περιορισμός της ρύπανσης	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Βαρέα μέταλλα</li> <li>✓ Χλωριωμένοι διαλύτες</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Εδάφη</li> <li>✓ Ιζήματα</li> <li>✓ Λάσπες</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ικανότητα ανάπτυξης εκτεταμένου ριζικού συστήματος</li> <li>✓ Ικανότητα να περιορίσει τη μεταφορά των ρύπων από τις ρίζες στους βλαστούς</li> <li>✓ Ικανότητα διατήρησης των ρύπων στις</li> </ul>

	μέσω χημικών διεργασιών				ρίζες ή τη ριζόσφαιρα, ώστε να αποφευχθεί η μόλυνση της τροφικής αλυσίδας
Φυτοεξαέρωση (Phytovolatilization)	Η διαδικασία απορρόφησης των ρύπων και εξαέρωση τους στην ατμόσφαιρα, μέσω του φυλλώματος	Εξαγωγή του ρύπου από το μολυσμένο μέσο και απελευθέρωση του στον αέρα	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Χλωριωμένοι διαλύτες</li> <li>✓ Ανόργανα στοιχεία</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Υπόγεια ύδατα</li> <li>✓ Εδάφη</li> <li>✓ Ιζήματα</li> <li>✓ Λάσπες</li> </ul>	
Ριζοδιήθηση (Rhizofiltration)	Χρήση των ριζών των φυτών για την απορρόφηση ή προσρόφηση ρύπων που βρίσκονται σε διάλυμα κοντά στις ρίζες	Εξαγωγή και δέσμευση του ρύπου	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Βαρέα μέταλλα</li> <li>✓ Οργανικά στοιχεία</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Επιφανειακά ύδατα</li> <li>✓ Υγρά αποβλήτα</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Φυτά ανθεκτικά σε μέταλλα</li> <li>✓ Υψηλή επιφάνεια απορρόφησης</li> <li>✓ Ανοχή σε υποξικές συνθήκες</li> <li>✓ Τα γερσαία φυτά προτιμώνται επειδή έχουν ινώδες και μεγαλύτερο ριζικό σύστημα, αυξάνοντας την ποσότητα των ριζών στη ρυπασμένη περιοχή</li> </ul>

### 3.3 Αξιολόγηση Τεχνολογιών Φυτοεξυγίανσης

#### • Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της Φυτοεξυγίανσης

Η φυτοεξυγίανση, όπως κάθε τεχνολογία αποκατάστασης, έχει μια σειρά από πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στα θετικά της συγκαταλέγεται το γεγονός ότι σε σύγκριση με άλλες τεχνικές είναι: οικονομικότερη, πιο περιβαλλοντικά φιλική, εφαρμόζεται για ένα ευρύ φάσμα τοξικών μετάλλων και είναι πιο αισθητικά ευχάριστη μέθοδος (Leguizamo, 2017). Ωστόσο,

αποτελεί βραδεία διαδικασία, η οποία μπορεί να απαιτήσει ακόμα και αρκετά χρόνια για τον καθαρισμό ενός χώρου. Επιπλέον, η μέθοδος είναι εφαρμόσιμη μόνο για εδάφη που χαρακτηρίζονται από ρύπανση με μικρό βάθος και επομένως περιορίζεται στην απορρύπανση της επιφάνειας εδάφους (μέχρι 1m) ή ρηχών υδροφορέων (μέχρι 3m) (Tangahu, 2011). Στον παρακάτω πίνακα 6 συγκεντρώνονται αρκετά από τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φυτοεξυγίανσης.

**Πίνακας 6: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φυτοεξυγίανσης (Laghlimi, 2015)**

	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<b>Κόστος</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Χαμηλό κεφάλαιο έναρξης</li> <li>✓ Χαμηλό λειτουργικό κόστος</li> <li>✓ Η ανακύκλωση μετάλλων παρέχει περαιτέρω οικονομικά πλεονεκτήματα.</li> </ul>	
<b>Χρόνος</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Αργή σε σύγκριση με άλλες τεχνικές</li> <li>✓ Εποχικά εξαρτώμενη</li> <li>✓ Οι περισσότεροι από τους υπερσυσσωρευτές φυτρώνουν με αργούς ρυθμούς</li> </ul>
<b>Απόδοση</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Μόνιμο αποτέλεσμα</li> <li>✓ Δυνατότητα αποκατάστασης του βιοδιαθέσιμου κλάσματος των ρύπων</li> <li>✓ Δυνατότητα ορυκτοποίησης των οργανικών ουσιών</li> <li>✓ Δυνατότητα αποκατάστασης ρυπασμένων περιοχών με περισσότερους από έναν τύπους ρύπανσης</li> <li>✓ Δεν διαχέεται πέραν του βάθους των ριζών</li> <li>✓ Δεν απαιτείται ιδιαίτερα εξειδικευμένο προσωπικό</li> <li>✓ Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μελέτη του χώρου ή μετά το κλείσιμο αυτού</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Δεν είναι σε θέση να μειώσει τη ρύπανση κατά 100%</li> <li>✓ Η υψηλή συγκέντρωση των ρύπων μπορεί να είναι τοξική για τα φυτά</li> <li>✓ Στην περίπτωση αποκατάστασης εδαφών εφαρμόζεται μόνο στα επιφανειακά εδάφη</li> <li>✓ Περιορίζεται σε μέρη με χαμηλές συγκεντρώσεις ρύπων</li> <li>✓ Απαιτεί εμπειρία στο σχεδιασμό και επιλογή των κατάλληλων φυτών ανάλογα με το είδος των μετάλλων της περιοχής</li> </ul>
<b>Εφαρμογή</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Κατά την επιτόπια εφαρμογή αποφεύγεται η εκσκαφή και η μεταφορά μολυσμένων μέσων</li> <li>✓ Σχετικά εύκολη στην εφαρμογή</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Η εφαρμογή γίνεται περίπλοκη κατά την παρουσία πολλών τύπων βαρέων μετάλλων και οργανικών ρύπων</li> <li>✓ Οι κλιματικές συνθήκες αποτελούν περιοριστικό παράγοντα.</li> </ul>
<b>Επιπτώσεις στο περιβάλλον και τον πληθυσμό</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Μείωση του κινδύνου εξάπλωσης της ρύπανσης</li> <li>✓ Εξάλειψη δευτερογενών αποβλήτων στον αέρα ή το νερό</li> <li>✓ Αποδοχή του κοινού για λόγους αισθητικής</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Τα μέταλλα μπορούν να εκλυθούν από τη βροχή και να μεταφερθούν πίσω στο έδαφος, μετά την αποσύνθεση της φυτικής βιομάζας</li> <li>✓ Η εισβολή ξένων φυτικών ειδών μπορεί να επηρεάσει τη βιοποικιλότητα</li> <li>✓ Κίνδυνος μόλυνσης της τροφικής αλυσίδας σε περίπτωση κακοδιαχείρισης και έλλειψης φροντίδας</li> </ul>

#### • Οικονομική αξιολόγηση τη φυτοεξυγίανσης

Ένα από τα πλέον σημαντικά πλεονεκτήματα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός είναι πολύ πιο οικονομική σε σχέση με τις συμβατικές φυσικοχημικές μεθόδους απορρύπανσης, έως και 60-80% (Tangahu, 2011). Το κόστος εφαρμογής κάθε μεθόδου φυτοεξυγίανσης αναλύεται σε (Γιδαράκος, 2009):

□ Κόστος σχεδιασμού που αφορά στις μελέτες/ μετρήσεις που πρέπει να γίνουν για τον χαρακτηρισμό του πεδίου, στο σχεδιασμό των εργασιών και τη διεξαγωγή προκαταρκτικών δοκιμών πεδίου

□ Κόστος εγκατάστασης που αφορά στην προετοιμασία του πεδίου (π.χ. απομάκρυνση εμποδίων, μπαζών, περίφραξη κλπ), στην προετοιμασία του εδάφους (π.χ. χρήση εδαφοβελτιωτικών, στράγγιση, άρδευση, φύτευση κ.α.)

□ Λειτουργικό κόστος που αφορά στη συντήρηση των φυτών (πότισμα, λίπανση, χρήση χηλικών μέσων ή/ και φυτοφαρμάκων) και των υποδομών (π.χ. συντήρηση της περίφραξης), στην παρακολούθηση της διαδικασίας (συγκέντρωση θρεπτικών στα φυτά, μεταβολές pH κι υγρασίας, συγκέντρωση ρύπων στα φυτά, εκπομπές αερίων, καιρικές συνθήκες) και τέλος την απομάκρυνση τω φυτών και πιθανώς την επαναφύτευση ή μεταφύτευση τους.

Ενδεικτικά κόστη εφαρμογής της φυτοεξυγίανσης είναι (Γιδαράκος, 2009):

□ Απορρύπανση εδάφους από πετρελαιοειδή με χρήση ριζοαποδόμησης:

ο πιλοτική κλίμακα: 115 € / tn

ο πλήρης κλίμακα: 9,5 € / tn

□ Απορρύπανση εδάφους από μόλυβδο: 7 € / tn

□ Απορρύπανση υδροφορέα από εκρηκτικά (TNT, RDX, HMX): 0,33 € / 1000L (πλήρης κλίμακα)

□ Απορρύπανση υδροφορέα από ραδιενεργά στοιχεία: 0,38–1,14€/ 1000L.

Στον παρακάτω πίνακα 6 φαίνονται τα κόστη εφαρμογής διάφορων μεθόδων απορρύπανσης.

**Πίνακας 6: α) Κόσστη διάφορων τεχνολογιών απορρύπανσης σε βάθος πενατετίας (Γιδαράκος, 2009), β) Κόσστη διάφορων τεχνολογιών απορρύπανσης (Παπαφιλίππáκη, 2004)**

Τεχνολογία	Κόστος (€ /tn)
Φυτοεξυγίανση (με χρήση Λεύκας)	7-25
Βιοαποδόμηση (in- situ)	36- 108
Βιοαερισμός	14- 158
Εδαφική πλύση	57- 143
Σταθεροποίηση/ στερεοποίηση	172- 244
Αποτέφρωση	143- 1.075

Τεχνολογία	Κόστος (€)
Εκσκαφή	100- 400 / m <sup>3</sup>
Επιτόπου σταθεροποίηση/ στερεοποίηση (Σταθερό κόστος 10.000- 20.000€)	117- 379 / m <sup>3</sup>
Επί τόπου υαλοποίηση (Σταθερό κόστος 40.000- 80.000€)	588- 1.177 / m <sup>3</sup>
Πυρομεταλλουργικός διαχωρισμός (Σταθερό κόστος 10.000- 20.000€)	6,5- 117 / m <sup>3</sup>
Χημική αποκατάσταση (Σταθερό κόστος 15.000- 25.000€)	135- 523 / m <sup>3</sup>
Εδαφική έκπλυση	131- 392 / m <sup>3</sup>
Πλύσιμο εδάφους (Σταθερό κόστος 10.000- 20.000€)	117- 523 / m <sup>3</sup>
Μικροβιολογική αποκατάσταση	0,45 -11,34 / kg
Φυτοεξυγίανση	18.750- 37.500 /στρ
Φυτοεξαγωγή (Διάρκεια αποκατάστασης 18- 60 μήνες)	15- 40 / m <sup>3</sup>
Ηλεκτροκινητική αποκατάσταση (Κόστος όξυνσης εδάφους)	196- 1.570 /m <sup>3</sup>

Σε σχέση με τα παραπάνω κόστη πρέπει να σημειωθεί ότι ανεξάρτητα της μεθόδου που χρησιμοποιείται, απαιτείται πάγιο κόστος για την κινητοποίηση των μετάλλων που κυμαίνεται ανάμεσα στα 10.000 € με 20.000 €, ανάλογα με την τεχνική κινητοποίησης. Επιπλέον, τα κόστη εξαρτώνται από τα χρησιμοποιούμενα υλικά και αντιδραστήρια, καθώς και από το απαιτούμενο εργατικό δυναμικό και εξοπλισμό.

Επιπλέον, μεταβάλλονται ανάλογα με το βάθος και την έκταση της ρύπανσης, τη βιοδιαθεσιμότητα των μετάλλων και τις συνθήκες της περιοχής. Γενικά, τα αργιλώδη εδάφη μειώνει την απόδοση των περισσότερων τεχνικών, ενώ αντίθετα στα αμμώδη εμφανίζονται καλύτερες αποδόσεις, καθώς αυτού του τύπου τα εδάφη δεν χαρακτηρίζονται από υψηλή ικανότητα συγκράτησης ιόντων. Άλλες παράμετροι που επηρεάζουν την αποδοτικότητα των τεχνολογιών και επομένως και το κόστος εφαρμογής τους είναι η υγρασία, το pH και η κοκκομετρία τους εδάφους (Παπαφιλίππκη, 2004).

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι η φυτοξυγίανση είναι πιο οικονομική μέθοδος, ωστόσο αυτό δεν την κάνει αναγκαστικά και βιώσιμη οικονομικά. Αυτό εξαρτάται από πλήθος παραγόντων, όπως ο χρόνος κατεργασίας, το ποσοστό απομάκρυνσης των μετάλλων, η δυνατότητα ανάκτησης τους κ.α. Σε κάθε περίπτωση, όμως, οποιαδήποτε τεχνολογική παρέμβαση χωρίς να εξετάζεται τόσο η οικονομική όσο και ανθρώπινη διάσταση είναι καταδικασμένη σε αποτυχία. Ως εκ τούτου, η οικονομική βιωσιμότητα, η κοινωνική αποδοχή και η περιβαλλοντική καταλληλότητα είναι προϋπόθεση για την επιτυχία οποιασδήποτε εφαρμογής φυτοεξυγίανσης (Sarwar, 2017).

Προκειμένου για την καλύτερη και βιώσιμη αξιοποίηση της φυτοεξυγίανσης έχει προταθεί η αξιοποίηση των φυτών ως βιομάζα. Για παράδειγμα, η φυτοκατεργασία εδαφών, επιβαρυσμένων με μέταλλα, μέσω δέντρων ελιάς, μπορεί να οδηγήσει σε παραγωγή φυτικού ελαίου με τέτοια χαρακτηριστικά, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βιοντίζελ για την παραγωγή ενέργειας (Ginneken, 2010). Παρόλο που λείπουν στοιχεία για την βιωσιμότητα της εν λόγω στρατηγικής αξιοποίησης σε κλίμακα πεδίου, τα μέχρι τώρα εργαστηριακά πειράματα αποδεικνύουν ότι μπορεί να αποτελέσει πολλά υποσχόμενη εναλλακτική τεχνική παραγωγής βιοαερίου (Tian, 2016).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>Ο</sup>: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση πολλών φυσικοχημικών και θερμικών τεχνολογιών σήμερα σε πολλές περιπτώσεις ρυπασμένων περιοχών που χρήζουν αποκατάστασης, είναι συχνά απαγορευτική για εφαρμογή λόγω του αυξημένου κόστους στο οποίο συμβάλουν οι πρόσθετες ποσότητες αποβλήτων που παράγονται κατά την εκτέλεσή τους, οι οποίες απαιτούν επιπλέον διαχείριση και επεξεργασία, έχοντας ως αποτέλεσμα στην συμβολή της αύξησης του συνολικού επενδυτικού κεφαλαίου.

Επιπλέον, η δημιουργία του κινδύνου εκδήλωσης δευτερογενούς ρύπανσης που μπορεί να προκύψει σε άλλες κοντινές τοποθεσίες, στα εδάφη και στα επιφανειακά ή υπόγεια ύδατα αλλά και οι αλλαγές που προκαλούνται στα χαρακτηριστικά και στις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά την παραγωγικότητά του, είναι οι κύριες αιτίες που συμβάλουν στην καθοδήγηση προς την αναζήτηση και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό πως υπάρχει μεγάλη ανάγκη να αναπτυχθούν νέες τεχνολογίες, δίνοντας έμφαση στην ελαχιστοποίηση του κόστους και στην προστασία του φυσικού περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένης της διατήρησης της ποιότητας των εδαφών και των υδάτων.

Η τεχνική της φυτοεξυγίανσης (Προτεινόμενη τεχνολογία βιο-αποκατάστασης περιβαλλοντικών συστημάτων) παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται έως σήμερα όπως είναι το χαμηλότερο κόστος εφαρμογής και ο φιλικότερος χαρακτήρας προς το περιβάλλον. Παρά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει, όπως και κάθε νέα τεχνολογία, η υιοθέτησή της ως μια αποδεκτή τεχνολογίας αποκατάστασης των μολυσμένων περιοχών επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Οι σημαντικότεροι από τους οποίους σχετίζονται από το αίσθημα της αβεβαιότητας και της μη εμπιστοσύνης στην απόδοση και την επιτυχία των αποτελεσμάτων της αποκατάστασης λόγω των κινδύνων που μπορεί να παρουσιαστούν από μια ενδεχόμενη αποτυχία των προκαθορισμένων στόχων.

Αυτό μπορεί να οφείλεται: (1) από την έλλειψη έγκυρων γνώσεων ή πληροφοριών για τους μηχανισμούς και τις αλληλεπιδράσεις που αναπτύσσονται μεταξύ του εδάφους, των φυτών, των ρύπων και των μικροοργανισμών, (2) τον απαιτούμενο μεγάλο χρόνο της αποκατάστασης, (3) τον ανταγωνισμό με άλλες υπάρχουσες τεχνολογίες, (4) την έλλειψη επαρκούς έρευνας σε πραγματικές συνθήκες πεδίου και (5) την έλλειψη στοιχείων που να τεκμηριώνουν το χρόνο και το κόστος που απαιτούνται. Συνεπώς, εξακολουθεί να υπάρχει ακόμα και σήμερα μεγάλη ανάγκη για περισσότερη εφαρμόσιμη έρευνα, ώστε να συμπληρωθούν τα παραπάνω κενά πληροφοριών τόσο από την άποψη της εξάλειψης των κινδύνων επέκτασης της ρύπανσης στο περιβάλλον που μπορεί να προκύψουν όσο και από την άποψη της ανάπτυξης μιας οικονομικά βιώσιμης, αποδοτικότερης και τεκμηριωμένης θεωρητικά και πρακτικά τεχνολογίας.

Η εφαρμογή της φυτοεξυγίανσης κάτω υπό συγκεκριμένες συνθήκες μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό αποδοτικό εργαλείο ή σύστημα διαχείρισης του περιβάλλοντος με οικονομικά όσο και περιβαλλοντικά οφέλη για την κοινωνία και τα φυσικά οικοσυστήματα, αντίστοιχα. Ωστόσο, η χρήση της, ακόμη και σήμερα εξακολουθεί να υστερεί και να είναι περιορισμένη έναντι των συμβατικών τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται, εξαιτίας της προκατειλημμένης αντίληψης που έχει δημιουργηθεί και της προτίμησης προς τις παλαιότερες αυτές τεχνολογίες, λόγω της μακροχρόνιας ιστορικής τους επιτυχίας κατά τη χρήση τους στο παρελθόν που έχουν να αναδείξουν. Άλλες σημαντικές αιτίες που συμβάλουν σε μεγάλο βαθμό στον περιορισμό της, είναι ορισμένα μειονεκτήματα που παρουσιάζει αυτή η τεχνολογία τα οποία σχετίζονται, με τον κίνδυνο της μεταφοράς των ρύπων στο περιβάλλον και την εισαγωγή τους στην τροφική αλυσίδα, η διαχείριση της μολυσμένης βιομάζας των

φυτών, η μη διαθεσιμότητα κατάλληλων φυτών που να είναι συμβατά στις εκάστοτε τοπικές συνθήκες, η επιλεκτικότητα των φυτών σε ορισμένους μόνο ρύπους και η βιοδιαθεσιμότητα των ρύπων στο έδαφος.

Για τους παραπάνω λόγους και για να γίνει περισσότερο ελκυστική η φυτοεξυγίανση, είναι σαφές, πως είναι σημαντικό ότι θα πρέπει να διαμορφωθεί μια νέα διαφορετική ολοκληρωτική πολιτική προσέγγιση από τις κυβερνήσεις που καθορίζουν την ακολουθούμενη πολιτική των στρατηγικών διαχείρισης και προστασίας του περιβάλλοντος και κατεπέκταση της προστασίας και διατήρησης της ποιότητας του εδάφους και των υδάτων, μέσω των νομοθετικών κανόνων που επικυρώνουν. Πολιτική η οποία, εκτός της προστασίας του περιβάλλοντος, θα πρέπει να περιλαμβάνει και οικονομικά κίνητρα για τους υποψήφιους εμπορικούς χρήστες ή διαχειριστές (π.χ. κάποια μορφή χρηματοδότησης), να παρέχει την ελεύθερη πρόσβαση σε πληροφορίες και δεδομένα στο ευρύ κοινό και στις ιδιωτικές επιχειρήσεις που εμπλέκονται ή απλά θέλουν να πληροφορηθούν για περιβαλλοντικά θέματα που μπορεί να σχετίζονται με τη διαχείριση και αποκατάσταση των μολυσμένων περιοχών και των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται αλλά και την συμμετοχή τους σε αποφάσεις περιβαλλοντικών ζητημάτων.

Αυτό θα συμβάλει σε μια καλύτερη κατανόηση της έννοιας της προστασίας του φυσικού περιβάλλοντος και γενικά των μεθόδων που χρησιμοποιούνται αλλά και στην ανάπτυξη των νέων καινοτόμων τεχνολογιών, όπως της φυτοεξυγίανσης. Η φυτοεξυγίανση, πρέπει εκτός της αποκατάστασης των μολυσμένων περιοχών να συνδυαστεί και με άλλους περιβαλλοντικούς αλλά και οικονομικούς τομείς όπως είναι η ανακύκλωση, η δασοκομία, ο εμπλουτισμός της βιοποικιλότητας, η προστασία των εδαφών από τη διάβρωση, η σύνδεσή της με την παραγωγή των ενεργειακών καλλιεργειών, την παραγωγή ξύλου, τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής.

Τέλος, συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι η φυτοεξυγίανση παρουσιάζει μεγάλες δυνατότητες ανάπτυξης και αυτό αποδεικνύεται από το έντονο ενδιαφέρον που υπάρχει τις τελευταίες δύο δεκαετίες σε ερευνητικό επίπεδο. Οι έρευνες αυξάνονται συνεχώς και η έννοια της φυτοεξυγίανσης γίνεται όλο και περισσότερο διαδομένη καθώς σήμερα υπάρχουν πολλά παραδείγματα εφαρμόσιμων πιλοτικών ερευνών κυρίως μικρής κλίμακας. Ωστόσο, πριν γίνει μια ενδεχόμενη χρήση της σε μεγάλη κλίμακα, είναι απαραίτητο να ερευνηθούν περισσότερο οι μηχανισμοί και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ του εδάφους, ρύπων, φυτών, μικροοργανισμών, ριζόσφαιρας και των κινδύνων που μπορεί να προκύψουν από μια ενδεχόμενη χρήση της σε πραγματικές συνθήκες πεδίου που θα καθορίσουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής. Για παράδειγμα, η χρήση της γενετικής μηχανικής είναι ένα εργαλείο που μπορεί να επιταχύνει την ανάπτυξη νέων φυτών και μικροοργανισμών με χαρακτηριστικά που να είναι καλύτερα από αυτά των φυσικών. Η έρευνα ενός βέλτιστου συνδυασμού φυτών και μικροοργανισμών αποτελεί ένα υποσχόμενο τομέα για το μέλλον. Ωστόσο, πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψιν ο γενετικός κίνδυνος που μπορεί να προκύψει στο φυσικό περιβάλλον. Επίσης, όσον αφορά τη χρήση της φυτικής βιομάζας για αξιοποίησή της στην παραγωγή ενέργειας, θα πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στη μεταφορά των ρύπων στη βιομάζα και την επακόλουθη τύχη των ρύπων στο περιβάλλον και την τροφική αλυσίδα.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Αλιφραγκής, Δ., 2015. Το έδαφος: Διαχείριση, Προστασία, Βελτίωση και Αποκατάσταση των Λειτουργιών του. Εκδόσεις Αϊβάζη. Θεσσαλονίκη.
2. Tiwary S. et al, 2007, An effective means of biofiltration of heavy metal contaminated water bodies using aquatic weed *Echhornia crassipes*, *Environ. Monit. Asses* 129:253-256.
3. Sarma, H., 2011. Metal hyperaccumulation in plants: a review focusing on phytoremediation technology. *J. Environ. Sci. Technol.*, 4(2): 118-138.
4. Robinson, B.H., Chiarucci, A., Brooks, R.R., Petit, D., Kirkman, J.H., Gregg, P.E.H. and De Dominicis, V., 1997. The nickel hyperaccumulator plant *Alyssum bertolonii* as a potential agent for phytoremediation and phytomining of nickel. *Journal of Geochem. Explor.*, 59:75–86.
5. Trigueros, D., Mingorance, M.D. and Rossini Oliva, S., 2012. Evaluation of the ability of *Nerium oleander* L. to remediate Pb-contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 114: 126–133.
6. Rai PK, 2007a, Phytoremediation of Pb and Ni from industrial effluents using *Lemna minor*: An eco-sustainable approach, *Bull Biosci* 5(1):67-73.
7. Susala, S., Medina, V. and McCutcheon, S., 2002. Phytoremediation: an ecological solution to organic chemical contamination. *Ecological Engineering*, 18 (5). p.647-658.
8. Glomis, 2000. "Use of Mangrooves in Landfill Management". *Glomis Electronic Journal*. p.1. Διαθέσιμο σε ηλεκτρονική μορφή τον Ιανουάριο 2019 στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.glomis.com/ej/pdf/ej01.pdf>.
9. Ανδρεαδάκης Α., 2001-2002. «Αρχές και μέθοδοι διαχείρισης στερεών αποβλήτων». Σημειώσεις Μαθήματος. Διεπιστημονικό-Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
10. ΤΣΟΛΑΚΗΣ Σ. Ε.(2009). Διπλωματική εργασία: Βιολογική μέθοδος αποκατάστασης ρυπασμένων εδαφών με την μέθοδο της φυτοεξύγιανσης: Χρήση συγκεκριμένων φυτικών ειδών, Πάτρα.
11. Brooks, R. R., and Robinson, B. H. (1998). "Aquatic phytoremediation by accumulator plants". In *Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals: their role in Phytoremediation, Microbiology, Archaeology, Mineral Exploration and Phytomining*, R. R. Brooks, ed. (New York: CAB International), pp. 203-226.
12. Cunningham, S. D., Anderson, T. A., Schwab, A. P., and Hsu, F. C. (1996). "Phytoremediation of soil contaminated with organic pollutants". *Advances in Agronomy*, Vol. 56, pp. 55-114.
13. Rai PK, 2007b, Wastewater management through biomass of *Azolla pinnata*: An ecosustainable approach, *Ambio* 36(5):426-428.
14. Ξενίδης Α., Πανταζίδου Μ., Παπασιώπη Ν. (2007) 'Αποκατάσταση ρυπασμένων χώρων', Διεπιστημονικό- Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του ΕΜΠ, Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων.
15. Τσέκος, Ι.Β., (2004). Φυσιολογία φυτών. 2η έκδοση. Εκδόσεις Αδελφών Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη.
16. Pletsch M. (2003) Phytoremediation, *Plants and the Environment*, pg. 781 -786.
17. Meagher RB, (2000). Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *Current Opinion in Plant Biology* 3: 153–162.

18. Walton, B. T., Guthrie, E. A., and Hoylman, A. M. (1994). "Toxicant degradation in the rizosphere". In *Bioremediation through rhizosphere technology*, T. A. Anderson and J. R. Coats, eds.: (ACS Symposium Series), pp. 11-26.
19. Brix, H. (1997). "Do macrophytes play a role in constructed wetlands?" *Wat. Sci. Tech.* Vol. 35, pp. 11-17.
20. Raskin, I., Salt, D., Kramer, U., and Schulman, R.(1998). "Phytoremediation: Green and Clean". *Acta Horticulture*, Vol. 457, pp. 329-331.
21. Fiorenza S., Balshaw, K., Lowe, D. F., Oubre, C. L., and Ward, C. H.(1998). Innovative bioremediation technologies: The DOD/AATDE contribution. In *Global Environmental Biotechnology*, D. L. Wise, ed. Kluwer Academic Publishers), pp. 365-376.
22. McCrath, S. P.(1998). Phytoextraction for soil remediation. In *Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals: their role in Phytoremediation, Microbiology, Archaeology, Mineral Exploration and Phytomining*, R. R. Brooks, ed. (New York: CAB International), pp. 261-287.
23. Brooks, R. R., and Robinson, B. H. (1998). "Aquatic phytoremediation by accumulator plants". In *Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals: their role in Phytoremediation, Microbiology, Archaeology, Mineral Exploration and Phytomining*, R. R. Brooks, ed. (New York: CAB International), pp. 203-226.
24. Tester and Leigh (2001). Comparative physiology of elemental distributions in plants. Special Issue: Plant Nutrition. *Partitioning of nutrient transport processes in roots. Journal of Experimental Biology* 2001;52:445-457.
25. Clemens, S., Palmgren, M.G., Kramer, U., (2002). A long ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends in Plant Science* 7, 309-315.
26. Salt D.E., Smith R.D. and Raskin Iß (1998). Phytoremediation. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 49: pp 643-68.
27. Karataglis S. (1980). Variability between and within populations of *Agrostis tenuis* with respect to metal tolerance. *Phyton*, 20, 23–32.
28. Bradshaw, A D, and McNeilly, T. 1981. *Evolution and Pollution*, Edward Arnold, London.
29. Symeonidis L., M c Neilly T ., Bradshaw R D. 1985. Differential tolerance of three cultivars of *Agrostis capillaries* L. to Cadmium copper , Lead , nickel , and Zinc . *New Phytologist* 101: 309 -315.
30. Flatham P. E., and Lanza, G. R. (1998). "Phytoremediation: Current reviews on an emerging technology". *Journal of Soil Contamination*, Vol. 7, pp. 415-432.
31. Sheoran V., Sheoran A., Poonia P., 2011. Role of hyperaccumulators in phytoextraction of metals from contaminated mining sites: a review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 41: 168–214.
32. Jadia C.D. Fulekar M.H., 2008. Phytotoxicity and Remediation of Heavy Metals by Alfalfa (*Medicago sativa*) in Soil-vermicompost Media, *Advances in Natural and Applied Sciences*, 2(3): 141-151.
33. Lone M.I., He Z., Stoffella P.J., Yang, X., 2008. Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: progresses and perspectives. *J. Zhejiang Univ. – Sci. B* 9; 210–220.
34. Jadia C.D. Fulekar M.H., 2008. Phytotoxicity and Remediation of Heavy Metals by Alfalfa (*Medicago sativa*) in Soil-vermicompost Media, *Advances in Natural and Applied Sciences*, 2(3): 141-151.
35. Prasad M.N.V., 2003. Phytoremediation of metal-polluted ecosystems: hype for commercialization. *Russ. J. Plant Physiol*, 50: 686–700.

36. USEPA, 2001. Phytoremediation of contaminated soil and ground water at hazardous waste sites. [http://www.epa.gov/ada/download/issue/epa\\_540\\_s01\\_500.pdf](http://www.epa.gov/ada/download/issue/epa_540_s01_500.pdf).
37. Nascimento C.W.A., Xing, B., 2006. Phytoextraction: a review on enhanced metal availability and plant accumulation. *Sci. Agric.* 63: 299-311.
38. Wei S., Silva J.A.T., Zhou Q., 2008. Agro-improving method of phytoextraction heavy metal contaminated soil. *J. Hazard. Mater.* 150: 662-668.
39. Favas P.J.C., Pratas J., Varum M., Souza R., Paul M., 2014, Phytoremediation of Soils Contaminated with Metals and Metalloids at Mining Areas: Potential of Native Flora, available on line at: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/46355.pdf>.
40. Glass D.J., 1999. Economic potential of phytoremediation. In: Raskin I, Ensley BD, editors. *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment*. New York: John Wiley & Sons Inc, p. 15-31.
41. Chiacchierini E., Restuccia, D., Vinci, G. 2004. Bioremediation of food industry effluents: recent applications of free and immobilized polyphenoloxidases. *Food Sci. Techn. Int.* 10, 373-382.
42. Grasso, D. 1993. *Hazardous Waste Site Remediation*. CRC Press, USA, Section J, pp.1-77.
43. King, R.B., Long, G.M., Sheldon, J.K. 1998. *Practical Environmental Bioremediation. The Field Guide*. CRC Press, USA.
44. Kuo, J. 1999. *Practical Design Calculations for Groundwater and Soil remediation*. Lewis Publishers, USA.
45. LaGrega, M.D., Buckingham, P.L., Evans, J.C. 1994. *Hazardous Waste Management*. McGraw-Hill, Chapter 10, pp. 555-640.
46. Marin, J.A., Hernandez T., Garcia, C. 2005. Bioremediation of oil refinery sludge by landfarming in semiarid conditions: Influence on soil microbial activity. *Env. Res.* 98, 185-195.
47. National Academy of Science, USA. 1993. *In Situ Bioremediation. When does it work?*. National Academy Press, USA. <http://www.nap.edu/openbook/03090489666/html/R1.html>.
48. Pankow, J.F. 1991. *Aquatic Chemistry Concepts*. Lewis Publishers, USA.
49. Pope, D.F, Matthews, J.E. 1993. Bioremediation using the land treatment concept. USEPA/600/R-93/164. . Robert S. Kerr, Environmental Research Laboratory. US Environmental Protection Agency, Ada.
50. Suthersan, S.S. 1997. *Remediation Engineering. Design Concepts*. CRC Press, USA.
51. Σκορδίλης, Α., Κομνίτσας, Κ. 2004. Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων. Επικίνδυνων Αποβλήτων-Τόμος Β. Κεφάλαιο 6: Μέθοδοι αποκατάστασης ρυπασμένων εδαφών από ταφή και επικίνδυνων αποβλήτων. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, σελ. 140.
52. Βλυσίδης, Α., Γρηγοροπούλου, Ε., & Λυμπεράτος, Γ. (2019). *Περιβαλλοντική Μηχανική: Σημειώσεις Παραδόσεων*. Αθήνα. Retrieved from <https://courses.chemeng.ntua.gr/enveng/material>
53. Γιδαράκος, Ε, & Αιβαλιώτη, Μ. (2005). *Τεχνολογίες Αποκατάστασης εδαφών και υπόγειων υδάτων από επικίνδυνους ρύπων*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζυγός.
54. Γιδαράκος, Ευάγγελος, Αιβαλιώτη, Μ., Γιαννής, Α., & Καλδέρης, Δ. (2009). *Μελέτη για τη Διερεύνηση, Αξιολόγηση και Αποκατάσταση Ανεξέλεγκτων Ρυπασμένων Χώρων/Εγκαταστάσεων από Βιομηχανικά και Επικίνδυνα Απόβλητα στην Ελλάδα*. Χανιά. Retrieved from [http://www.epper.gr/elibrary/meleti\\_apokat\\_ripasm\\_xoron.pdf](http://www.epper.gr/elibrary/meleti_apokat_ripasm_xoron.pdf)
55. Ζαμπετάκης, Α. ., Μανιός, Β. ., & Καρατζάς, Γ. (2005). Καινοτομικές μέθοδοι εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υπόγειων υδάτων. Η τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης. In *HELECO '05 "5η Διεθνής Έκθεση και Συνέδριο για την*

- Τεχνολογία του Περιβάλλοντος*” (pp. 1–14). Αθήνα. Retrieved from [http://library.tee.gr/digital/m2045/m2045\\_zabetakis1.pdf](http://library.tee.gr/digital/m2045/m2045_zabetakis1.pdf)
56. Παπαθεοδώρου, Ε., & Στάμου, Γ. (2015). Βιολογικοί πόροι στο έδαφος και αποκατάσταση. In *Εδαφικές διεργασίες και αποκατάσταση εδαφών* (pp. 116–135). Εκδόσεις Κάλλιπος.
57. Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. M. (2018). Phytoremediation for the Elimination of Metals, Pesticides, PAHs, and Other Pollutants from Wastewater and Soil. In *Phytobiont and Ecosystem Restitution* (pp. 101–136). Singapore: Springer Singapore.
58. Abdulsalam, S., & Omale, A. B. (2009). Comparison of biostimulation and bioaugmentation techniques for the remediation of used motor oil contaminated soil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 52(3), 747–754.
59. Akomolafe, G. F., Onwusiri, K. C., & Adokpa, F. A. (2019). Phytoremediation and Agricultural Productivity – A mini review. *Journal of Floriculture and Landscaping*, (December 2018), 15–19.
60. Albergaria, J. T., Alvim-Ferraz, M. da C. M., & Delerue-Matos, C. (2012). Remediation of sandy soils contaminated with hydrocarbons and halogenated hydrocarbons by soil vapour extraction. *Journal of Environmental Management*, 104, 195–201.
61. Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals--concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881.